

AIAS2026

Tuesday 1 September 2026 - Friday 4 September 2026

Milano



Book of Abstracts

Contents

Ottimizzazione Topologica assistita da Machine Learning di Compositi in Fibra di Carbonio prodotti tramite Additive Manufacturing 245	1
Structural Smart Fabrics: un nuovo concetto di strutture con rigidità dipendente dalla temperatura 247	1
Previsione e progettazione della forma di depositi di Cold Spray Additive Manufacturing tramite Physics-Informed Neural Networks 252	2
Machine Learning-assisted Detection and Extreme Value Characterization of Critical Defects in PBF-LB parts via XCT 263	3
Self-sensing architected materials 267	3
Comportamento a fatica e a frattura del composito a matrice metallica Al ₂₆₁₈ -TiB ₂ prodotto mediante PBF-LB 265	4
Sviluppo di una tecnica ibrida di manifattura additiva di grande formato per la metallizzazione di compositi a matrice polimerica 272	5
Applicazione del Metodo della Tensione di Picco alla progettazione a fatica di giunti dissimili tra piastre in AISI 316L prodotte con manifattura additiva e laminate 273	5
Fatigue Performance of Hybrid Surface-Based Additively Manufactured Lattice Structures 274	6
Neutron tomography and neutron diffraction characterization of junction properties in CoCrMo and SS 316L PBF-LB functionally graded materials 290	7
Experimental and Constitutive Modeling of ULCF/LCF Behavior in GRCo-42 for Aerospace Applications 295	8
Cold Spray Additive Manufacturing of Al-Fe Bimetallic Composites with Tailored Properties 323	8
Confronto tra Metodi Sperimentali e Microstrutturali per la Caratterizzazione Anisotropa in Componenti prodotti tramite Manifattura additiva basata sull'estrusione di materiale (MEX) 326	9
Modellazione numerica e caratterizzazione sperimentale di strutture sandwich con nucleo spinodale 346	10
Design and Testing of a Fully 3D-Printed Self-Sensing Metamaterial 374	10

A Hardware-Independent Framework for Real-Time Arc Detection and Anomaly Alerting in Unfiltered Video Footages of WAAM Processes 378	11
Ottimizzazione Topologica Level-Set di Celle Unitarie Periodiche in 2D e 3D 389	12
Benchmarking LPBF Dimensional Accuracy with ISO/ASTM 52902: A Comprehensive Build Plate Targeting Holes and Thin Walls 392	13
Influenza dell'anisotropia indotta dal processo L-PBF sul comportamento isotropo di strutture TPMS Gyroid in acciaio 316L 434	13
Micro-Vibration Insulation for Optical Payloads: Design and Experimental Evaluation of Dynamic Response and Structural Strength of Lattice Panels with Different Densities 435	14
Numerically Informed Neural Networks for Damage Detection in TPMS Lattice Structures via Acoustic Resonance Testing 436	15
Ruolo della direzione di costruzione e dei trattamenti termici su microstruttura e proprietà meccaniche e magnetiche di acciai Fe-Si da manifattura additiva 452	15
IPC lattice structure: modellazione in regime elastico e plastico 448	16
Mechanics-guided optimization of hybrid periodic architectures 332	16
Il '900: il Secolo dell'Automobile 1 454	17
Identifying Representative Driving Cycles for Electric Motorcycles: a Data-Driven Approach to Evaluate Energy Consumption and Regeneration 256	18
Simulation of an electric vehicle (EV) crash using a homogeneous Finite Element (FE) model of a battery pack 282	18
Ottimizzazione dei profili di scorrimento dei rulli di un CVT a cinghia, realizzazione attraverso additive manufacturing di appositi inserti e prove al banco dei prototipi realizzati. 297	19
Metodologie spettrali per la stima della vita a fatica di telai per carrelli elevatori soggetti a carichi non stazionari 312	20
Framework Simulativo per la Quantificazione di Danni Materiali e Rischio Lesivo in Scenari Incidentologici Reali 356	20
Sviluppo di una metodologia numerica per l'analisi cinematica ed elastoidrodinamica di un sistema di distribuzione a camma e bilanciere a dito per motori ad alte prestazioni 363	21
On the Press-Fit-Induced Rotation of the Crankpin Axis in Built-Up Crankshafts 364	22
A Holistic Multi-Objective Framework for the Optimal Design of Vehicle Subsystems 382	23
Innovative Tyre Testing Platforms and Measurement Systems for Vehicle Applications 383	24
Assessing Driver Acceptance of Advanced Vehicle Technologies Through Driving Simulators 384	24
Experimental Characterization and Modelling of Bicycles for Safety, Efficiency, and Performance 385	25

Mesh-Free CAD-Based Isogeometric Vibro-Acoustic Analysis for Automotive NVH Applications 395	25
Biocompositi prestazionali per l'automotive: approccio integrato multi-scala tra materiali, processo e progettazione 400	26
Sviluppo di una Metodologia Analitico-Numerica per l'Analisi Strutturale dei Rotori di Motori Elettrici Sincroni a Magneti Permanenti Superficiali 403	27
A Multi-Objective Deep Reinforcement Learning Controller for E-Bike Front-Wheel Anti-Lock Braking 422	28
Methodologies in the use of Human Body Models for passive safety of vehicles 428	29
Valutazione di lubrificanti bio-based da Waste Cooking Oil per collegamenti filettati in ambito automotive 320	30
Stima dei carichi a terra in veicoli a due ruote tramite strumentazione ibrida e utilizzo di tecniche di apprendimento automatico 339	31
Reduced Order Modeling of Automotive Crash Events via Proper Orthogonal Decomposition and Parametric Shape Morphing 399	31
Metodologia numerico-sperimentale per la modellazione tridimensionale completa di pneumatici in ambito automotive 432	32
Testing Autonomous Driving Control Algorithms with Scaled Vehicles 438	33
Analysis of Direct Oil Cooling Channel Configurations in an Electric Machine Stator 440	34
Il progetto Calliope e la proposta di uno approccio sforzo-informato per la progettazione di protesi per arti superiori 238	34
Effetto della struttura Voronoi e dei trattamenti superficiali sulle prestazioni funzionali di viti ossee in lega Ti-6Al-4V 276	36
Analisi sperimentale e numerica di meta-biomateriali auxetici in stampa 3D per impianti ossei vertebrali 280	36
Modellazione multiscala dell'osso trabecolare: dalla trabecola alla lacuna 307	37
Progettazione di metamateriali fillotassici per prestazioni integrate fluidodinamiche e meccaniche nell'ingegnerizzazione del tessuto osseo 308	38
Alterazioni della rete lacuno-canalicolare ossea compromettono il trasferimento di carico e la risposta poroelastica 337	39
Rimodellamento lacunare nell'osso umano: evidenze 3D su larga scala e implicazioni biomeccaniche in osteoporosi e post-COVID-19 340	40
Dalla microstruttura ossea alla bio-fabbricazione: analisi della rete lacuno-canalicolare per il design di scaffold biomimetici 358	41
Analisi sperimentale di polimeri per la realizzazione di analoghi meccanici del nervo sciatico del ratto 361	42

ANALISI NUMERICA DEL RISCHIO DI FRATTURA NEL SITO DI INSERZIONE DI PIN FEMORALI A SEGUITO DI ARTROPLASTICA TOTALE DEL GINOCCHIO 376	43
Cyclic Compression Test Procedure for an innovative 3D-Printed Vertebral Filling Device 387	44
Vacuum-Driven Artificial Muscles Exploiting Snap-Through Instability for Fast and Efficient Linear Actuation 402	44
Plant-inspired biomimetic multifunctional composites 421	45
Sviluppo di un modello matematico per il calcolo delle frequenze proprie di un banco prova per viti a ricircolo di sfere 243	46
Trade-offs Between Use-Phase Efficiency and Environmental Footprint: Recycled Nd-Magnets in Washing Machines 255	47
LCA case study for an air conditioning system 286	47
A scenario proposal for the collection of Rare Earths Permanent Magnets adopted on modern WEEE 310	48
A Hybrid Modal Superposition Framework for High-Fidelity Reconstruction of Dynamic Structural Response 342	48
Integrazione tra simulazione di processo, LCA e LCC per la valutazione sostenibile di packaging alimentare in plastica e fibre cellulosiche 391	49
Approccio "Proxy-Based LCA" integrato con la metodologia MBSE per la progettazione circolare del prodotto industriale 449	50
Emissioni acustiche per il monitoraggio dell'evoluzione del danno in campioni di materiale composito riciclati. 242	51
Functionally graded adhesive joints fabricated via multi-material additive manufacturing 318	52
Progettazione di recipienti in pressione multistrato realizzati mediante accoppiamento forzato di cilindri coassiali in materiale composito. 287	52
INDAGINE SUI MECCANISMI DI ROTTURA IN COMPOSITI A FIBRA DISCONTINUA OTTENUTI DA SCARTI DI PREIMPREGNATO 306	53
Ottimizzazione di strutture reticolari 3D all'interfaccia di giunzioni ibride metallo-composito SMC per l'aumento della resistenza meccanica. 324	54
Studio di giunzioni ibride avanzate metallo-composito con funzionalità self-sensing 369	55
Modellazione dell'innesco e della propagazione delle delaminazioni nelle strutture in materiale composito mediante un approccio combinato CZM-VCCT 258	56
MODELLO SHEAR-LAG PER LA PREVISIONE DELLA PERDITA DI RIGIDEZZA IN LAMINATI IN COMPOSITO CRICCATI E SOGGETTI A CARICHI GENERICI 279	56
Vernice meccanolominocromica per il rilevamento d'impatti su laminati compositi 371	57

Experimental evaluation of static and fracture behaviour across manufacturing stages of CMC material 381	58
Previsione del comportamento a fatica di giunti incollati in composito, basata sull'identificazione dei parametri tramite test standard indipendenti 393	59
Monitoraggio strutturale di laminati in composito mediante tecniche di machine learning applicate a misure elettriche 394	60
Un software innovativo per prevedere l'evoluzione del danno a fatica e la perdita di rigidità in componenti strutturali in materiale composito. 396	61
ASSESSING THE POTENTIAL OF OPUNTIA FICUS-INDICA SPINES FOR BIODEGRADABLE COMPOSITES 405	61
Analisi sperimentale del comportamento a fatica di un composito polimerico rinforzato con fibre di carbonio continue ottenuto per fabbricazione additiva 410	62
SHM mediante onde ultrasoniche guidate su flaperon in CFRP termoplastico: validazione in condizioni operative 415	63
Characterisation of High-Risk Zone Failure Modes in Self-Healing Composites using Physics-Informed Neural Networks 244	64
Effetto di z-pin sulla resistenza statica di giunzioni composite 433	64
Uncertainty identification related to thermoplastic composite materials under impact loading 254	65
Modellazione del legame costitutivo di compositi ceramico-polimerici soggetti a compressione monoassiale 314	66
Crashworthiness di compositi ibridi con rinforzi tridimensionali: effetto delle architetture through-thickness su delaminazione e assorbimento energetico 439	66
Effetto sinergico di nanoparticelle di TiO ₂ e polidopamina (PDA) sulle proprietà meccaniche dei biocompositi in fibra naturale 446	67
Modellazione agli elementi finiti basata sulla microstruttura di compositi Carbon Forged a fibra corta: risposta meccanica e comportamento piezoresistivo. 447	68
Sustainable Hybrid Composites for Formula Crash-box Design: Experimental and Numerical Analysis 409	69
Effetto dei CNT sul decadimento delle proprietà meccaniche dei biocompositi in fibra naturale in seguito ad invecchiamento termo-igroscopico salino 423	69
Validazione sperimentale di un modello multibody flessibile ridotto del montante di un carrello elevatore per la previsione dei carichi strutturali 349	70
Band Gap Formation in Fractal-Inspired Mechanical Metamaterials: A Study on the Sierpinski carpet Geometry 380	71
Influence of Physical Discontinuities on Eddy Current Effects in Homopolar Permanent-Magnet Arrays for Maglev Applications 426	71
Effetto dello sloshing in un recipiente a pressione per applicazioni nucleari 442	72

Experimental Validation of a Numerical Analysis for Transient Resonance Response of an Integral Bladed Disk 372	73
Vibration Fatigue under Sine-on-Random Loading: A comparative analysis of the predictive capability and application limits of spectral methods 270	73
A finite atomistic J-integral and the limits of continuum fracture mechanics 271	74
Monitoraggio di cricche di fatica mediante la tecnica della caduta di potenziale in corrente continua in configurazione multi-sonda 277	75
Crack Opening Profile method for stress intensity factor estimation in interacting, interface and mixed mode cracks 283	75
Implementation of a combined Quasi-Brittle/Ductile Damage Model for assessing the fatigue life of Combustion Chamber Channels using FEniCSx+MFront. 285	76
Studio dell'influenza della superficie grezza da manifattura additiva sulla stima del limite a fatica di provini in Ti6Al4V prodotti con diversa orientazione 289	77
Fatica torsionale di ghise sferoidali: competizione poro-intaglio e ruolo della tenacizzazione da factory roof 237	77
Applicazione dell'approccio del piano critico efficace per l'analisi a fatica di componenti con intagli acuti 248	79
Approccio non convenzionale della meccanica della frattura per la stima del limite a fatica di provini in materiale metallico indeboliti da intagli sottoposti a carichi multiassiali 259	79
Implementazione del metodo della tensione di picco per la progettazione a fatica di strutture saldate complesse mediante modelli a elementi finiti shell 269	80
Resistenza a fatica multiassiale di giunti dissimili perno-su-flangia saldati ad arco in ghisa GJS500-7 e acciaio S355 secondo il Peak Stress Method 294	81
Analisi delle tensioni all'interfaccia della giunzione osso-stelo in una protesi d'anca 457	81
Monitoraggio strutturale di giunzioni adesive sotto fatica basato sul backface strain 429	82
Legge di danneggiamento per la correlazione tra danno microstrutturale e degrado macroscopico in elettrodi per batterie al litio 437	84
Fatigue and fracture mechanics analysis of dissimilar joints in ship structures via Thermoelasticity 441	84
Considerazioni sulla propagazione della cricca al piede dente di ingranaggi a denti dritti 431	85
Modelli surrogati per l'analisi strutturale di componenti impiantistici per applicazioni nucleari 444	86
Progettazione a fatica di giunzioni incollate tubolari fibra di carbonio-lega di alluminio sottoposte a fatica ad ampiezza costante e variabile 262	87
PREDICTING THE FATIGUE LIFE OF NOTCHED COMPONENTS BY LOCAL STRESS CONCEPT: A CLOSED-FORM MODEL BASED ON RELATIVE STRESS GRADIENT	

299	87
Axial-Torsional Fatigue strength of bonded joints under non-proportional loading 315 . .	88
Tools for the probabilistic fatigue assessment of additively manufactured aerospace components 317	89
Una nuova valutazione del danno per la stima di vita a fatica di giunti saldati in acciaio soggetti a carichi multiassiali ad ampiezza variabile secondo il Peak Stress Method 260	89
Crack Opening Profile method for stress intensity factor estimation in notched and non-linear materials 321	90
Un modello di previsione della vita nel regime VHCF derivato dalla cinetica di impilaggio delle dislocazioni 398	91
Fracture Toughness Assessment of γ -TiAl Alloys: Challenges in Applying ASTM Standards 329	92
Application of DCPD to monitor study fatigue crack growth of internal and surface cracks in additively manufactured Scalmalloy® 343	92
In-Service Structural Health Monitoring in Presenza di Sotto-campionamenti o Misure Parziali per Valutazioni del Danneggiamento a Fatica 351	93
A SED-Based Mode-Dependent Limit Notch Radius for Multiaxial (I+III) Fatigue of Notched Components and its Effective Stress Formulation 388	94
A physics-guided neural network for predicting mode-I stress intensity factors in edge-cracked plates 408	94
Linear Viscoelastic Fracture Mechanics: energetic theory, FE simulations and experiments 411	95
Sicurezza per assi soggetti a caduta gravitazionale: dai requisiti normativi alla progettazione effettiva della sicurezza 450	96
Numerical Evaluation of Curving Resistance in Freight Wagons Equipped with Y25 Bogies 298	96
Direct Reconstruction of Thermal Hotspots in Tread Braking Using Explicit Finite Difference Method 304	98
Development of a railway component made by PBF-LB manufacturing 313	99
Prove d'urto e validazione del progetto di un paraurti assorbitore di energia 325	99
Thermal Analysis of Tread Braking Using Scaled TwinDisc Testing and Experimentally Validated Numerical Models 296	100
Ottimizzazione dei treni merci: approccio combinatorio e statistico secondo la UIC IRS 40421 401	102
Svii in deposito: analisi fenomenologica e progettazione di una "guard rail" 327	103
Leonardo: la sfida dell'innovazione e il valore delle competenze 456	103

When Materials Science and Rocket Science Unite: Rethinking Manufacturing Paradigms for Sustainability Through Cold Spray Additive Manufacturing 455	104
L'ingegnere meccanico: guida strategica per l'evoluzione resiliente nell'era dell'Intelligenza Artificiale 459	104
Plasmare il futuro del volo: prospettive e sfide per l'analisi strutturale e la caratterizzazione dei materiali in Avio Aero 458	104
Caratterizzazione di reti a maglia tramite modelli iperelastici anisotropi 240	104
Recent Advances in Ultra-High Vacuum Shape Memory Alloy Connectors for Particle Accelerators 416	105
Coupled mechanical–diffusion models to understand the role of shot peening in mitigating hydrogen embrittlement 293	106
Approccio semplificato per l'identificazione della legge di incrudimento post-necking di materiali anisotropi a diverse temperature 316	107
Thickness Sensitivity Analysis of Nakazima Forming Limit Curves in Aluminum Alloys 328	107
Un modello energetico per descrivere le tensioni di creep all'apice di solidi intagliati 334 .	108
Campi di tensione in prossimità di intagli in condizioni di creep 336	108
Effetti tridimensionali nell'identificazione della legge coesiva in modo I da prove DCB 352	109
Danno da impatto in leghe leggere: analisi FEM e prove sperimentali 354	109
Investigation of the damage sensing abilities of additively manufactured conductive polymer composites 357	110
Sul comportamento meccanico di strutture cellulari ad architettura esagonale 264	110
Analisi Metodologica su Modellazione e Caratterizzazione Sperimentale di Materiali a Simmetria Ortotropa Cubica mediante Crystal Plasticity 427	111
Caratterizzazione sperimentale e modello parametrico per la valutazione dell'attrito tra fili sottili 241	112
Analisi sperimentale delle proprietà meccaniche in magneti legati a base di FeCoPSi 261 .	112
Valutazione Multi-modale delle Tensioni Residue Indotte da Cold Spray Additive Manufacturing in Provini Multi-materiale Cu-Al ₂ O ₃ 311	113
Validazione sperimentale di un modello costitutivo a sub-loop per fili sottili in NiTi destinati a strumentazione astronomica di precisione. 366	114
Studio numerico-sperimentale del riscaldamento laser localizzato di lamiere in Ti-6Al-4V per il controllo dello stato tensionale residuo 367	115
Validazione della misura delle tensioni residue, su campioni di alluminio pallinato, ottenuta con il metodo del foro in combinazione con la tecnica DIC e regolarizzazione L-curve 377	115

Metodi termografici rapidi di analisi del comportamento a fatica di provini in AISI 316L prodotti mediante processo L-PBF: i risultati del progetto MADFORLIFE. 288	117
Analisi tramite infrarosso termico della temperatura limite in prove di fatica: dalla proposta del 1986 agli approcci energetici avanzati 330	118
Stima della vita a fatica di provini in PA12 ottenuti per Fused Deposition Modeling: un confronto tra diversi approcci energetici 355	118
Confronto tra tecniche lock-in e self-referenced nell'analisi della fase del segnale termoe-lastico in prove di fatica 360	119
Pulsed Thermography for Quality Control of Internal Channels in Metal Additive Manufactured Fuel Cell Bipolar Plates 379	120
Mappatura e caratterizzazione vibrotermografica di difetti ingegnerizzati in pannelli compositi termoplastici in CFRP/LM-PAEK 390	120
Termografia a effetto Joule per il controllo di materiali compositi innovativi: un ponte tra SHM e NDT per la caratterizzazione del danneggiamento da impatto 397	121
Verso una valutazione non distruttiva delle proprietà meccaniche di Ti6Al4V-ELI poroso mediante misure di diffusività termica 445	122
Modellazione micromeccanica dello snervamento di una ghisa sferoidale EN-GJS-600-3 in condizioni di carico multiassiale 257	123
Numerical Assessment of OFHC Cu Creep in the Demonstration Fusion Power Reactor (DEMO) Divertor Monoblock 278	124
Rate-Dependent Spherical and Conical Indentation of soft materials with application to biomechanics 281	125
Modello di adesione reversibile per materiali viscoelastici 284	126
Modellazione viscoplastica per materiali in alta temperatura in condizione di test di tipo termo-meccanico e service-like 292	126
Investigation of the mechanical behaviour of additively manufactured lattice structures using Smart Design algorithms 300	127
Valutazione numerica dei carichi di sloshing in un serbatoio criogenico per LH ₂ mediante approccio FEM-SPH 413	127
Structural Integrity Assessment of Flexible Aerospace Baffles Comparing Quasi-Static and 2-Way FSI Methods 414	128
Modellazione equivalente di flessibili metallici multistrato mediante omogeneizzazione numerica 417	129
An entropy-driven approach to thermo-mechanical degradation in metallic structures 419	129
GNSS: A Graph Neural Network Surrogate for Guided Wave Propagation in Beams 425 .	130
Semi-Analytical Modelling of Non-Conformal Fretting Contacts Using an Elastic Half-Plane Approach 451	131

Sviluppo di un framework per prevedere e ottimizzare la riparazione di difetti mediante Cold Spray 303	131
An Integrated Multiphysical Framework for the Design, Optimization and Experimental Assessment of Aerospace Metamaterials 368	132
Sviluppo di metodi per la manutenzione predittiva di polverizzatori agricoli trainati soggetti a carichi in esercizio 331	132
An Iterative Meshless Method for 2D Contact Problems Based on Radial Basis Functions 370	133
A study on the effects of the Quantum Computer measurement errors on the Quantum Finite Element Algorithm performance 373	133
Electrostatic Particle Acceleration via LINAC: Enabling Next-Generation Solid-State Material Deposition 338	134
Modello analitico per la valutazione degli effetti flessionali locali in gusci conici composti flangiati 344	135
Experimental and Numerical Evaluation of Magnetorheological Fluid-Actuated Metamaterials 375	135
Metamaterial-Based Passive Noise Control for the Piaggio P.180 Cabin 407	136
Applicazione di modelli costitutivi per analisi termomeccaniche viscoplastiche a componenti di turbine a vapore 350	138
Non-linear frictional contact mechanics of visco-hyperelastic materials 412	139
Numerical and Experimental Deformation Analysis of an EPP Component Subjected to Mechanical Loads and Temperature Gradients 353	139
Buckling strength analysis for the construction phase of oil storage tanks 239	140
Resonant test bench with controlled support position at a variable flexural nodal point during block loading fatigue testing of drillpipes 246	140
Controllo termico passivo avanzato per piattaforme in LEO mediante strutture sandwich in additive manufacturing con materiali a cambiamento di fase (PCM) 249	142
Ripristino dei denti di ingranaggi tramite manifattura additiva: fattibilità e prestazioni del Directed Energy Deposition 251	143
Ingegneria inversa dello Scorpione: dalle fonti storiche alla validazione prestazionale mediante FEM 266	143
Sviluppo di un banco prova per la valutazione delle prestazioni di un dispositivo meccanico per la generazione di energia da moto ondoso 291	144
Microturbina a idrogeno: progettazione preliminare dinamica e termo-strutturale 305	145
A Transfer Learning and Domain Adaptation Framework for Imbalance Localization in Rotating Shafts 309	146

FEM-based verification and structural optimization of an aircraft cargo loading platform 319	146
Ideazione e progettazione di un palo telescopico per turbine eoliche –Progetto PERIMA 2 322	147
Progettazione di un sistema sperimentale per il monitoraggio in tempo reale della frattura dello smalto in serbatoi soggetti a cicli di pressione ad alto numero di cicli 335	148
A Design-Oriented Analytical Framework for Tension-Wound Orthotropic Cylindrical Assemblies 341	148
Sviluppo di un sistema di motorizzazione elettrica per carrozzine 347	149
Progettazione di metapiastre per il controllo della risposta post-buckling in strutture adattive 362	150
Multiphysics Optimization of an Aircraft Winglet via CFD–FEM Coupling and Radial Basis Function Mesh Morphing 406	150
Prove di flessione a fondo dente di ingranaggi per applicazioni elicotteristiche 418	151
Caratterizzazione meccanica di giunti ibridi ottenuti mediante giunzione termica diretta (thermal direct joining) 430	152
Optimization of density distribution in protective foams for motorcycle helmets 345 . . .	153
Valutazione dell'influenza dello strain rate sulla risposta plastica anisotropa della lamiera d'alluminio 6016-T4 348	154
Caratterizzazione visco-plastica e del danneggiamento duttile strain-rate dependent nella zona termicamente alterata (HAZ) di leghe AA6005-T6 mediante DIC e identificazione FEM inversa 359	155
Descriptor-Based Inverse Design of Periodic Truss Lattices under Impact Loading 365 . .	155
Hardening Curves of Polycarbonate at Quasistatic-to-High Strain Rates 386	156
Numerical investigation of the influence of impact angle on the protective effectiveness of advanced ballistic protections with bulging effect 404	157
On the applicability of nonlinear inverse FEM for shape sensing of plates under blast loading 250	157
On the Numerical Modelling of Blast Loading: Accuracy and Modelling Choices 253 . . .	158
High strain rate constitutive and fracture characterization of AA6065-T6 sheet under various stress states 268	158
Experimental and Finite Element Investigation of Glass-Fiber Composite Plates under Shock Loading 275	159
Modellazione e sperimentazione di esplosioni subacquee: sviluppo di un banco prova in scala ridotta 302	159
Analisi degli effetti della velocità di deformazione sul comportamento di una ghisa sferoidale in diverse condizioni di carico 333	160

Influence of Controlled Disorder on the Crushing Performance of Hexagonal Lattice Meta-materials 420	161
Influenza della temperatura sui meccanismi di innesco del danno duttile in condizioni di impatto 424	161
Experimental Investigation of the shock response of energetic materials simulants 443 . .	162
Sviluppo e Caratterizzazione Sperimentale ad Impatto di Tessuti Gommati Funzionalizzati con Fibre Ibride per Serbatoi Flessibili Aeronautici 453	163

Additive Manufacturing / 245

Ottimizzazione Topologica assistita da Machine Learning di Compositi in Fibra di Carbonio prodotti tramite Additive Manufacturing

Author: Alessio Centola¹

Co-authors: Carlo Boursier Niutta ; Alberto Ciampaglia ¹; Davide S. Paolino ²; Andrea Tridello ¹

¹ Politecnico di Torino

² Politecnico di Torino - DIMEAS

Corresponding Authors: carlo.boursier@polito.it, davide.paolino@polito.it, andrea.tridello@polito.it, alberto.ciampaglia@polito.it, alessio.centola@polito.it

Il lavoro presenta un metodo per l'ottimizzazione topologica (TO) di compositi rinforzati in fibra di carbonio (CF) prodotti con Additive Manufacturing (AM). Il metodo si basa su algoritmi di machine learning (ML) surrogati allenati su dati sperimentali e numerici. Il materiale è prodotto utilizzando una stampante Markforged Mark Two che consente la stampa di componenti in PA6 rinforzati con CF corta al 12% (Onyx) e CF lunga immersa in PA6. La caratterizzazione del materiale è stata condotta su provini di trazione con diverse sequenze di laminazione alternando CF lunga ad Onyx.

Successivamente, le proprietà ottenute sono state utilizzate per simulare ulteriori prove di trazione con diverse configurazioni di wall layer (WL) e stacking sequence (SS) utilizzando un modello numerico agli elementi finiti. I risultati sperimentali e numerici sono stati raccolti in un database contenente le principali proprietà statiche quali modulo di Young, tensione e deformazione a rottura. Il database è stato in seguito impiegato per addestrare una rete neurale (NN) che surroga il modello numerico e consente di prevedere le proprietà statiche del materiale per arbitrarie combinazioni di SS e WL. L'accuratezza ed affidabilità del modello surrogato è stata validata sperimentalmente.

Il modello surrogato è stato quindi implementato in un algoritmo di TO per definire la disposizione ottimale del rinforzo in CF lunga all'interno di un componente minimizzando la massa totale. Il metodo permette di progettare componenti ottimizzati e alleggeriti, in grado di reggere ai carichi imposti, limitando le campagne sperimentali e accelerando la fase di prototipazione intermedia.

Additive Manufacturing / 247

Structural Smart Fabrics: un nuovo concetto di strutture con rigidità dipendente dalla temperatura

Authors: Luca Michele Martulli¹; Luca Mariotti¹; Marco Rossoni¹; Paolo Parenti^{None}; Luca Patriarca^{None}

¹ Politecnico di Milano

Corresponding Authors: marco.rossoni@polimi.it, luca.mariotti@polimi.it, paolo.parenti@polimi.it, lucamichele.martulli@polimi.it, luca.patriarca@polimi.it

Le strutture impiegate nelle applicazioni spaziali devono spesso soddisfare requisiti di piegabilità e dispiegamento. Tali requisiti sono stati tradizionalmente affrontati adottando soluzioni costruttive come componenti modulari o gonfiabili. Un'alternativa a questi approcci è rappresentata dall'uso di strutture realizzate con materiali adattivi intelligenti. Affinché ciò sia possibile, il materiale adattivo considerato deve essere in grado di assumere due diverse configurazioni: una a bassa rigidità, per consentire la piegabilità, e una ad alta rigidità, per garantire il dispiegamento e la successiva funzionalità in esercizio.

In questo lavoro proponiamo un nuovo concetto di struttura adattiva denominato Structural Smart Fabric (SSF). Gli SSF sono strutture formate da una maglia di elementi interconnessi (celle) e dotate di fili in lega a memoria di forma (SMA). La capacità di memoria di forma rende gli SSF sensibili alla

temperatura. Quando la SMA si trova a una temperatura inferiore alla sua temperatura di trasformazione, le celle risultano libere e il tessuto presenta una rigidità prossima allo zero: questo stato è definito “stato inattivo” dell'SSF. Al di sopra della temperatura di transizione della SMA, il dispositivo SMA comprime le celle tra loro, causando un improvviso aumento della rigidità. Questo è definito “stato attivo” dell'SSF.

Per validare questo concetto, è stato considerato un SSF realizzato con una maglia polimerica stampata in 3D e dotata di un filo SMA. La SMA utilizzata era una NiTiNol commerciale, con un intervallo di temperatura di trasformazione compreso tra 60 °C e 70 °C. Tali SSF sono stati inizialmente simulati mediante modelli agli elementi finiti. Le simulazioni hanno consentito una comprensione più approfondita del principio di funzionamento del concetto proposto e sono state utilizzate per progettare prototipi reali. Sono stati quindi realizzati quattro prototipi e testati in flessione a tre punti. In primo luogo, sono stati condotti test di riferimento a temperatura ambiente, che hanno evidenziato la prevista rigidità flessionale prossima allo zero dei prototipi. Successivamente, sono stati effettuati test ad alte temperature (80 °C, 90 °C e 100 °C), che hanno mostrato un aumento progressivo della rigidità flessionale all'aumentare della temperatura. I test hanno quindi dimostrato non solo il doppio stato degli SSF (attivo e inattivo), ma anche che lo stato attivo è caratterizzato da una rigidità dipendente dalla temperatura.

Come accennato, il concetto di SSF proposto è stato validato utilizzando uno specifico processo produttivo e materiale per la maglia, insieme a un filo SMA commerciale. Tuttavia, possono essere considerate diverse configurazioni di SSF. Per valutare tali possibilità, sono state eseguite simulazioni FE considerando una maglia metallica. I risultati hanno mostrato un aumento di rigidità più precoce e più marcato rispetto alla soluzione polimerica, grazie a un modulo di massa più elevato. Inoltre, è possibile utilizzare diverse SMA per i fili al fine di variare l'intervallo di temperatura di transizione e quindi le temperature degli stati attivo e inattivo. Infine, in questo lavoro le variazioni di temperatura degli SSF sono state ottenute mediante una camera riscaldata; si può anche considerare il riscaldamento elettrico per un maggiore controllo dell'attivazione degli SSF.

Il concetto di SSF proposto è stato quindi validato su scala di laboratorio. Sebbene non sia ancora stata individuata un'applicazione specifica, le loro capacità di doppia rigidità rendono gli SSF ottimi candidati per applicazioni spaziali: nello stato inattivo, un componente SSF può essere piegato per essere trasportato nei razzi; una volta nell'ambiente operativo (spazio o anche su un altro pianeta), il componente può essere attivato per dispiegarsi nella sua forma finale. In particolare, studi applicativi mirati stanno considerando strutture come scudi termici e ruote per rover, al fine di sfruttare le proprietà dipendenti dalla temperatura degli SSF.

Additive Manufacturing / 252

Previsione e progettazione della forma di depositi di Cold Spray Additive Manufacturing tramite Physics-Informed Neural Networks

Author: Roberta Falco¹

Co-author: Sara Bagherifard¹

¹ *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: roberta.falco@polimi.it, sara.bagherifard@polimi.it

Il Cold Spray è una tecnica di spruzzatura termica che consente la produzione di componenti di svariati materiali metallici di grandi dimensioni con limitati effetti termici ed elevato tasso di deposizione. Questi vantaggi rendono il Cold Spray adatto a molteplici applicazioni, tra cui rivestimenti, riparazioni e manifattura additiva. Quest'ultima applicazione è ad oggi ostacolata dal limitato controllo geometrico garantito dalla tecnologia. La possibilità di prevedere la forma dei depositi prima della spruzzatura permetterebbe di ottimizzare le traiettorie utensile al fine di ottenere la massima accuratezza dimensionale possibile, con minimo spreco di materiale dettato da trial sperimentali. Per raggiungere questo obiettivo, il presente lavoro sfrutta la già consolidata conoscenza fisica del processo di Cold Spray per addestrare un Physics-Informed Neural Network (PINN). Questa innovativa rete neurale viene calibrata tramite pochi dati sperimentali e consente di prevedere il risultato di qualsiasi traiettoria utensile, a diverse velocità ed angoli di impatto delle particelle spruzzate. Il PINN lavora congiuntamente ad un Convolutional Neural Network (CNN), che permette di aggiornare efficientemente gli angoli di impatto durante la deposizione di materiale. Le capacità predittive del modello sono state validate sperimentalmente su demonstrator in rame, mostrando elevata accuratezza

predittiva ed efficienza computazionale. L'utilizzo di questo framework di previsione consente il controllo avanzato del processo di Cold Spray nella realizzazione di geometrie complesse.

Additive Manufacturing / 263

Machine Learning-assisted Detection and Extreme Value Characterization of Critical Defects in PBF-LB parts via XCT

Author: Daniel Perghem¹

Co-authors: Behnam Salehnasab²; Nima Shamsaei²; Shuai Shao²; Stefano Beretta³

¹ Politecnico di Milano

² National Center for Additive Manufacturing Excellence (NCAME), Auburn University, Auburn, AL, 36849, USA

³ Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering, via La Masa 1, 20156 Milano, Italy

Corresponding Author: daniel.perghem@polimi.it

Volumetric defects in laser powder bed fused (PBF-LB) parts can critically affect their fatigue performance. X-ray micro-computed tomography (XCT) is widely used for the inspection of additively manufactured parts, enabling non-destructive evaluation-informed assessment of components. It is particularly suited for detecting volumetric defects, whose largest occurrences can be described through an extreme value distribution for probabilistic assessment.

Although XCT enables volumetric defect detection, its effectiveness is limited not only by physical resolution but also by data post-processing, particularly image segmentation. These limitations lead to defect underestimation, non-detection, and resolution-induced fragmentation of complex morphologies such as lack-of-fusion defects, ultimately compromising defect-based fatigue assessment. To address these challenges, this study evaluates the influence of different segmentation methods (Otsu, Triangle, and U-Net) on defect detectability and sizing accuracy through probability of detection (PoD) and sizing error analyses across XCT scans with varying voxel sizes. A machine learning framework is employed to identify interactions among fragmented defects, coupled with a 3D convex hull approach to reconstruct physically meaningful defect sizes. The results show that Otsu often underestimates defect size and misses critical defects at larger voxel sizes, whereas Triangle and U-Net, especially when combined with ML-based interaction, significantly improve PoD and reduce sizing errors.

The analysis is then extended beyond detection to quantify the impact of characterization uncertainty on defect populations. PoD and sizing error are systematically integrated into extreme value statistics (EVS), including block maxima and peak-over-threshold approaches, to evaluate how detection limitations affect defect size distributions. The results demonstrate that conventional threshold-based segmentation can lead to significant underestimation of defect distributions at coarse resolutions, whereas ML-enhanced approaches improve defect representation and reduce false negatives. By integrating non-destructive evaluation, machine learning, and statistical modelling, this work establishes a robust pathway toward defect-informed and reliability-driven design of PBF-LB components, supporting their safe adoption in critical engineering applications.

Additive Manufacturing / 267

Self-sensing architected materials

Authors: Mattia Utzeri¹; Hülya Cebeci^{None}; Shanmugam Kumar^{None}; Marco Sasso¹

¹ Università Politecnica delle Marche

Corresponding Authors: m.utzeri@univpm.it, m.sasso@univpm.it

Integrating self-sensing materials into future applications necessitates developing advanced multi-scale multiphysics predictive models. This study introduces an experimentally informed predictive

framework for autonomous sensing architected materials, combining theoretical and computational methodologies. By incorporating stress-dependent electrical resistivity through anisotropic piezoresistive constitutive effects, alongside considering material, geometric, and contact nonlinearities, the proposed multiscale model captures the architecture-dependent piezoresistive responses of lattice composites produced via additive manufacturing of polyetherimide (PEI)/carbon nanotube (CNT) nanoengineered feedstock. The PEI/CNT composite exhibits exceptional strength (105 MPa), stiffness (3368 MPa), and strain sensitivity (gauge factor ≈ 13), translating into remarkable piezoresistive characteristics for the PEI/CNT lattice composites (gauge factor ≈ 3 to 11). This multiscale finite element model predicts both macroscopic piezoresistive responses and the influence of architectural and topological variations on electric current paths, validated via infrared thermography analysis. Additionally, an Ashby chart for the gauge factor of PEI/CNT lattice composites suggests their prediction through a scaling law similar to mechanical properties, underscoring the tunable strain and damage sensitivity of these materials. The combined experimental, theoretical, and numerical findings offer critical insights into optimising piezoresistive composites through architected design, with profound implications for smart orthopedics, structural health monitoring, sensors, batteries, and other multifunctional applications.

Additive Manufacturing / 265

Comportamento a fatica e a frattura del composito a matrice metallica Al2618–TiB₂ prodotto mediante PBF-LB

Author: Luca Patriarca¹

Co-authors: Giorgia Lupi¹; Luca Mariotti¹; Riccardo Casati¹; Stefano Beretta¹

¹ Politecnico di Milano

Corresponding Authors: stefano.beretta@polimi.it, riccardo.casati@polimi.it, giorgia1.lupi@polimi.it, luca.mariotti@polimi.it, luca.patriarca@polimi.it

I compositi a matrice metallica (MMCs) stanno emergendo come materiali promettenti per applicazioni strutturali grazie alla loro elevata rigidità specifica unita a interessanti prestazioni meccaniche. In particolare, i MMC con matrice a base di leghe di alluminio rinforzati con particelle ceramiche offrono un notevole potenziale per applicazioni critiche in ambito aerospaziale in cui la riduzione del peso e l'efficienza strutturale sono fattori chiave. L'introduzione di nuove tecniche manifatturiere, come il processo laser a letto di polvere (PBF-LB), consentono la realizzazione di geometrie complesse rendendo attraente la combinazione di questi materiali e processi innovativi. Tuttavia, permangono sfide legate al controllo dei difetti e alle prestazioni a fatica meccanica.

Questa presentazione fornisce una panoramica del comportamento statico e a fatica di una lega Al2618 prodotta mediante PBF-LB e rinforzata con il 7,1% in frazione di peso mediante un innovativo approccio in due fasi combinando tecniche di rinforzo in-situ ed ex-situ, al fine di ottenere una dispersione omogenea delle particelle ceramiche nel materiale di partenza. Il materiale è stato successivamente sottoposto a una caratterizzazione meccanica completa, comprendente prove di trazione, tenacità a frattura, propagazione della cricca a fatica, e fatica ad alto numero di cicli.

I risultati dimostrano un significativo incremento del modulo elastico (+13% rispetto alla lega base raggiungendo circa 85 GPa), pur mantenendo al contempo una buona tenacità a frattura nonostante l'elevato contenuto ceramico. Il comportamento meccanico per carichi dinamici è stato modellato con un approccio basato su concetti di *damage tolerance*; tale approccio ha consentito previsioni accurate della vita a livello di provino, a condizione che le tensioni residue siano adeguatamente introdotte nella modellazione. In questo contesto, sono state altresì eseguite analisi di tomografia computerizzata a raggi X sui provini a fatica che hanno permesso di caratterizzare la posizione e la tipologia dei difetti indotti dal processo. Questa analisi ha evidenziato il ruolo delle popolazioni di difetti nel governare il comportamento a fatica di questo materiale.

Per dimostrare ulteriormente l'applicabilità del modello di previsione della vita proposto è stato realizzato un componente in scala reale. Il componente è stato sottoposto a prove di fatica e la propagazione della frattura è stata monitorata mediante una combinazione di misure di caduta di

potenziale in corrente continua, misure di cedevolezza e correlazione digitale delle immagini, fornendo una valutazione sperimentale completa dell'evoluzione del danno.

I risultati sperimentali sul componente in scala reale hanno mostrato un buon accordo con le previsioni di vita a fatica ottenute dal modello di materiale calibrato, confermando la trasferibilità della caratterizzazione a livello di provino alle applicazioni strutturali. Questa validazione dimostra l'efficacia di un approccio basato sulla tolleranza al danno per la progettazione e qualificazione di componenti MMC realizzati mediante manifattura additiva per applicazioni spaziali.

Additive Manufacturing / 272

Sviluppo di una tecnica ibrida di manifattura additiva di grande formato per la metallizzazione di compositi a matrice polimerica

Authors: Ali Davari¹; Daniele Vanerio¹; MARIO GUAGLIANO²; Magesh Kumaravel¹; Sara Bagherifard¹

¹ *Politecnico di Milano*

² *POLITECNICO MILANO*

Corresponding Authors: sara.bagherifard@polimi.it, danielle.vanerio@polimi.it, mario.guagliano@aiaasnet.it

Tra le tecnologie di Additive Manufacturing (AM), il Large Format Additive Manufacturing (LFAM) ha registrato una crescita significativa negli ultimi anni. All'interno di questa categoria, nel campo dei materiali compositi polimerici fibrorinforzati, la tecnologia Fused Granulate Fabrication (FGF) si è affermata come la più diffusa. Essa impiega estrusori a vite montati su sistemi gantry o manipolatori robotici. L'utilizzo di materiale granulare come feedstock consente la produzione di componenti di grandi dimensioni e geometrie complesse, con costi ridotti e elevati tassi di deposizione.

Tuttavia, i materiali polimerici presentano limitazioni in termini di proprietà funzionali tipicamente associate ai metalli, quali conducibilità elettrica, riflettività e resistenza all'usura. Per superare tali limiti, il presente lavoro propone l'integrazione della FGF con il Cold Spray (CS), un processo di deposizione allo stato solido in cui polveri metalliche vengono accelerate a velocità supersoniche per formare rivestimenti. Questo approccio consente la deposizione di materiali dissimili minimizzando il carico termico sul substrato polimerico, evitando così fenomeni di degradazione.

Dal punto di vista sperimentale, sono state impiegate due celle robotiche equipaggiate rispettivamente con sistemi FGF e CS per la produzione dei campioni. In uno scenario industriale futuro, tali processi potrebbero essere integrati in un'unica cella dotata di end-effector intercambiabili. I materiali investigati includono polietereimmide (PEI) rinforzata con fibra di carbonio (CF) come substrato polimerico ad alte prestazioni, caratterizzato da favorevoli proprietà termiche, e alluminio e rame come materiali di rivestimento.

I risultati preliminari dimostrano la fattibilità della deposizione di coating metallici senza danneggiamenti significativi del substrato. Le attività in corso sono focalizzate sull'ottimizzazione del processo e sulla caratterizzazione dei campioni prodotti, al fine di valutarne le proprietà funzionali.

Questo studio pone le basi per lo sviluppo industriale di un processo ibrido che combina i vantaggi dei substrati polimerici, quali leggerezza ed efficienza economica, con le possibilità di funzionalizzazione offerte dai rivestimenti metallici, abilitando applicazioni avanzate attraverso l'integrazione sinergica di queste tecnologie.

Additive Manufacturing / 273

Applicazione del Metodo della Tensione di Picco alla progettazione a fatica di giunti dissimili tra piastre in AISI 316L prodotte con manifattura additiva e laminate

Author: LUCREZIA CONTIERO¹

Co-authors: Luca Vecchiato²; Alberto Campagnolo³; Vittorio Babini⁴; Giovanni Meneghetti⁵

¹ *Department of Industrial Engineering, University of Padova*

² *Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale*

³ *Università di Padova*

⁴ *Antonio Zamperla S.p.a., Via Monte Grappa 15/17, 36007, Altavilla Vicentina, Italia*

⁵ *UNiversità di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale*

Corresponding Authors: lucrezia.contiero@studenti.unipd.it, giovanni.meneghetti@unipd.it, alberto.campagnolo@unipd.it, luca.vecchiato@unipd.it

La produzione additiva (AM) metallica e, in particolare, il processo Laser Powder Bed Fusion (L-PBF), consentono la realizzazione di componenti ad elevata complessità geometrica, ma risultano tuttora penalizzati dal limitato volume di costruzione dei sistemi disponibili. In questo contesto, l'integrazione mediante saldatura ad arco di parti prodotte in AM e di parti ottenute con processi convenzionali rappresenta una soluzione ai vincoli dimensionali del processo AM. Nonostante il crescente interesse industriale, il comportamento a fatica dei giunti contenenti parti AM è ancora poco documentato. Per affrontare questo problema, il presente lavoro indaga il comportamento a fatica dei seguenti giunti dissimili saldati ad arco: testa-testa a piena penetrazione, a doppio irrigidimento trasversale e a croce, ottenuti da piastre in acciaio inossidabile AISI 316L prodotte con manifattura additiva (AM) e laminate (WR, dall'inglese wrought). In questo contesto, il termine "dissimile" si riferisce specificamente alle distinte microstrutture dei due materiali uniti. Prima di eseguire le prove a fatica, è stata valutata la morfologia dei materiali post-saldatura mediante analisi metallografiche, sono stati misurati i profili di micro-durezza e, infine, sono stati misurati i profili delle tensioni residue mediante la tecnica della diffrazione a raggi X. I giunti sono stati poi testati in condizioni as-welded sotto carico puramente assiale a $R = 0.05$, considerando sia configurazioni simili (WR/WR) che dissimili (AM/WR). A fini comparativi, sono stati inoltre raccolti i risultati sperimentali a fatica disponibili in letteratura per giunti in AISI 316L saldati ad arco simili (WR/WR, AM/AM) e dissimili (AM/WR). Le superfici di frattura sono state analizzate per individuare le posizioni di innesco delle cricche di fatica. Infine, i risultati sperimentali sono stati rianalizzati secondo l'approccio in tensione nominale e secondo il Metodo della Tensione di Picco (Peak Stress Method, PSM).

Additive Manufacturing / 274

Fatigue Performance of Hybrid Surface-Based Additively Manufactured Lattice Structures

Author: Mattia Mele¹

Co-authors: Dario Croccolo²; Massimiliano De Agostinis¹; Stefano Fini¹; Giorgio Olmi³; Gianluca Di Egidio¹; Alessandro Morri¹; Riccardo Nobile⁴; Paola Leo⁵; Annalisa Pola⁶; Marialaura Tocci⁶; Sergio Sartori⁷

¹ *University of Bologna*

² *DIN - Dipartimento di Ingegneria Industriale*

³ *Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN), Università di Bologna*

⁴ *Università del Salento*

⁵ *University of Salento*

⁶ *Univesity of Brescia*

⁷ *Leonardo SpA*

Corresponding Authors: alessandro.morri4@unibo.it, gianluca.diegidio2@unibo.it, marialaura.tocci@unibs.it, sergio.sartori@leonardo.com, paola.leo@unisalento.it, annalisa.pola@unibs.it, dario.crocicolo@unibo.it, giorgio.olmi@unibo.it, riccardo.nobile@unisalento.it, mattia.mele@unibo.it, stefano.fini@unibo.it, m.deagostinis@unibo.it

Lattice structures represent one of the most promising and innovative design approaches enabled by Additive Manufacturing (AM). In particular, extensive research has demonstrated the unique advantages of surface-based unit cells derived from Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS) in mechanical applications. Although a substantial body of literature has investigated the elastic properties and

energy absorption capabilities of these structures, their fatigue performance remains largely unexplored, thereby limiting their application in critical sectors such as automotive and aerospace.

This work presents the results of the FLIGHT project (Fatigue of Lattices Improved by Generating Hybrid Topologies), carried out within the framework of MOST (National Centre for Sustainable Mobility). The aim of the project was to investigate the fatigue performance of innovative lattice cells obtained through the hybridization of classical TPMS structures.

A comprehensive geometrical study was first conducted to analyze the morphological features of these structures. This analysis, combined with the manufacturability constraints of the chosen technology, enabled the definition of the fundamental cell dimensions. The specimens were fabricated in AlSi10Mg using Laser Powder Bed Fusion (LPBF). Different heat treatments were evaluated to identify the optimal balance between microstructure and residual stresses. In particular, 3D scanning was employed to quantify distortions induced by post-processing.

To perform tensile fatigue tests under a stress ratio of $R = 0.1$, a dedicated specimen geometry was designed to ensure failure within the gauge region. This design was validated through both Finite Element Analysis (FEA) and preliminary tensile tests on brittle resin specimens. The final specimens were then produced in AlSi10Mg and inspected using micro-Computed Tomography (μ CT) to assess manufacturing quality. Additionally, microhardness measurements were carried out to evaluate the influence of thermal gradients along the specimen axis.

Nine different lattice topologies were experimentally tested under both static and cyclic loading conditions. Fatigue tests were conducted on hydraulic testing machines at a frequency of 32 Hz, with runout defined at 10^7 cycles.

The results indicate that the fatigue limit of the investigated structures ranges between 16% and 24% of the static Ultimate Tensile Strength (UTS). Notably, the fatigue data exhibit a remarkable linearity in the double-logarithmic Wöhler (S–N) diagram. This high level of predictability can be attributed to the intrinsic topology of the structures, which appears to retard crack propagation and promote multiple crack paths prior to final failure. This hypothesis is further supported by microstructural analyses of the fracture surfaces performed using Field Emission Gun Scanning Electron Microscopy (FEG-SEM).

Additive Manufacturing / 290

Neutron tomography and neutron diffraction characterization of junction properties in CoCrMo and SS 316L PBF-LB functionally graded materials

Authors: Sabina Luisa Campanelli¹; Simone Carone¹; Katia Casavola¹; Vito Errico¹; Anna Fedrigo²; Giovanni Pappalettera¹; Thilo Pirling²

¹ Politecnico di Bari

² Institut Max von Laue –Paul Langevin (ILL)

Corresponding Author: simone.carone@poliba.it

Additive manufacturing (AM) offers distinct benefits over conventional manufacturing methods, most notably in design flexibility and material utilization. Complex geometries and internal features can be realized with AM that would be infeasible to produce by subtractive techniques, giving engineers unprecedented design freedom. A further key advantage is the ability to integrate multiple materials into a single component, combining different material properties in ways traditional processes cannot.

In this framework, the objective of this study is to investigate the junction properties, by utilizing advanced neutron techniques, of functionally graded materials (FGM) made of CoCrMo and SS 316L realized by Powder Bed Fusion –Laser Beam (PBF-LB).

The FGM samples were manufactured by utilizing powder separators and therefore mixing in-operando the two different powders. In this way, multi-material components possess a variation in composition of the materials within the same building layer and not between different layers. This can be advantageous for many reasons since it is well-known that properties of AM parts heavily depend on their orientation with respect to building direction. In this work, neutron diffraction was employed to measure residual lattice strains across the materials transitions. Furthermore, in contrast to standard X-ray tomography, by leveraging the high disparity in the neutron attenuation coefficients between Co and Fe, which are the primary constituents of CoCrMo alloy and stainless steel

316L, neutron tomography served the purpose of not only characterizing defects and porosities, but also the effective location of the two dissimilar materials thus highlighting the internal morphology of the interface regions.

Diffraction results showed a peak shift indicating proper designed spatial variation in materials composition. Residual strain measurement revealed compression in pure materials, and a variation compression-tension-compression in the interface zone. Neutron tomography highlighted a peculiar interlocking layered morphology in the transition regions.

The integration of neutron diffraction and neutron tomography was instrumental in achieving a comprehensive, non-destructive characterization of strain evolution and internal mixing morphology in FGM components. In particular, both the residual strain field and the complex interlocking interface can be key in enhancing the mechanical fatigue and fracture behavior of innovative FGM structures.

Additive Manufacturing / 295

Experimental and Constitutive Modeling of ULCF/LCF Behavior in GRCop-42 for Aerospace Applications

Author: Matteo Ventura¹

Co-authors: Luca Patriarca¹; Stefano Beretta²

¹ *Politecnico di Milano*

² *Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering, via La Masa 1, 20156 Milano, Italy*

Corresponding Authors: luca.patriarca@polimi.it, matteo.ventura@polimi.it

Modern rocket launchers are designed to be reused, which means their parts must withstand many missions in extreme heat and mechanical stress. In these propulsion systems, the materials used in combustion chambers must maintain their structural integrity while also dissipating heat quickly and effectively, especially during the launching phases.

Among the available materials, GRCop-42 has emerged as one of the most promising copper-based alloys, given its excellent thermal conductivity and mechanical performance at elevated temperatures. However, there is still a lack of comprehensive experimental data and reliable computational models capable of accurately describing its cyclic plasticity behaviour, particularly under cyclic loading conditions relevant to service environments.

The aim of this study is to investigate the ultra-low cycle fatigue (ULCF) and low cycle fatigue (LCF) behavior of GRCop-42, with the objective of ensuring a minimum number of successful missions for reusable propulsion systems. The experimental campaign carried out included strain-controlled fatigue tests under different loading conditions and baseline tensile tests, at several temperature levels representative of operational scenarios. The experimental results are used to characterize the material response and identify the damage mechanics parameters governing fatigue life.

In parallel, a constitutive model has been developed and calibrated to reproduce the cyclic plasticity and damage evolution of GRCop-42. The model integrates experimental observations and aims to provide accurate life predictions. The combined experimental-numerical approach allows for a deeper understanding of the material behavior and contributes to the development of more reliable design methodologies.

Additive Manufacturing / 323

Cold Spray Additive Manufacturing of Al-Fe Bimetallic Composites with Tailored Properties

Author: Kiran Tulasagiri Raddi¹

Co-authors: Asghar Heydari Astaraee ¹; Sara Bagherifard ²

¹ *Department of Mechanical Engineering, Politecnico di Milano, 20156 Milan, Italy*

² *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: sara.bagherifard@polimi.it, kirantulasagiri.raddi@polimi.it, asghar.heydariastaraee@polimi.it

Cold spray is becoming a strong option for multi-material additive manufacturing because it deposits material at low temperature. This helps reduce intermetallic formation and thermal residual stresses that are common in fusion-based processes. In this study, Aluminium–Iron (Al–Fe) bimetallic composites were made by high-pressure cold spray using in-flight mixing of as-received powders, which allows real-time control of the composition. The feedstock was varied from 0 to 100% Fe, and the deposits were studied for their microstructure and mechanical behavior using micro- and nano-hardness tests, uniaxial tensile testing, and profilometry-based indentation plastometry (PIP). The mixed deposits formed a dense Al matrix with Fe splats spread through it, and the porosity decreased (from ~0.79% in Al to ≤0.25% in the composites). This improvement is linked to peening-assisted densification caused by the impact of hard Fe particles. At higher Fe levels, the final deposit composition differed from the starting feedstock because Al and Fe do not deposit with the same efficiency. Fe retention was close to the target value at low Fe content (23.0% in Al-25Fe), but it dropped as more Fe was added (28.7% in Al-50Fe and 45.4% in Al-75Fe), showing stronger Fe–Fe rebound and more clustering. The mechanical properties could be adjusted by changing composition. Young's modulus increased from 32 GPa (Al) to 55 GPa (Al-75Fe), and the yield/ultimate strengths rose from ~40/55 MPa (Al) to ~77/94 MPa, with the increase becoming limited beyond ~23–28 vol.% Fe in the deposit. Ductility did not change in a straight line: it reached the highest value at an intermediate Fe level (Al-25Fe, ~4.7% fracture strain) because cracks were forced to change direction and the Al matrix could tear in a more ductile way. At higher Fe content, ductility decreased because weak bonding at Al–Fe interfaces made brittle fracture more likely. Overall, these results show that online-mixed CSAM can be used to adjust Al–Fe composite structures in a controlled way and helps guide the choice of composition, process settings, and mechanical performance for Al–Fe deposits.

Additive Manufacturing / 326

Confronto tra Metodi Sperimentali e Microstrutturali per la Caratterizzazione Anisotropa in Componenti prodotti tramite Manifattura additiva basata sull'estrusione di materiale (MEX)

Author: GIULIA MORETTINI¹

Co-author: Filippo Cianetti ²

¹ *Dipartimento di Ingegneria - Università degli Studi di Perugia*

² *Università degli Studi di Perugia*

Corresponding Authors: giulia.morettini@unipg.it, filippo.cianetti@unipg.it

Ad oggi, la produzione additiva basata sull'estrusione di materiale (MEX) risulta essere sempre più utilizzata per la realizzazione di componenti polimerici strutturali destinati a settori ad alte prestazioni. Tuttavia, come è ben noto, il processo di deposizione induce intrinsecamente anisotropia nella risposta meccanica delle parti stampate, rappresentando una sfida critica per la progettazione strutturale e la modellazione numerica.

Questo lavoro presenta una comparazione tra due differenti metodologie per la stima delle proprietà meccaniche anisotrope di componenti strutturali stampati mediante MEX: il classico approccio sperimentale e un approccio microstrutturale basato su Elementi di Volume Rappresentativi (RVE) usati entrambi; il fine è quello di poter valutare quale tra di esse risulta il miglior metodo a seconda delle esigenze progettuali.

Sono state, per questo motivo, eseguite prove di trazione su provini in ULTEM™ 9085 realizzati con diverse orientazioni di stampa e parallelamente, è stato sviluppato un approccio microstrutturale completamente numerico per ricostruire la geometria a livello di filamento e calcolare le proprietà elastiche ortotrope efficaci tramite omogeneizzazione agli elementi finiti.

L'affidabilità dei due approcci è stata valutata attraverso un caso studio relativo a un telaio strutturale

di CubeSat realizzato tramite MEX conducendo prove sperimentali di vibrazione per identificare il comportamento dinamico della struttura, e i risultati sono stati confrontati con analisi numeriche modali e in frequenza eseguite utilizzando proprietà del materiale ottenute sia da prove sperimentali sia da omogeneizzazione microstrutturale.

Il confronto evidenzia punti di forza e limitazioni di ciascun approccio in termini di accuratezza, costo computazionale e applicabilità in un flusso di progettazione industriale.

Additive Manufacturing / 346

Modellazione numerica e caratterizzazione sperimentale di strutture sandwich con nucleo spinodale

Author: Barbara Mandolesi¹

Co-authors: CHRISTIAN IANDIORIO²; Francesco Vivio¹; Valerio G. Belardi¹

¹ *Università degli Studi di Roma Tor Vergata*

² *Università di Roma Tor Vergata*

Corresponding Authors: barbara.mandolesi@uniroma2.it, vivio@uniroma2.it, christian.iandiorio@uniroma2.it, valerio.belardi@uniroma2.it

Le strutture sandwich rappresentano una soluzione consolidata per applicazioni ad elevato rapporto rigidità/peso, grazie alla combinazione di pelli resistenti e di un'anima leggera. L'evoluzione della manifattura additiva ha favorito l'introduzione di anime architettoniche costituite da metamateriali, capaci di superare i limiti delle configurazioni tradizionali a nido d'ape o a schiuma cellulare. In tale contesto, le topologie spinodali a shell stanno emergendo come una promettente alternativa.

Il presente lavoro indaga il comportamento flessionale di strutture sandwich con anima spinodale a guscio mediante un approccio integrato numerico-sperimentale, con riferimento alla condizione di carico a tre punti. L'obiettivo è valutare la trasferibilità delle proprietà omogeneizzate a scala di cella unitaria alla risposta strutturale globale.

La topologia è generata risolvendo numericamente, tramite differenze finite, l'equazione differenziale di Cahn-Hilliard. L'isosuperficie a livello zero del campo di fase definisce la superficie del guscio, discretizzata con elementi shell per la caratterizzazione della cella. Le proprietà elastiche efficaci sono determinate mediante omogeneizzazione computazionale, ricavando i moduli equivalenti di Young e di taglio in funzione dei parametri del modello matematico e dello spessore del guscio.

Il comportamento flessionale è investigato mediante simulazioni FE con il core modellato in pieno dettaglio e, in parallelo, con il core sostituita da un mezzo equivalente omogeneo. Il confronto evidenzia un'ottima concordanza, validando l'omogeneizzazione come strumento efficace e computazionalmente efficiente per la previsione della risposta globale del sandwich.

Una campagna sperimentale su celle unitarie e su un provino sandwich stampati in PLA mediante tecnologia Fused Filament Fabrication (FFF) valida il calcolo delle proprietà elastiche omogeneizzate e della rigidità globale del sandwich, evidenziando scostamenti contenuti attribuibili a imperfezioni geometriche e variabilità di processo.

Nel complesso, lo studio dimostra la fattibilità dell'impiego di anime spinodali a guscio e conferma l'efficacia del framework multiscala proposto nel collegare morfologia, proprietà elastiche e risposta strutturale globale.

Additive Manufacturing / 374

Design and Testing of a Fully 3D-Printed Self-Sensing Metamaterial

Author: Alberto Casartelli¹

Co-authors: Francesco Cadini¹; Luca Lomazzi²

¹ *Politecnico di Milano; Department of Mechanical engineering*

² *Politecnico di Milano; Department of Mechanical Engineering*

Corresponding Authors: luca.lomazzi@polimi.it, alberto.casartelli@polimi.it, francesco.cadini@polimi.it

Metamaterials are engineered structures designed to achieve unique physical properties through their geometric architecture. By integrating monitoring capabilities directly into these structures, self-sensing metamaterials can autonomously detect their own mechanical state. These technologies have important applications in soft robotics, smart medical devices, and structural health monitoring.

This work presents the development of a fully 3D-printed metamaterial featuring integrated sensing capabilities. Specifically, the system exploits the capacitance effect to sense the applied pressure during deformation. The project combines numerical simulations to optimize sensitivity and structural response, followed by experimental tests to validate the performance of the structure.

This research represents a step toward the development of smart metamaterials. Future work will focus on integrating actuation mechanisms within the architecture, aiming to realize fully autonomous smart metamaterial capable of closed-loop sensing and response.

Additive Manufacturing / 378

A Hardware-Independent Framework for Real-Time Arc Detection and Anomaly Alerting in Unfiltered Video Footages of WAAM Processes

Authors: Carmelo Mineo^{None}; Donatella Cerniglia^{None}; Maedeh Gourakani^{None}

Co-authors: Andrea Bertazzo ; Federica Tiso ; Giovanni Avallone

Corresponding Authors: carmelo.mineo@icar.cnr.it, maedeh.gourakani@unipa.it, federica.tiso@caracol-am.com, andrea.bertazzo@caracol-am.com, giovanni.avallone@caracol-am.com, donatella.cerniglia@unipa.it

1 Objectives

This research aims to develop a hardware independent and deterministic framework for real time arc monitoring in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM). Existing studies mainly focus on sub millimeter arc length accuracy under controlled and filtered conditions [1], [2], often overlooking practical industrial needs. In particular, robust binary detection of arc existence, frequency, and duration is required to trigger real time alarms. To address this gap, the proposed framework prioritizes robust arc detection over precise geometric measurement. It avoids physical optical filters and instead relies on algorithmic strategies to handle extreme optical noise and sensor blooming. By shifting complexity from hardware to software, the approach provides a cost effective and practical solution for autonomous WAAM systems.

Keywords: WAAM monitoring

2 Methodology

The proposed methodology is organized as a multi stage image processing pipeline. The first stage addresses specular glare removal. High intensity artifacts are identified using a combination of high percentile thresholding and morphological white top hat transforms. These corrupted regions are then reconstructed through diffusion based inpainting, formulated using the Laplace equation, in order to preserve the underlying texture of the image.

The second stage focuses on deterministic decision logic for arc isolation. The current implementation uses an adaptive binarization scheme, supported by anti-inversion logic to stabilize Otsu's method under fluctuating contrast conditions. To evaluate performance, a custom collaborative annotation tool was developed, where at least three expert users independently label each frame as "Arc" or "No Arc", establishing a reliable ground truth dataset. To address the limitations of motion-based approaches in stationary phases [3], the framework is being extended toward a hybrid statistical and geometric strategy. This includes contrast gap analysis for detecting weak arcs and geometric distance filtering to distinguish the physically anchored arc from peripheral reflections.

3 Results

Preliminary testing on unfiltered WAAM footage, validated against a multi user ground truth, shows that the deterministic pipeline can reliably detect strong arc events and extract their temporal signatures, achieving an initial classification accuracy above 80 percent. Challenges remain during low intensity transitions and steady state phases, where the arc remains visually stable. In these cases, detection becomes intermittent due to the limits of purely differential logic, a known issue in classical thresholding methods [4]. Current work focuses on refining statistical thresholds to improve detection of weak arc segments. The framework already provides a reliable basis for estimating pulse frequency and duration, which are essential for triggering automated No Arc safety alerts.

4 Conclusion

The main contribution of this work is the shift from passive monitoring to an active safety interlock. By extracting temporal arc signatures, including pulse frequency and arcing duration, the framework enables a visual alarm system that can detect ignition failures in real time. This approach provides a scalable and cost-effective solution for industrial WAAM which is a replace expensive physical light filters. It helps maintain structural integrity by preventing dry run defects at the millisecond scale. It also reduces reliance on specialized optical hardware.

References

- [1] M. Shi, J. Xiong, G. Zhang, and S. Zheng, "Monitoring process stability in GTA additive manufacturing based on vision sensing of arc length," *Measurement*, vol. 185, p. 110001, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.110001.
- [2] H. Mao et al., "Research on arc length control of unsupported bars in GTAW-based wire and arc additive manufacturing via vision sensing and adaptive fuzzy control," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 142, no. 1–2, pp. 399–413, Jan. 2026, doi:10.1007/s00170-025-17103-4.
- [3] L. Song, P. Zhang, K. Chen, Z. Li, H. Yan, and Y. Huang, "From classical algorithms to deep learning: a review of machine vision for monitoring welding dynamics," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 140, no. 11–12, pp. 5885–5929, Oct. 2025, doi: 10.1007/s00170-025-16650-0.
- [4] W. Jamrozik and J. Górka, "Assessing MMA Welding Process Stability Using Machine Vision-Based Arc Features Tracking System," *Sensors*, vol. 21, no. 1, p. 84, Dec. 2020, doi: 10.3390/s21010084.

Additive Manufacturing / 389

Ottimizzazione Topologica Level-Set di Celle Unitarie Periodiche in 2D e 3D

Authors: Angelo Caiani¹; Mauro Giacalone²; Sara Mantovani³

¹ Ferrari S.p.A.

² Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia - Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" - Laboratorio MilleChili

³ Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia - Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari"

Corresponding Authors: angelo.caiani@unimore.it, sara.mantovani@unimore.it, mauro.giacalone@unimore.it

Le strutture lattice periodiche, rese realizzabili dai recenti progressi nella manifattura additiva metallica, consentono di modulare la rigidità effettiva di un materiale omogeneo massivo attraverso la geometria della cella unitaria che lo compone. La progettazione di una cella unitaria il cui tensore di rigidità omogeneizzato corrisponda a valori prescritti, preservando contorni netti e realizzabili e la piena periodicità geometrica, rappresenta un problema inverso ancora aperto. Il presente lavoro adotta un approccio di ottimizzazione topologica level-set per la progettazione di celle unitarie periodiche, sia in due sia in tre dimensioni. L'obiettivo dell'ottimizzazione è la minimizzazione della compliance pesata, preservando rapporti prescritti tra le rigidità direzionali, con vincolo di frazione volumetrica. L'interfaccia solido-vuoto è rappresentata implicitamente tramite una funzione level-set nodale $\phi(x)$, e l'analisi agli elementi finiti è condotta su una mesh di sfondo fissa mediante integrazione locale per elementi tagliati (cut-element), che restituisce geometrie nette e prive di necessità

interpretativa, direttamente idonee alla fabbricazione. La periodicità sia del campo di spostamento sia della variabile di design è imposta accoppiando i nodi delle superfici opposte e mediante un filtro di convoluzione periodico, che richiama i nodi vicini dal lato opposto quando il raggio del filtro eccede il dominio della cella unitaria. Un'analisi dedicata alla ricostruzione dal discreto al continuo della funzione φ mostra che l'interpolazione lineare è adeguata per mesh ad alta risoluzione, mentre un'interpolazione trigonometrica diventa necessaria per discretizzazioni grossolane. La medesima formulazione è estesa in modo coerente dalla cella unitaria quadrata 2D alla cella unitaria cubica 3D, con le proprietà ortotrope omogeneizzate (E_{11} , E_{22} , E_{33} , G_{12} , G_{23} , G_{13}) ricavate tramite tre casi di carico indipendenti in 2D e sei in 3D. Lo schema proposto viene confrontato con un'implementazione SIMP standard su problemi identici in 2D e 3D, valutando il comportamento di convergenza, il soddisfacimento del vincolo di volume senza post-processing e la qualità delle interfacce risultanti. Il framework apre la strada all'ottimizzazione multiscala di componenti guidata da target ortotropi omogeneizzati non vincolati.

Additive Manufacturing / 392

Benchmarking LPBF Dimensional Accuracy with ISO/ASTM 52902: A Comprehensive Build Plate Targeting Holes and Thin Walls

Author: Lorenzo Canaroli¹

Co-authors: Alessandro Giorgetti²; Francesco Del Pero³; Gabriele Arcidiacono³; Lokesh Chandrabalan⁴; Niccolò Baldi⁴; Paolo Citti³

¹ *Università degli Studi Guglielmo Marconi*

² *Uniroma3*

³ *UniMarconi*

⁴ *Baker Hughes—Nuovo Pignone*

Corresponding Authors: f.delpero@unimarconi.it, g.arcidiacono@unimarconi.it, alessandro.giorgetti@uniroma3.it, niccolo.baldi2@bakerhughes.com, lokesh.chandrabalan@bakerhughes.com, lorenzo.canaroli@gmail.com, p.citti@unimarconi.it

The dimensional accuracy of components manufactured by Laser Powder Bed Fusion (LPBF) is a critical parameter that directly impacts product quality, reliability, and performance. Given the ongoing proliferation of LPBF machines and processes, there is an emerging need for standardized techniques that are efficient to evaluate the dimensional accuracy of parts produced by this technology. Reference artifacts with geometries specifically designed to analyze and test the capabilities of LPBF equipment provide a practical basis for cross-platform comparative research. Through systematic comparison with such artifacts, researchers, original equipment manufacturers (OEM) and end-users can study the capabilities and limitations of different technologies on a peer-to-peer basis in controlled environments. This enables more informed decisions on technology selection for specific applications and industries. This work provides an overview of the current state of knowledge regarding the factors that influence the dimensional accuracy of components produced by LPBF technology and the effective evaluation methodologies. It also highlights the key criteria for artifact design. The current literature survey delineates a range of artifact geometries, each of which embodies critical LPBF characteristics. These geometries are subject to dimensional deviations and, consequently, serve as tools for evaluating system performance. Based on the findings from this state-of-the-art analysis, margins for improvement are proposed utilizing ISO/ASTM 52902 as the overarching design framework. This approach was undertaken to develop a novel benchmark artifact. The proposed design is intended to address features such as holes and thin walls through the implementation of controlled arrays spanning the dimensions, orientations, and positions of the build plate. This approach is designed to enable targeted and repeatable feature-level accuracy assessment across different LPBF platforms.

Additive Manufacturing / 434

Influenza dell'anisotropia indotta dal processo L-PBF sul comportamento isotropo di strutture TPMS Gyroid in acciaio 316L

Author: Anastasia Ciccarella¹

Co-authors: Giuseppe Dell'Avvocato¹; Daniele Cortis²; Edoardo Mancini³

¹ *Università degli studi dell'Aquila*

² *Laboratori Nazionali del Gran Sasso*

³ *Università degli Studi dell'Aquila*

Corresponding Authors: giuseppe.dellavvocato@univaq.it, edoardo.mancini@univaq.it, anastasia.ciccarella@graduate.univaq.it, danielle.cortis@lngs.infn.it

La produzione additiva tramite tecnologia Laser Powder Bed Fusion (L-PBF) consente la realizzazione di strutture reticolari complesse con elevato potenziale di alleggerimento e ottimizzazione delle proprietà meccaniche. Tra queste, le strutture Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS), come la Gyroid, combinano elevata leggerezza e buone prestazioni meccaniche, mostrando un comportamento isotropo per specifici intervalli di densità relativa. Questa caratteristica le rende particolarmente interessanti per applicazioni strutturali nel contesto della manifattura additiva metallica. Tuttavia, il processo L-PBF introduce anisotropia nel materiale base dovuta a gradienti termici, modalità di solidificazione e tensioni residue, che possono influenzare la risposta meccanica complessiva delle strutture realizzate. Il presente lavoro analizza l'interazione tra l'isotropia geometrica intrinseca della struttura Gyroid in acciaio inossidabile 316L e l'anisotropia indotta dal processo. Sono state realizzate strutture Gyroid con differenti dimensioni della cella unitaria e spessori caratteristici, e sottoposte a prove di compressione quasi statica in direzioni parallela e perpendicolare alla direzione di stampa. L'analisi sperimentale è stata affiancata da simulazioni agli elementi finiti, nelle quali il materiale base è stato descritto mediante un comportamento isotropo teorico e un comportamento anisotropo derivato sperimentalmente, al fine di valutare l'influenza dell'anisotropia indotta dal processo sulla risposta elastica equivalente della cella, sulla base del rapporto di anisotropia di Zener. I risultati mostrano che l'architettura Gyroid è in grado di mitigare parzialmente la trasmissione dell'anisotropia indotta dal processo dal materiale base alla struttura reticolare, in particolare nel regime elastico e per i valori di densità relativa investigati.

Additive Manufacturing / 435

Micro-Vibration Insulation for Optical Payloads: Design and Experimental Evaluation of Dynamic Response and Structural Strength of Lattice Panels with Different Densities

Author: Abdo Toma¹

Co-authors: Mattia Cera²; Emanuele Zaccagnino³; Marco Di Clemente³; Kevin Kekulawala²; Francesco Lumaca²; Emanuele Riva¹; Stefano Foletti¹

¹ *Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italy*

² *Thales Alenia Space, Italy*

³ *Agenzia Spaziale Italiana, Italy*

Corresponding Authors: emanuele.riva@polimi.it, stefano.foletti@polimi.it, emanuele.zaccagnino@asi.it, kevin.kekulawala@thales, mattia.cera@thalesalieniaspace.com, francesco.lumaca@thalesalieniaspace.com, abdo.toma@polimi.it, marco.diclemente@asi.it

This paper investigates micro-vibration insulation solutions for optical payloads through the design and experimental evaluation of lattice-core panels with periodic density distributions. The study focuses on additively manufactured sandwich structures, where a diamond lattice core is used to tailor the dynamic response of the system. Different panel configurations are considered in order to analyze the effect of density variation on vibration attenuation performance and structural strength. A combined approach based on numerical modeling and experimental testing is adopted to characterize the dynamic behavior and assess structural reliability under representative loading conditions.

The objective is to establish a clear relationship between design parameters, dynamic response, and structural performance, providing guidelines for the development of efficient micro-vibration insulation systems for space applications.

Additive Manufacturing / 436

Numerically Informed Neural Networks for Damage Detection in TPMS Lattice Structures via Acoustic Resonance Testing

Author: Alessandro Levati^{None}

Co-authors: Federico Roscioli ; Stefano Foletti ¹

¹ *Dipartimento di Meccanica, Politecnico di Milano, Italy*

Corresponding Authors: federico.roscioli@mail.polimi.it, stefano.foletti@polimi.it, alessandro.levati@polimi.it

Lattice structures have attracted increasing interest due to their unique mechanical properties, which are difficult to achieve with conventional materials. Despite their promising potential, damage identification in these complex structures remains challenging, while damage localization and severity quantification are still insufficiently explored.

This study aims to develop a neural-network-based approach for damage detection, localization, and quantification using variations in the natural frequencies of lattice specimens obtained through acoustic resonance testing. To this end, a numerically generated dataset, further expanded through artificial data augmentation incorporating physical variability, was used to train and validate the model.

The proposed approach was then assessed using an experimental dataset comprising specimens with known damage locations and damage extents induced by fatigue cycles associated with stiffness degradation. A dedicated algorithm was developed to correlate the numerical and experimental datasets.

The developed neural network successfully identified the presence and location of damage in all specimens of the experimental dataset. In contrast, damage extent estimation proved more challenging, showing reliable accuracy only for stiffness reductions above 5%.

These findings indicate that combining acoustic resonance testing with neural networks is a viable strategy for damage assessment in lattice structures, providing reliable detection and localization capabilities while paving the way for improved damage quantification.

Additive Manufacturing / 452

Ruolo della direzione di costruzione e dei trattamenti termici su microstruttura e proprietà meccaniche e magnetiche di acciai Fe-Si da manifattura additiva

Authors: Giulia Stornelli¹; Roberto Perrone²

Co-authors: Andrea Di Schino ¹; Antonio Faba ¹; Marco Stella ¹; Mirko Sgambetterra ²; Vittorio Bertolini ¹

¹ *Department of Engineering, University of Perugia*

² *Aeronautical and Space Test Division, Italian Air Force*

Corresponding Authors: giulia.stornelli@unipg.it, marco.stella@unipg.it, robi.perrone@gmail.com, andrea.dischino@unipg.it, vittorio.bertolini@unipg.it, mirko.sgambetterra@gmail.com, antonio.faba@unipg.it

La tecnologia additiva Laser Powder Bed Fusion (LPBF) rappresenta una valida alternativa per la produzione di nuclei ferromagnetici, consentendo l'impiego di leghe avanzate, geometrie ottimizzate e l'introduzione di discontinuità interne utili a ostacolare la circolazione delle correnti parassite. Tuttavia, la solidificazione direzionale e i cicli termici intrinseci al processo inducono una marcata anisotropia microstrutturale, che si riflette in una risposta magnetica anisotropa e in un possibile degrado delle prestazioni funzionali. In questo lavoro è stata investigata la lega FeSi3 (3.0 wt.%Si), valutando l'effetto della direzione di costruzione e dei trattamenti termici sulla microstruttura e sulle prestazioni meccaniche e magnetiche, nonché la loro correlazione. Dischi con spessore di 0.6mm sono stati realizzati in direzione verticale e orizzontale e caratterizzati, sia nello stato as-built sia dopo ricottura a 1200°C per 1h. La caratterizzazione microstrutturale è stata eseguita tramite SEM-EBSD, mentre le proprietà meccaniche e magnetiche sono state valutate rispettivamente mediante durezza Vickers e isteresi vettoriale con tecnica RSDT. Nella condizione as-built si osserva una microstruttura tipica LPBF, caratterizzata da melt-pool e grani con morfologia mista colonnare-equiassica. Dopo trattamento termico si osservano una marcata crescita del grano e una significativa riduzione della durezza Vickers, con crescita abnorme di alcuni grani su scala millimetrica. Dal punto di vista magnetico, i dischi stampati in direzione verticale mostrano, nello stato as-built, perdite inferiori rispetto a quelli orizzontali. Ciò è attribuibile al fatto che, per un campo magnetico vettoriale a direzione variabile, la microstruttura dei campioni verticali risulta mediamente più grossolana lungo le diverse direzioni di magnetizzazione, mentre nei campioni orizzontali il campo intercetta microstrutture fini, limitando l'orientazione dei domini magnetici. La ricottura omogenizza e promuove la crescita del grano, rendendo la risposta magnetica più uniforme e riducendo significativamente le perdite. I risultati forniscono indicazioni per l'ottimizzazione di microstruttura e prestazioni magnetiche di acciai FeSi-LPBF, in particolare per applicazioni ad alta frequenza.

Additive Manufacturing / 448

IPC lattice structure: modellazione in regime elastico e plastico

Author: Edoardo Mancini¹

Co-authors: Anastasia Ciccarella²; Andrea Di Giuliano¹; Giuseppe Dell'Avvocato²; Katia Gallucci¹

¹ *Università degli Studi dell'Aquila*

² *Università degli studi dell'Aquila*

Corresponding Authors: edoardo.mancini@univaq.it, katia.gallucci@univaq.it, giuseppe.dellavvocato@univaq.it, andrea.digiuliano@univaq.it, anastasia.ciccarella@graduate.univaq.it

Le Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS), come la Gyroid, consentono di aumentare le prestazioni meccaniche, ottenere vantaggi in termini di resistenza/peso e limitare lo stress-shielding in applicazioni biomedicali permettendo di controllare la rigidità della protesi. Di contro, potrebbero aumentare il volume a disposizione del cemento durante la cementazione, come ad esempio, degli steli femorali. Al fine di impedire la permeazione del cemento (materiale a base di PMMA) e quindi limitare l'eccessivo aumento di temperatura durante la fase di polimerizzazione, l'utilizzo di compositi a fasi interpenetranti (IPC) rappresenta una strategia promettente.

In questo lavoro è stata studiata una struttura reticolare giroidale bifase composta da acciaio e polimero. Lo studio ha rilevato come l'introduzione di una fase epossidica riempita con polvere d'acciaio ne migliora la capacità portante pur preservandone le caratteristiche di leggerezza. Il suo comportamento a compressione quasi-statica ha mostrato un doppio cambiamento di pendenza nella fase di incrudimento, dovuto all'alternanza tra la fase di densificazione della cella d'acciaio e la successiva espulsione della resina, per poi completare con la fase di densificazione. È stata quindi sviluppata e calibrata una nuova legge di potenza di Hollomon a tre stadi. Infine, una strategia di omogeneizzazione numerica basata sulla teoria del Representative Volume Element (RVE) è stata adottata per riprodurre l'IPC nel regime elastico, rendendolo più adatto ad una successiva procedura di ottimizzazione.

Additive Manufacturing / 332

Mechanics-guided optimization of hybrid periodic architectures

Author: Luca Liu¹

Co-authors: Federica Buccino¹; Laura Vergani¹

¹ *Department of Mechanical Engineering, Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: laura.vergani@polimi.it, luca.liu@polimi.it, federica.buccino@polimi.it

Triply periodic minimal surface (TPMS) architectures are widely investigated for lightweight mechanical applications because of their high specific performance and manufacturability. However, most studies focus on a limited number of canonical families, such as gyroid or Schwarz structures, thus restricting the accessible design space. This work proposes a mechanics-driven optimization framework to explore a broader class of hybrid TPMS architectures and identify stiffness-efficient designs beyond standard topologies.

TPMS geometries are represented through an implicit level-set formulation based on an 18-dimensional set of linearly independent periodic basis functions. This parameterization enables the continuous generation of a broad spectrum of hybrid architectures while retaining control over connectivity and volume fraction. Candidate designs are instantiated as finite 2x2x2 multi-cell specimens and mechanically evaluated through a voxel-based finite element model. The framework includes connectivity screening, endcap-based loading stabilization, and validation against analytical and internal consistency benchmarks. To efficiently explore the expensive high-dimensional design space, two Bayesian optimization strategies are considered: a baseline unconstrained formulation and a feasibility-aware formulation, in which the expected improvement acquisition function is weighted by the predicted probability of geometric feasibility.

The optimization framework successfully identified hybrid TPMS architectures with significantly improved stiffness-to-weight performance compared with canonical references. The best design obtained with the unconstrained Bayesian optimization reached an effective stiffness of approximately 217000 MPa, whereas the feasibility-aware formulation achieved 191000 MPa. Both values substantially exceeded the performance of gyroid and Schwarz P reference structures, which remained close to 100000 MPa under the same conditions. In addition, Bayesian optimization outperformed a multi-seed random-search baseline, showing an improvement of about 32.5 percent at the same evaluation budget. The optimized morphologies consistently exhibited vertically aligned and continuous load-bearing pathways, indicating that the framework captures physically meaningful structural trends rather than isolated numerical optima.

These results show that expanding the TPMS design space through a unified coefficient-based representation, combined with surrogate-assisted optimization and voxel-based mechanical evaluation, enables the discovery of high-performance architected materials beyond canonical minimal-surface families. The comparison between unconstrained and feasibility-aware formulations also highlights the trade-off between peak mechanical efficiency and robustness of the search process. Overall, the proposed framework provides a computationally efficient and mechanically interpretable strategy for the design of optimized TPMS-based metamaterials for lightweight structural applications.

Automotive / 454

Il '900: il Secolo dell'Automobile 1

Author: Stefano Marini¹

¹ *Università degli Studi Roma Tre*

Corresponding Author: stefano.marini@uniroma3.it

Keynote

Automotive / 256

Identifying Representative Driving Cycles for Electric Motorcycles: a Data-Driven Approach to Evaluate Energy Consumption and Regeneration

Author: Maurizio Guadagno¹

Co-authors: Cosimo Lucci¹; Valentino Crociani¹

¹ *Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Firenze*

Corresponding Authors: maurizio.guadagno@unifi.it, valentino.crociani@unifi.it, cosimo.lucci@unifi.it

Objectives

Standard driving cycles for motorcycles often fail to capture the specific energy consumption and regenerative braking dynamics of modern electric models under diverse riding conditions. Consequently, they lead to inaccurate energy efficiency assessments and unrealistic range estimates. This study aims to develop tailored driving cycles for electric motorcycles across representative operating contexts (including urban, rural, and highway environments) based on real-world data to enhance the accuracy of range and energy consumption estimation.

Methods

Real-world data were collected using an instrumented electric motorcycle under diverse riding conditions. The acquisition system continuously recorded parameters, including speed, acceleration, GPS data, rider inputs, and battery and motor energy usage. Leveraging an advanced data-driven methodology, the raw data were statistically processed to synthesize representative driving cycles that accurately reflect the kinematic characteristics and topographical challenges of each environment.

Results

The analysis identified distinct representative riding cycles for each specific application, characterized by significant variations in vehicle usage and energy management. Major discrepancies compared to standard profiles were observed, particularly in rural environments, where the influence of regenerative braking is more pronounced.

Conclusion

The data-driven approach presented in this study provides an innovative tool for the automated development of tailored driving cycles, establishing a robust framework for evaluating electric vehicle performance and battery management strategies. Ultimately, this methodology facilitates more realistic range estimates for consumers and supports manufacturers in optimizing electric powertrains for specific real-world usage patterns.

Automotive / 282

Simulation of an electric vehicle (EV) crash using a homogeneous Finite Element (FE) model of a battery pack

Authors: Aljon Kociu¹; Lorenzo Berzi²; Luca Pugi³; Massimo Delogu^{None}

¹ *Università di Firenze*

² *Department Industrial Engineering of Florence*

³ *Department of Industrial Engineering of Florence*

Corresponding Authors: aljon.kociu@unifi.it, luca.pugi@unifi.it, lorenzo.berzi@unifi.it, massimo.delogu@unifi.it

The primary aim of this study is to evaluate the computational feasibility of multi-scale battery models in automotive safety simulations. Specifically, the research seeks to interpret the structural response of a full-scale battery pack through the lens of individual cell-level deformation to predict potential failure points.

The researchers developed a comprehensive battery pack model by upscaling previously validated, homogeneous cell-level models. This assembly was integrated into a modified 2012 Toyota Camry chassis and subjected to rigorous crashworthiness simulations, including frontal and side pole impacts, following Euro NCAP protocols. The analysis focused on identifying localised strain within the pack that could lead to internal short circuits (ISC) and subsequent thermal runaway (TR).

The simulations demonstrate that side pole impacts result in significantly more severe battery deformation compared to frontal crashes. However, at standard regulatory testing velocities, the observed cell-level deformations remained below the critical thresholds established in previous experimental trials.

The findings suggest that while current standard testing speeds may not trigger catastrophic battery failure, the risk of internal short circuits increases substantially at higher impact velocities or with smaller pole diameters. The study confirms that multi-scale modelling is a viable tool for identifying vulnerable regions within a battery pack during the design phase.

Automotive / 297

Ottimizzazione dei profili di scorrimento dei rulli di un CVT a cinghia, realizzazione attraverso additive manufacturing di appositi inserti e prove al banco dei prototipi realizzati.

Authors: Vincenzo La Battaglia¹; Giacomo Pignotta¹; Andrea Mura²; Stefano Marini¹; Alessandro Giorgetti¹; Gabriele Arcidiacono³

¹ *Università degli Studi Roma Tre*

² *Politecnico di Torino*

³ *Università degli Studi Guglielmo Marconi*

Corresponding Authors: vincenzo.labattaglia@uniroma3.it, andrea.mura@polito.it, stefano.marini@uniroma3.it, alessandro.giorgetti@uniroma3.it, g.arcidiacono@unimarconi.it, gia.pignotta@stud.uniroma3.it

Il presente lavoro è relativo ai variatori di velocità continui a cinghie trapezoidali e in particolare ai profili di scorrimento dei rulli presenti nella semipuleggia mobile del gruppo anteriore, dalla cui geometria dipende la caratteristica della trasmissione e cioè la cosiddetta curva di cambiata che mette in relazione la velocità del veicolo con il regime di rotazione del motore.

Obiettivo

il lavoro si prefigge di mettere a disposizione un metodo agevole ed economico per consentire di differenziare le caratteristiche della trasmissione in funzione della missione a cui è chiamato a operare il veicolo.

Metodo

Nel lavoro si presenta preliminarmente il criterio di dimensionamento dei CVT a cinghia attraverso la realizzazione di profili di scorrimento dei rulli ottimizzati per la specifica missione della trasmissione. Viene presentato un prototipo di semipuleggia mobile del gruppo anteriore in cui si rende possibile la modifica del profilo attraverso la semplice sostituzione di appositi inserti. Viene quindi verificata la possibilità della realizzazione di detti inserti attraverso stampa 3D in vari materiali plastici.

Risultati

Vengono eseguite delle campagne di prove su banco dedicato per la validazione del nuovo metodo utilizzato, in particolare si verifica la rispondenza tra le curve di cambiata ottenute con i profili realizzati in alluminio e quelle ottenute con i profili stampati nei vari materiali plastici, analizzando sia l'influenza della maggiore deformabilità elastica degli inserti ottenuti con stampa 3D sia l'influenza del diverso coefficiente di attrito tra rullo e profilo così realizzato. Si procede infine ad analizzare la corrispondenza delle curve di cambiata con quelle ipotizzate, in base alle quali è stata definita la geometria dei profili.

Conclusioni

La metodologia proposta consente di poter testare agevolmente un gran numero di profili di scorrimento dei rulli per trasmissioni CVT; ciò risulta utile in fase di progettazione alla definizione del profilo ottimale in funzione delle prestazioni richieste ma consentirà anche, in fase di produzione, di

fornire un prodotto personalizzato non solo per i diversi tipi di veicolo ma addirittura per lo stesso veicolo in funzione della tipologia di utente e utilizzo.

Automotive / 312

Metodologie spettrali per la stima della vita a fatica di telai per carrelli elevatori soggetti a carichi non stazionari

Author: Marco Pinelli¹

Co-authors: Federico Mammini²; Francesco Bucchi³; Francesco Frendo²; Michele Sgamma²

¹ UNIFI

² Università di Pisa

³ Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale - Università di Pisa

Corresponding Authors: francesco.frendo@unifi.it, marco.pinelli@phd.unifi.it, francesco.bucchi@unifi.it, michele.sgamma@cisup.unifi.it, federico.mammini@phd.unifi.it

La progettazione a fatica dei telai per carrelli elevatori controbilanciati richiede l'analisi di storie di carico di natura pseudo-aleatoria e severa. Il presente lavoro, condotto in collaborazione con Toyota Material Handling Manufacturing Italy (TMHMI), affronta la sfida di ottimizzare i processi di validazione strutturale attraverso l'integrazione di metodi nel dominio della frequenza.

Il metodo tradizionale nel dominio del tempo, basato sull'algoritmo di conteggio Rainflow, garantisce elevata affidabilità ma risulta computazionalmente oneroso durante la validazione virtuale (FEA/MBS). I metodi spettrali nel dominio della frequenza offrono un'alternativa altamente efficiente, permettendo la stima della vita a fatica direttamente a partire dalla Densità Spettrale di Potenza (PSD). Tuttavia, la teoria spettrale classica (es. Dirlik, Tovo-Benasciutti) assume che il segnale sia stazionario. L'applicazione diretta a profili di collaudo complessi, tipicamente caratterizzati da marcata non-stazionarietà, invalida tale ipotesi e conduce a stime del danno inaffidabili.

Questo studio presenta l'impostazione di una metodologia avanzata atta a identificare, quantificare e gestire la non-stazionarietà nei segnali acquisiti durante le procedure di validazione strutturale interne aziendali. La ricerca si articola in fasi sequenziali, partendo dall'identificazione delle fluttuazioni del segnale tramite approcci congiunti tempo-frequenza (come la Trasformata di Fourier a Breve Termine, STFT) e test statistici rigorosi (come il Run Test di Wald-Wolfowitz).

Per il calcolo del danno nel dominio della frequenza, il lavoro valuta e confronta le principali strategie di segmentazione presenti in letteratura. Da un lato, viene esplorato l'approccio macroscopico dei carichi switching (calcolo per partes), in cui il segnale viene frammentato in stati localmente stazionari, pesando il danno complessivo in base al tempo di permanenza in ciascuno stato. Dall'altro, viene indagata l'applicabilità dell'approccio microscopico short-time, in cui l'ampiezza delle finestre di calcolo viene dinamicamente correlata alle proprietà intrinseche della struttura, come la Funzione di Risposta all'Impulso (IRF).

Le stime del danno nel dominio della frequenza, considerate con opportuni intervalli di confidenza statistici, sono sistematicamente confrontate con l'approccio Rainflow nel dominio del tempo, assunto come riferimento.

Automotive / 356

Framework Simulativo per la Quantificazione di Danni Materiali e Rischio Lesivo in Scenari Incidentologici Reali

Authors: Giulio Vichi¹; Luigi Di Lillo²; Michelangelo-Santo Gulino³; dario vangi⁴

¹ *Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Firenze*

² *Swiss Reinsurance*

³ *Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Firenze*

⁴ *università di Firenze*

Corresponding Authors: dario.vangi@unifi.it, luigi_dilillo@swissre.com, michelangelosanto.gulino@unifi.it, giulio.vichi1@unifi.it

La gestione degli incidenti stradali rappresenta attualmente una sfida per il settore assicurativo, che si trova a dover affrontare costi elevati legati sia ai danni materiali ai veicoli (Property Damage, PD) sia alla probabilità di lesioni personali agli occupanti (Injury Risk, IR). La possibilità di stimare in modo accurato il costo complessivo di un incidente è fondamentale per sviluppare politiche assicurative più efficienti e personalizzate, che incentivino l'adozione di veicoli con caratteristiche avanzate di sicurezza. Questo lavoro si propone di fornire soluzioni innovative per il settore assicurativo, combinando la simulazione degli impatti stradali con metodi di valutazione di IR e PD.

Si presenta dapprima uno strumento di simulazione capace di analizzare qualsiasi configurazione d'impatto tra due auto e di stimare sia PD che IR per tutti i partecipanti coinvolti. Considerando come rappresentativo un veicolo con massa media tra tutti quelli circolanti in Europa nel 2022, si è dimostrato per vie simulate come impatti frontali e laterali sull'abitacolo risultino i più gravosi in termini di IR e PD. Simulando invece urti che coinvolgono più di 400 modelli di veicoli nelle configurazioni d'impatto più frequenti, è stato creato un ranking dei veicoli più virtuosi. In tali contesti, la velocità relativa tra i veicoli gioca un ruolo cruciale nella severità degli impatti: a parità di punto iniziale d'urto, il centro dell'impatto si sposta durante la fase di collisione in funzione della velocità relativa, provocando una modifica sensibile all'eccentricità dell'impatto e quindi all'IR.

Infine, tramite i medesimi strumenti simulativi si sono valutati i benefici ottenibili dall'integrazione di sistemi avanzati di assistenza alla guida (ADAS) come la frenata autonoma d'emergenza. L'analisi di casi studio reali con cinematica di pre-urto nota ha evidenziato come l'adozione di ADAS possa migliorare la sicurezza stradale (fino a -25% in IR) e ridurre i costi di riparazione dei veicoli (fino a -60% in PD).

Automotive / 363

Sviluppo di una metodologia numerica per l'analisi cinematica ed elastoidrodinamica di un sistema di distribuzione a camma e bilanciere a dito per motori ad alte prestazioni

Author: Davide De Battisti¹

Co-authors: Fabio Renso ¹; Marco Spagnuoli ²; Matteo Giacomini ³; Valerio Mangeruga ⁴

¹ *Università di Modena e Reggio Emilia*

² *Automobili Lamborghini SpA*

³ *Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" - Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia*

⁴ *Università degli studi di Modena e Reggio Emilia*

Corresponding Authors: valerio.mangeruga@unimore.it, marco.spagnuoli@lamborghini.com, davide.debattisti@unimore.it, matteo.giacomini@unimore.it, fabio.renso@unimore.it

Nei moderni motori a combustione interna a quattro tempi, il sistema di distribuzione è uno dei sottosistemi chiave che regolano il processo di ricambio della carica all'interno del cilindro e, conseguentemente, le prestazioni, l'efficienza e le emissioni del motore. Ad alti regimi di rotazione, il comportamento dinamico della distribuzione diventa sempre più complesso, poiché i carichi inerziali, la pressione di contatto e il regime di lubrificazione possono influenzare in modo critico le leggi di moto, le perdite meccaniche e l'usura dei componenti. Per far fronte a queste sfide, sono state proposte diverse architetture di azionamento delle valvole, con l'obiettivo di superare le limitazioni intrinseche dei tradizionali schemi ad aste e bilancieri e delle soluzioni ad azionamenti diretto. In particolare nei motori ad alte prestazioni in cui dimensioni compatte, elevata capacità di alzata delle valvole e un funzionamento affidabile ad alta velocità sono essenziali. Una delle soluzioni più usate è l'architettura a camma e bilanciere a dito (cam-finger follower), la quale è stata presa in esame in questo lavoro in virtù della sua minore massa traslante equivalente e della sua capacità di fornire alzate valvola

superiori mantenendo geometrie della camma più compatte. Inoltre, l'interfaccia camma-bilanciere costituisce un caratteristico contatto elastoidrodinamico non conforme, nel quale il mantenimento di un meato lubrificante continuo sull'intero ciclo operativo è fondamentale per evitare il contatto diretto e l'usura prematura delle superfici.

L'obiettivo del presente studio è sviluppare una metodologia numerica in grado di valutare il comportamento cinematico del sistema al variare dei suoi principali parametri di progetto, nonché di stimare le forze di contatto e la velocità di trascinamento (entrainment velocity), parametro essenziale ai fini della lubrificazione. Successivamente, è stata condotta un'analisi elastoidrodinamica del contatto camma-bilanciere avvalendosi di un codice numerico agli Elementi Finiti.

A seguito di un'estesa revisione della letteratura, è stato sviluppato un modello cinematico su foglio di calcolo per valutare il profilo geometrico della camma, l'alzata della valvola, la velocità di trascinamento e per fornire una stima preliminare delle forze di contatto. Per validare tale metodologia, è stato sviluppato un modello multibody della distribuzione a camma e bilanciere a partire da un'architettura esistente utilizzando il software Excite Power Unit. I componenti sono stati discretizzati e ridotti mediante il metodo di Craig-Bampton, per poi essere assemblati come corpi flessibili interconnessi da giunti non lineari. Il modello è stato validato confrontandolo con misurazioni sperimentali acquisite a diversi regimi di rotazione del motore. In seguito, i valori ricavati precedentemente sono stati impiegati come dati di input per un codice agli Elementi Finiti dedicato all'analisi elastoidrodinamica dei contatti non conformi, al fine di stimare la distribuzione della pressione e l'evoluzione dello spessore minimo del meato lungo l'intero ciclo. Questo approccio integrato combina l'analisi cinematica e i calcoli EHL, consentendo la valutazione delle condizioni di lubrificazione locale in qualunque punto del ciclo di funzionamento del motore.

I risultati mostrano che il comportamento tribologico del contatto è fortemente dipendente dalla cinematica locale del meccanismo, la quale a sua volta determina la velocità di trascinamento istantanea. Sono stati individuati specifici intervalli angolari critici nei quali la concomitanza di carichi elevati e di una ridotta velocità di trascinamento determina una diminuzione dello spessore del film lubrificante, portando il sistema a operare in condizioni di lubrificazione peggiori. In tali regioni, la riduzione della portanza idrodinamica favorisce un maggiore contributo del contatto diretto, con conseguente incremento dell'attrito e dei fenomeni di usura. In particolare, è opportuno evitare l'inversione di segno della velocità di trascinamento, poiché in tale condizione viene ampliata la porzione di ciclo in cui il contatto lavora in regime di lubrificazione misto o limite. L'identificazione preventiva delle condizioni operative più critiche costituisce quindi un passaggio essenziale nella fase di progettazione preliminare, in quanto consente di escludere configurazioni geometriche e cinematiche potenzialmente penalizzanti sotto il profilo tribologico.

Automotive / 364

On the Press-Fit-Induced Rotation of the Crankpin Axis in Built-Up Crankshafts

Authors: Matteo Giacomini¹; Enrico Bertocchi¹; Valerio Mangeruga¹; Saverio Giulio Barbieri²

Co-authors: Sara Mantovani³; Andrea Baldini¹; Mauro Giacalone⁴

¹ Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia - Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari"

² Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari"

³ Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia - Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" - Laboratorio MilleChili

⁴ Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia - Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" - Laboratorio MilleChili

Corresponding Authors: mauro.giacalone@unimore.it, sara.mantovani@unimore.it, andrea.baldini@ferrari.com, matteo.giacomini@unimore.it, saveriogulio.barbieri@unimore.it, valerio.mangeruga@unimore.it, ebortocchi@unimore.it

Negli alberi a gomiti scomponibili per motori a combustione interna, il montaggio a interferenza del perno di biella nelle maschette costituisce una soluzione costruttiva consolidata. Esempi applicativi di questa architettura si riscontrano nei piccoli motori motociclistici e, più in generale, nei motori a due tempi ad alte prestazioni. Il forzamento richiesto è spesso molto elevato per garantire la trasmissione di coppia ed evitare scorrimenti relativi tra le parti che ne comprometterebbero il funzionamento. Di conseguenza, si introduce uno stato tensionale molto severo e una deformazione locale della sede che può compromettere la geometria finale dell'assieme. In particolare, l'esperienza applicativa mostra che, dopo il forzamento, l'asse del perno può presentare una distorsione rispetto alla configurazione nominale. Sebbene il problema del forzamento cilindrico sia ampiamente noto,

l'origine di tale rotazione non è immediatamente spiegabile con i modelli assialsimmetrici classici, che non colgono gli effetti tridimensionali della reale geometria del collegamento.

Il lavoro propone una interpretazione meccanica del fenomeno e ne sviluppa una quantificazione numerica mediante analisi agli Elementi Finiti tridimensionali. I primi riscontri numerici evidenziano che, nel collegamento tra perno e mascheretta, la pressione di contatto non sia uniforme lungo la direzione assiale del foro. Nel collegamento in esame, il perno di biella è forzato nelle due mascherette e risulta a filo rispetto alle superfici esterne, mentre il tratto compreso tra le mascherette resta libero per l'alloggiamento della biella. In tali condizioni, la distribuzione della pressione di contatto lungo l'asse della sede non è uniforme: in prossimità del bordo interno della mascheretta si manifesta infatti un picco locale di pressione. Tale gradiente assiale produce una deformazione radiale della sede anch'essa non uniforme assialmente, maggiore nella zona del picco di pressione. Inoltre, la geometria della mascheretta è intrinsecamente asimmetrica, soprattutto per la presenza del ligament, porzione superiore di materiale compresa tra la sede del perno e il bordo esterno della mascheretta. Di conseguenza, la rigidità della mascheretta risulta non uniforme tra la zona superiore e quella inferiore rispetto al perno. Tale asimmetria, combinata con il gradiente assiale di pressione, induce una rotazione globale dell'asse della sede. Ne consegue che l'asse del perno, a seguito del forzamento, risulta non più parallelo all'asse di rotazione dell'albero a gomiti, con possibili ripercussioni sul corretto funzionamento del sistema.

Per analizzare nel dettaglio questo problema è stato sviluppato un modello FEM parametrico dell'interferenza tra perno di biella e mascheretta, finalizzato a studiare la sensibilità del fenomeno rispetto ai principali parametri geometrici e costruttivi. In particolare, vengono analizzati diversi rapporti dimensionali tra perno e mascheretta, differenti valori di interferenza, diverse configurazioni del perno in termini di cedevolezza, nonché diversi spessori del ligament. Il perno è considerato sia come componente deformabile, in configurazione piena o cava, sia nel limite di rigidità infinita, assunto come riferimento asintotico. Le simulazioni consentono di mettere in relazione la rotazione dell'asse con i parametri geometrici analizzati e di costruire grafici di progetto utilizzabili in fase di dimensionamento o verifica.

Su questa base vengono inoltre discusse alcune possibili strategie di mitigazione del fenomeno. Una prima soluzione consiste nell'introduzione di una gola frontale in prossimità del foro, con lo scopo di ridurre il picco locale di pressione e riequilibrare la cedevolezza della mascheretta nella zona inferiore. Una seconda soluzione consiste nell'inclinare opportunamente l'asse della sede in fase di lavorazione, in modo da compensare l'inclinazione generata dall'interferenza durante il montaggio. Tale approccio richiede però una previsione affidabile dell'angolo indotto, poiché una compensazione eccessiva potrebbe produrre un effetto opposto. Una terza possibilità è rappresentata dalla profilatura della superficie interna della sede, soluzione più complessa dal punto di vista produttivo ma potenzialmente efficace nel rendere più regolare la distribuzione assiale delle pressioni di contatto.

Il contributo del lavoro propone una chiave interpretativa fisicamente consistente per un fenomeno osservato nella pratica motoristica. Inoltre, fornisce strumenti numerici e criteri progettuali utili sia alla previsione della rotazione dell'asse del perno, sia alla sua compensazione o riduzione mediante opportune modifiche geometriche del collegamento.

Automotive / 382

A Holistic Multi-Objective Framework for the Optimal Design of Vehicle Subsystems

Authors: Massimiliano Gobbi¹; Giampiero Mastinu¹; Federico Ballo¹; Giorgio Previati¹; Pietro Stabile¹; Giacomo Guidotti¹; Riccardo Malacrida¹

¹ Politecnico di Milano

Corresponding Authors: federicomaria.ballo@polimi.it, gianpiero.mastinu@polimi.it, massimiliano.gobbi@polimi.it, giorgio.previati@polimi.it, riccardo.malacrida@polimi.it, pietro.stabile@polimi.it, giacomo.guidotti@polimi.it

Optimal design of vehicle subsystems has progressively evolved toward multidisciplinary and multi-objective approaches, in which mechanical architecture, control design, structural efficiency, and energy performance are addressed within a unified framework. This perspective is consistently adopted in the development of advanced road-vehicle subsystems, with particular emphasis on suspensions, vehicle control systems and electric powertrains.

In suspension design, RL multi-objective elasto-kinematic optimization methods can be applied to identify solutions capable of balancing competing requirements, such as ride comfort, handling and

robustness against parameters uncertainties. Another important research direction concerns urban electric mobility and quadricycles, where the vehicle should be conceived as an integrated system in which lightweight construction, suspension configuration, energy consumption, and powertrain sizing must be optimized concurrently. Studies on ultra-efficient electric vehicles and urban quadricycles show that reducing energy demand while ensuring functional performance can only be achieved through the concurrent co-design of structural components, driving strategy, and propulsion systems.

Integrated optimization strategies make it possible to capture the strong interdependence among mechanical design, control, and energy efficiency. This approach therefore provides a rigorous foundation for the development of vehicles that are safer, lighter, and more sustainable.

Automotive / 383

Innovative Tyre Testing Platforms and Measurement Systems for Vehicle Applications

Authors: Massimiliano Gobbi¹; Gianpiero Mastinu¹; Pietro Stabile^{None}; Alessio Biffi¹; Federico Ballo¹

¹ *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: federicomaria.ballo@polimi.it, alessio.biffi@polimi.it, pietro.stabile@polimi.it, gianpiero.mastinu@polimi.it, massimiliano.gobbi@polimi.it

Tyre testing plays a crucial role in automotive engineering, since the predictive capability of handling, ride, durability, and safety models strongly depends on the tyre behaviour. Tyre testing has to be addressed as a rigorous methodological framework aimed at measuring forces, moments, stiffness properties, rolling losses, and critical operating conditions through both dedicated indoor facilities and instrumented in-field vehicles.

The development of innovative test rigs and measuring devices capable of extending the experimental observation of tyre behaviour is required. Early research work focused on six-axis measurement systems for identifying the forces and moments transmitted at the wheel hub. Subsequent studies demonstrated the feasibility of directly measuring tyre-road interaction through proprietary measuring wheels for farm tractors and through smart wheels for motorcycles, thus enabling the acquisition of tyre characteristics under realistic combined operating conditions.

More recent developments are test platforms such as MoLAS designed to provide a more comprehensive characterization of tyres, overcoming limitations of traditional outdoor facilities. In parallel, related studies on rolling resistance and tyre-rim interaction show that tyre testing has to be an integrated process linking measurement and model development and calibration.

Advanced tyre testing must combine accurate sensing, carefully designed experimental rigs, and physically grounded modelling tools in order to supply reliable data for vehicle dynamics analysis and subsystems optimization. Such an approach is essential for the development of safer, more efficient, and more robust vehicles across automotive, motorcycle, agricultural, and lightweight mobility applications.

Automotive / 384

Assessing Driver Acceptance of Advanced Vehicle Technologies Through Driving Simulators

Authors: Massimiliano Gobbi¹; Gianpiero Mastinu¹; Giorgio Previati¹; Lorenzo Uccello¹; Samuele Giacintucci¹

¹ *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: gianpiero.mastinu@polimi.it, samuele.giacintucci@polimi.it, massimiliano.gobbi@polimi.it, giorgio.previati@polimi.it, lorenzo.uccello@polimi.it

User acceptance by human drivers in a driving simulator is a critical prerequisite for the reliable assessment of innovative automotive technologies. User acceptance is addressed within a human-in-the-loop framework in which the subsystem behaviour, simulator fidelity, and driver response are treated as correlated quantities. DriSMi dynamic driving simulator at Politecnico di Milano was conceived not only for the virtual testing of vehicle components and ADAS prior to physical prototyping, but also for the experimental characterization of driver behaviour, ergonomics, and safety under controlled yet realistic traffic scenarios.

Within this perspective, user acceptance is interpreted in a multicriteria framework defined by perceived safety, controllability, workload, and trust in the simulated vehicle response, rather than as a purely subjective judgement. Experimental studies conducted within DriSMi on L4 vehicles take-over scenarios show that the interaction between drivers and vehicle functions can be evaluated through the combined analysis of behavioural, subjective, and psychophysiological measures. The simulator infrastructure itself supports this approach through active control interfaces and dedicated systems for monitoring driver's hand forces, gaze, and physiological reactions, thereby enabling a rigorous assessment of how human drivers perceive and accept advanced vehicle subsystems. To increase the active safety of road vehicles to reduce fatalities, the global stability of the motion of road vehicles with a human or a non-human driver must be studied. The typical nonlinear behaviors of vehicle-and-driver subject to disturbances like evasive steering maneuvers, wind gust, pot-hole excitation and so on can be studied.

Automotive / 385

Experimental Characterization and Modelling of Bicycles for Safety, Efficiency, and Performance

Authors: Federico Ballo¹; Gianpiero Mastinu¹; Giorgio Previati¹; Massimiliano Gobbi¹

¹ *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: gianpiero.mastinu@polimi.it, federicomaria.ballo@polimi.it, massimiliano.gobbi@polimi.it, giorgio.previati@polimi.it

Bicycle engineering increasingly requires a rigorous integration of experimental methods, modelling techniques, and design-oriented interpretation in order to improve safety, efficiency, and dynamic performance. Experimental characterization of bicycle tyres, which are treated as key subsystems governing stability, handling, rolling efficiency, and rider safety is outmost important. Bicycle dynamics cannot be reliably assessed without accurate measurements of tyre properties under representative operating conditions, including variations in vertical load, inflation pressure, camber angle, and slip. New indoor facilities were designed to measure rolling resistance and lateral tyre characteristics with a level of control and repeatability not achievable in conventional road testing.

These experimental platforms provided a sound basis for the calibration of physically meaningful models. The resulting method supports not only the analysis of racing and urban bicycles, but also the study of electric bicycles, whose wider load variability makes tyre characterization especially important. Recent studies extend this framework to thermal effects, showing that tyre temperature substantially influences mechanical response and therefore bicycle handling.

In this sense, the bicycle is addressed not merely as a lightweight vehicle, but as a coupled mechanical system in which tyre behaviour, operating conditions, and vehicle dynamics must be investigated concurrently for the design of safer, more efficient, and better-performing bicycles.

Automotive / 395

Mesh-Free CAD-Based Isogeometric Vibro-Acoustic Analysis for Automotive NVH Applications

Author: Tommaso Landi¹

Co-authors: Christophe Hoareau ²; Jean-François Deü ²; Roberto Citarella ¹; Roger Ohayon ²

¹ *Università degli Studi di Salerno*

² *Conservatoire national des arts et métiers*

Corresponding Authors: jean-francois.deu@lecnam.fr, tlandi@unisa.it, christophe.hoareau@lecnam.net, rcitarella@unisa.it, roger.ohayon@lecnam.net

The accurate prediction of vibro-acoustic behavior in complex engineering systems, particularly in the automotive NVH (Noise, Vibration, and Harshness) context, remains a challenging task due to the geometric complexity and the need for high-fidelity numerical models. Traditional finite element approaches require time-consuming mesh generation and often introduce geometric approximation errors when transitioning from CAD models to analysis-suitable discretizations.

In this work, a novel isogeometric analysis (IGA) framework is presented to perform vibro-acoustic simulations directly from CAD geometries, effectively bypassing the need for conventional meshing procedures. The proposed approach relies on an immersed methodology in which the acoustic cavity is reconstructed from the original CAD representation and embedded into a structured computational domain. Hierarchical B-Spline basis functions are employed to enable local refinement, maintain geometric exactness, and ensure high-order continuity, which is particularly beneficial for wave propagation problems.

The vibro-acoustic coupling is achieved through a consistent interaction between the acoustic domain and structural components modeled as shell elements, allowing for an accurate representation of fluid-structure interaction phenomena. This integrated framework supports efficient handling of complex geometries and provides numerical stability and accuracy compared to standard approaches.

The methodology is applied to an automotive case study, focusing on the vibro-acoustic response of a vehicle cabin derived directly from CAD data. Results demonstrate the capability of the proposed method to capture relevant acoustic modes and structural coupling effects while significantly reducing preprocessing effort. The approach shows strong potential for industrial NVH applications, where rapid design iterations and high geometric fidelity are essential.

Automotive / 400

Biocompositi prestazionali per l'automotive: approccio integrato multi-scala tra materiali, processo e progettazione

Author: Giuseppe Lamanna¹

Co-authors: Alessandro De Luca²; Amelia Felaco³; Constantin G. Opran⁴; Francesco Caputo⁵

¹ *Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli"*

² *Università della Campania Luigi Vanvitelli, Dipartimento di Ingegneria*

³ *Università degli studi della campania luigi vanvitelli*

⁴ *National University of Science and Technology POLITEHNICA Bucharest*

⁵ *Università della Campania Luigi Vanvitelli*

Corresponding Authors: giuseppe.lamanna@unicampania.it, alessandro.deluca@unicampania.it, amelia.felaco@unicampania.it, constantin.opran@upb.ro, francesco.caputo@unicampania.it

La crescente pressione normativa e ambientale volta alla riduzione delle emissioni di CO₂ e del consumo di risorse non rinnovabili sta accelerando lo sviluppo di materiali alternativi nel settore automotive e dei veicoli commerciali. In questo contesto, i biocompositi rappresentano una soluzione promettente; tuttavia, la loro reale sostenibilità e applicabilità industriale dipendono da molteplici fattori, tra cui prestazioni meccaniche, qualità estetica, durabilità, costi produttivi e compatibilità con processi industriali su larga scala. Inoltre, l'introduzione di tali materiali richiede il ripensamento delle metodologie progettuali tradizionali, in funzione delle peculiarità dei materiali biobased e della loro sensibilità alle condizioni di processo ed esercizio.

Il presente studio propone un approccio integrato per lo sviluppo e l'applicazione di biocompositi

a matrice polimerica con significativa frazione derivante da fonti rinnovabili, destinati alla realizzazione di componenti interni ed esterni di veicoli, inclusi elementi non a vista, estetici e con parziali funzioni strutturali. Le soluzioni investigate comprendono matrici termoplastiche riciclate, sistemi polimerici biobased ibridi non biodegradabili e formulazioni parzialmente o totalmente biodegradabili, additivate con cariche di origine naturale o ibrida. L'obiettivo è ottenere prestazioni comparabili ai materiali convenzionali in termini di resistenza meccanica, qualità superficiale, leggerezza e stabilità nel tempo.

La metodologia adottata integra selezione e formulazione dei materiali, caratterizzazione sperimentale, ottimizzazione dei processi produttivi e modellazione numerica avanzata. Per componenti reali attualmente in produzione vengono definite specifiche prestazionali e sviluppate campagne sperimentali dedicate alla verifica dei requisiti e alla valutazione del comportamento in condizioni operative realistiche. Parallelamente, sono implementati modelli numerici basati su analisi agli elementi finiti e tecniche multibody, combinati con strategie Design of Experiments per l'analisi dei parametri di processo e la riduzione della variabilità prestazionale. Tale integrazione consente una progressiva virtualizzazione delle procedure di progettazione e produzione, con conseguente riduzione di tempi e costi di sviluppo.

Automotive / 403

Sviluppo di una Metodologia Analitico-Numerica per l'Analisi Strutturale dei Rotori di Motori Elettrici Sincroni a Magneti Permanenti Superficiali

Author: Saverio Giulio Barbieri¹

Co-author: Davide Oldoini¹

¹ *Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari"*

Corresponding Authors: davide.oldoini@unimore.it, saveriogulio.barbieri@unimore.it

I motori elettrici sincroni a magneti permanenti superficiali (Surface Permanent-Magnet Synchronous Motors, SPMSM) costituiscono oggi una soluzione di riferimento in molte applicazioni ad alte prestazioni, inclusa la trazione elettrica per veicoli, grazie ad elevata efficienza, alta densità di coppia e di potenza, compattezza e buone prestazioni dinamiche. Al tempo stesso, la collocazione dei magneti sul bordo esterno del rotore introduce criticità strutturali rilevanti: ai regimi elevati, le forze centrifughe tendono infatti a espellere radialmente i magneti, generando deformazioni nel rotore, nei magneti e negli eventuali strati adesivi, oltre a concentrazioni di tensione che possono compromettere sia l'integrità meccanica del sistema sia le prestazioni elettromagnetiche della macchina. Il presente lavoro ha quindi l'obiettivo di sviluppare una metodologia analitico-numerica per il calcolo strutturale di rotor SPMSM, capace di descrivere in modo affidabile tensioni e spostamenti, mantenendo al tempo stesso tempi di calcolo compatibili con un utilizzo in fase di progettazione preliminare.

La metodologia proposta nasce da una formulazione analitica sviluppata in ambiente Maple, basata sulla teoria dell'elasticità piana e sull'impiego della funzione di tensione di Airy. Il campo tensionale viene rappresentato mediante una base armonica in coordinate polari, dalla quale si ricavano sia le tensioni sia gli spostamenti. La formulazione completamente simbolica, pur rigorosa dal punto di vista teorico, risulta tuttavia molto onerosa dal punto di vista computazionale quando si introducono un numero elevato di armoniche e condizioni al contorno geometricamente complesse. Per questo motivo il modello è stato successivamente tradotto in MATLAB in forma semianalitica: la struttura teorica del problema, basata sulla funzione di tensione di Airy e sulla rappresentazione armonica dei campi tensionali e di spostamento, viene mantenuta in forma analitico-simbolica. L'imposizione delle condizioni al contorno sulla frontiera reale e la risoluzione del sistema risultante vengono invece trattate numericamente, mediante assemblaggio puntuale e soluzione in senso least-squares.

Il rotore viene modellato come un anello esterno non assialsimmetrico, caratterizzato da lobature interne periodiche che permettono di rappresentare in modo più realistico sia la distribuzione di massa sia la rigidità strutturale associata ai raccordi interni. Sul modello agiscono tre contributi principali: il carico esterno associato ai magneti, il carico di campo dovuto all'accelerazione centripeta del materiale rotorico e il contributo elastico dei collegamenti interni, modellati come molle radiali. Sia il carico dei magneti sia quello delle molle vengono descritti tramite distribuzioni armoniche fortemente localizzate, così da approssimare azioni concentrate pur rimanendo compatibili con la formulazione di Airy. L'impostazione si colloca nel solco di precedenti metodologie semplificate per

l'analisi strutturale dei rotori, nelle quali il confronto con lo stesso modello agli Elementi Finiti è usato come riferimento di validazione.

La procedura sviluppata consente di descrivere in modo efficace il comportamento strutturale di un rotore SPMSM con geometria interna lobata, cogliendo il ruolo combinato della distribuzione di massa, del carico centrifugo, del carico esterno dei magneti e dell'azione elastica dei collegamenti interni. Il confronto con un modello agli Elementi Finiti costruito sulle stesse ipotesi di carico e di vincolo ha mostrato un buon accordo nella stima delle tensioni e degli spostamenti per le configurazioni semplificate considerate, confermando la correttezza dell'impostazione. In particolare, il modello semianalitico si è dimostrato capace di riprodurre con buona accuratezza il contributo dei carichi distribuiti esterni, del carico centrifugo di volume e del contributo elastico localizzato associato alle molle di richiamo. Il passaggio dalla formulazione completamente simbolica alla versione MATLAB ha inoltre consentito una netta riduzione dei tempi di calcolo, rendendo possibile l'esecuzione di analisi parametriche su armoniche di carico, rigidità dei collegamenti, geometria del rotore e condizioni operative. Successivamente, la procedura è stata confrontata anche con un modello agli Elementi Finiti del rotore realmente realizzato: i risultati hanno mostrato un'accettabile somiglianza nella distribuzione tensionale, nonostante il componente reale introduca dettagli e feature geometriche locali che non possono essere rappresentati fedelmente dalla formulazione analitica.

Il lavoro mostra come una metodologia semianalitica basata sulla funzione di Airy possa costituire un efficace strumento intermedio tra i modelli analitici chiusi e le simulazioni agli Elementi Finiti complete per l'analisi strutturale di rotori SPMSM. Pur non conducendo a formule semplici direttamente implementabili in strumenti di calcolo elementari, il modello sviluppato conserva una buona interpretabilità fisica e permette di analizzare rapidamente l'influenza dei principali parametri di progetto su tensioni e spostamenti. La procedura risulta quindi particolarmente adatta come supporto alla progettazione preliminare e all'analisi parametrica, offrendo un compromesso favorevole tra accuratezza, rapidità di calcolo e leggibilità ingegneristica, pur confermando la necessità del modello agli Elementi Finiti completo quando si vogliono descrivere con pieno dettaglio le discontinuità geometriche del componente reale.

Automotive / 422

A Multi-Objective Deep Reinforcement Learning Controller for E-Bike Front-Wheel Anti-Lock Braking

Authors: Andrea Tonoli¹; Luis Miguel Castellanos Molina¹

¹ *Politecnico di Torino*

Corresponding Authors: luis.castellanos@polito.it, andrea.tonoli@polito.it

Objective

The primary goal of this work is to develop a Deep Reinforcement Learning (DRL)-based Antilock Braking System (ABS) controller specifically optimized for e-bike front-wheel braking. The system aims to:

- Minimize stopping distance while preserving directional stability and preventing hazardous front-wheel lockups.
- Eliminate the need for explicit, real-time longitudinal slip estimation and reduce reliance on noisy or delayed vehicle speed estimates, making it ideal for resource-constrained, low-cost e-bike sensor suites.

Methods

The proposed framework integrates advanced physical modeling, real-time state estimation, and a robust learning-based control policy:

- System Modeling: A comprehensive, nonlinear e-bike model was developed, capturing longitudinal motion, front-wheel rotational dynamics, vertical suspension, dynamic load transfer, and nonlinear tire-road interactions. This was combined with the unique dynamics of a pump-less ABS hydraulic architecture (hold/release solenoid valves, a check valve, and a volume-limited discharge accumulator) where braking pressure is constrained by rider input and accumulator saturation
- State Estimation: To ensure reliable wheel dynamics under asynchronous real-time constraints, a

hybrid Kalman-filter-based estimator was implemented. It blends encoder-based wheel speed measurements, filtered acceleration states, and event-driven tonewheel pulse updates into a computationally lightweight embedded architecture.

- **Control Policy & Training:** The controller utilizes a discrete-action Proximal Policy Optimization (PPO) agent with an actor-critic architecture. The actor maps a velocity-independent observation vector (vehicle deceleration, estimated wheel speed, estimated wheel acceleration, and caliper pressure) into three discrete actions: pressure release, hold, or reapply. The policy was trained in simulation using a multi-objective reward function balancing braking progress, stopping distance, and safety (penalizing wheel lockup and rollover risks). Longitudinal slip was utilized exclusively during training to guide the agent but omitted during deployment. Domain randomization of vehicle mass, center-of-gravity position, and tire-road friction coefficients was applied during training to guarantee controller robustness.

Results

Simulation testing validated the efficacy of the DRL-based controller, demonstrating:

- Effective pressure modulation and robust wheel-lock prevention across highly diverse riding scenarios.
- Near-optimal friction utilization accomplished entirely without explicit real-time slip feedback.
- High adaptability to varying loading conditions, distinct rider profiles, and fluctuating road surface friction coefficients.

Conclusion

The proposed DRL architecture delivers a sensor-minimal, computationally efficient, and highly adaptive front-wheel ABS solution. By successfully mitigating the hardware limitations inherent to micro-mobility vehicles—such as limited pressure authority and low-cost sensing—this approach establishes a viable, scalable framework for significantly enhancing e-bike safety.

Automotive / 428

Methodologies in the use of Human Body Models for passive safety of vehicles

Author: Stefano Tomassi¹

Co-author: Alessandro Scattina¹

¹ Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

Corresponding Authors: stefano.tomassi@polito.it, alessandro.scattina@polito.it

Vehicles for transport of people have become safer since their birth, in particular in the last years. However, the safety level of vehicles is far from satisfying the EU plans to reach zero road deaths by 2050, the so called “Vision Zero” global strategy. The Finite Element (FE) simulation of accidents is a key instrument for the design of safer new vehicles, allowing faster and more detailed investigation. Moreover, Human Body Models (HBMs) allow more detailed injury analysis in several conditions, not carried out with expensive and time demanding experimental tests.

In this framework, the target of this work is to analyze different methodologies in the use of HBMs. The main challenges are in the pre-processing phase, during the positioning of the body inside the vehicles and in the post-processing phase. In the analysis of the results, it is necessary to obtain clear results, easy to read and accessible to people with different expertise. Moreover, the post-processing phase can be highly time-consuming, considering the complexity of the HBMs and the amount of information that can be examined. Therefore, in detail, the target of this work is the comparison between some methodologies that can be used for the positioning of the HBMs, in the pre-processing phase, and in the analysis and visualization of the results, in the post-processing phase.

For the positioning, two different methodologies were tested, simulating a small rotation of the head. The movement was defined with reference to postures that the occupants can have during autonomous driving. The simulations were repeated using two different HBMs, namely THUMS and VIVA.

For the injury evaluation in the post-processing phase, after defining the injuries to be evaluated and how to measure them, a procedure was developed to get the strain of the neck muscles, cervical ligaments and intervertebral discs in automatic way. Injuries on these three anatomical components

are the main cause of pain generation following an accident, according to the literature. The results of the previous simulations on the two HBMs were used for this task.

The comparison of the positioning methodologies, confirmed as the simulation-based methods are more time-consuming but more accurate, ensuring more affordable FE models.

The analysis of the strain of the neck muscles, cervical ligaments and intervertebral discs, showed the difference between the two HBMs models and the influence of a small movement of a body region in the injury evaluation.

The work provides guidelines for researchers and FE analysts who want to use HBMs in an efficient way, reducing the time for the set-up of the FE analysis and obtaining clear results with a short time post-processing phase.

Automotive / 320

Valutazione di lubrificanti bio-based da Waste Cooking Oil per collegamenti filettati in ambito automotive

Authors: Gianmarco Milan¹; Mattia Mele²

Co-authors: Dario Croccolo ¹; Ester D'Accardi ³; Giorgio Olmi ⁴; Massimiliano De Agostinis ²; Stefano Fini ²; Umberto Galietti ³

¹ DIN - Dipartimento di Ingegneria Industriale

² University of Bologna

³ Politecnico di Bari

⁴ Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN), Università di Bologna

Corresponding Authors: m.deagostinis@unibo.it, ester.daccardi@poliba.it, giorgio.olmi@unibo.it, umberto.galietti@poliba.it, mattia.mele@unibo.it, stefano.fini@unibo.it, gianmarco.milan@unibo.it, dario.croccolo@unibo.it

Il lavoro presenta le attività di ricerca svolte sui collegamenti filettati in ambito automotive, con particolare riferimento al progetto REOBTAIN, finalizzato alla valutazione di lubrificanti ottenuti da Waste Cooking Oil (WCO) per applicazioni strutturali nel veicolo. L'obiettivo è verificare se lubrificanti derivati da fonti rinnovabili possano rappresentare un'alternativa tecnicamente valida ai prodotti minerali convenzionali, sia in termini di comportamento al serraggio sia di resistenza al vibration loosening. Il caso studio selezionato riguarda le viti di biella, componente altamente critico per il motore, e per il quale il controllo del precarico e della stabilità del giunto risulta essenziale.

Dal punto di vista metodologico, il WCO è stato inizialmente sottoposto a filtrazione e disidratazione, quindi trasformato secondo due differenti strategie chimiche, idrogenazione ed epossidazione con successivo ring-opening, al fine di incrementarne la stabilità ossidativa e modularne le proprietà tribologiche. I lubrificanti ottenuti sono stati dapprima caratterizzati tramite prove tribologiche Pin-on-Disk su materiali rappresentativi del contatto vite-biella, ricavando le curve di Stribeck e i coefficienti di attrito. Sulla base di questo screening sono stati selezionati tre formulati di origine vegetale promettenti: WCO pretrattato, Poliolo 100 e WCO idrogenato solido. Questi sono stati successivamente confrontati con un benchmark industriale costituito da un grasso a base di MoS₂ mediante prove sperimentali di serraggio su un banco Kistler, in grado di misurare tiro, coppia di serraggio e coppia sul dado, e mediante test di vibration loosening al banco Junker, imponendo eccitazioni trasversali controllate al giunto serrato. A valle delle prove di serraggio, le superfici sono state inoltre analizzate con microscopia ottica, SEM e topografia 3D per la valutazione dell'usura. In prospettiva di monitoraggio strutturale, è stata anche investigata una tecnica di misura dell'allentamento basata su ultrasuoni non lineari.

I risultati mostrano che il grasso benchmark mantiene, nelle prove di serraggio, il comportamento più stabile e i livelli di usura più contenuti. Tuttavia, tra i lubrificanti bio-based, il Poliolo 100 evidenzia prestazioni particolarmente promettenti, con attrito stabile e usura comparabile al riferimento industriale. L'aspetto più rilevante emerge nelle prove di vibration loosening, nelle quali il Poliolo 100 si dimostra nettamente il lubrificante migliore in termini di capacità di mantenere il precarico

al crescere del numero di cicli, superando non solo gli altri formulati ottenuti da WCO, ma anche i lubrificanti industriali correntemente impiegati.

In conclusione, lo studio ha mostrato che la conversione di oli vegetali esausti in lubrificanti per collegamenti filettati è tecnicamente perseguibile. Tra i prodotti analizzati, il Poliolo 100 è risultato il candidato più promettente, soprattutto per la capacità di preservare il precario sotto eccitazione trasversale, pur in presenza di un benchmark ancora più efficace nel solo serraggio. I risultati ottenuti indicano quindi che i lubrificanti WCO-based meritano ulteriore sviluppo per applicazioni automotive ad alta criticità e che il monitoraggio ultrasonoro non lineare può rappresentare un supporto utile come tecnica di monitoraggio non distruttivo per rilevare l'allentamento del giunto.

Automotive / 339

Stima dei carichi a terra in veicoli a due ruote tramite strumentazione ibrida e utilizzo di tecniche di apprendimento automatico

Author: Michele Sgamma¹

Co-authors: Francesco Bucchi²; Francesco Frendo³; Walter Rosellini⁴

¹ *CISUP - Università di Pisa*

² *Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale - Università di Pisa*

³ *Università di Pisa*

⁴ *Piaggio & C. SpA*

Corresponding Authors: francesco.frendo@unipi.it, francesco.bucchi@unipi.it, michele.sgamma@cisup.unipi.it

I carichi derivanti dal contatto pneumatico-suolo nei veicoli a due ruote rappresentano un'informazione cruciale per la progettazione strutturale e funzionale basata su condizioni d'uso reali, poiché consente di collegare in modo quantitativo manovre, profili di missione e variabilità dell'ambiente stradale alle sollecitazioni effettivamente trasmesse a telaio e componenti. Ciò ha ricadute dirette sul dimensionamento a fatica dei componenti strutturali e dei sottosistemi veicolo, sulla taratura di sospensioni/freni e nelle valutazioni NVH. Nella pratica industriale, tali grandezze sono però difficili da ottenere in modo continuativo: le misure dirette richiedono una strumentazione "heavy" (sensori dedicati, componenti prototipali e procedure di calibrazione), che è tipicamente limitata a specifiche campagne sperimentali; da un'altra parte i sensori "light" installabili in modo diffuso (IMU, accelerometri, spostamenti sospensioni, velocità ruota, ecc.) forniscono dati difficilmente sintetizzabili, tramite modelli analitici, per la stima delle forze a terra. In questo contesto, il presente contributo discute un approccio che combina strumentazione e modellazione data-driven per la costruzione di un digital twin "load-oriented"; nella fase di sviluppo e validazione del modello viene adottata una strumentazione "ibrida", intesa come acquisizione sincrona di misure "heavy" e misure "light" in-service; tali dataset ad alta fedeltà, eventualmente ampliati con simulazioni multibody ottenute tramite modelli validati, sono quindi utilizzati per addestrare regressori basati su AI/NN, opportunamente vincolati sulla base di condizioni di equilibrio, in modo da apprendere la correlazione dai segnali "light" ai carichi a terra. In prospettiva, il digital twin così definito è in grado di operare con la sola strumentazione "light", consentendo stime rapide/quasi real-time dei carichi a terra durante l'uso del veicolo. La disponibilità di carichi stimati in esercizio permette la generazione di database di carico e profili missione realistici e, in combinazione con metodi di valutazione del danno efficienti (ad es. nel dominio della frequenza), supporta una progettazione più consapevole dei nuovi modelli di telaio, consentendo di evitare sovradimensionamenti e inutili sprechi. Oltre a ciò, tale approccio può risultare utile per strategie di monitoraggio quasi real-time orientate alla manutenzione predittiva, con potenziale riduzione di guasti inattesi.

Automotive / 399

Reduced Order Modeling of Automotive Crash Events via Proper Orthogonal Decomposition and Parametric Shape Morphing

Author: Marco Evangelos Biancolini¹

Co-authors: Andrea Baldini¹; Leonardo Geronzi²

¹ *Università di Roma Tor Vergata*

² *LivGemini srl*

Corresponding Authors: leonardo.geronzi@livgemini.com, biancolini@ing.uniroma2.it, andrea.baldini@uniroma2.it

Keywords: Crashworthiness; Reduced Order Models; Proper Orthogonal Decomposition; LS-DYNA; Mesh morphing; Time-dependent systems; Digital Twin; Virtual Reality

Objectives

Crash simulations based on explicit finite element solvers are widely used in the automotive industry to assess structural performance under impact conditions. However, their high computational cost limits their applicability in design exploration and real-time analysis. The objective of this work is to develop a reduced order modeling (ROM) framework for the rapid reconstruction of crash events, based on the combination of parametric geometry variation, high-fidelity simulations, and Proper Orthogonal Decomposition (POD) applied to time-dependent responses.

Methodology

The proposed approach builds upon a parametric generation of geometrical configurations using Radial Basis Function (RBF) mesh morphing, allowing simultaneous variation of component shape and thickness while preserving mesh quality. For each configuration, high-fidelity crash simulations are performed using an explicit solver, generating time histories of displacement and deformation fields. The transient response is sampled at selected time instants, and a POD is applied to the resulting dataset, treating each time frame as a snapshot. This procedure enables the extraction of dominant spatial modes associated with the crash dynamics. The temporal evolution is then represented in the reduced space, allowing the reconstruction of the full crash event through a limited number of modal coefficients. The resulting ROM can be queried to approximate the structural response for new configurations within the explored design space.

Results

The methodology is applied to an automotive crash case based on a parametrically morphed bonnet model. The results show that the proposed POD-based ROM is able to accurately reconstruct the deformation history of the structure with a significantly reduced computational cost compared to full explicit simulations. The approach captures the main deformation patterns and impact dynamics using a limited number of modes. Furthermore, the reduced representation enables fast visualization of the crash evolution, which can be exploited for interactive inspection of critical phenomena such as local penetrations and folding mechanisms.

Conclusions

The study demonstrates that the integration of parametric morphing, explicit crash simulations, and POD-based reduction provides an effective framework for the fast reconstruction of impact events. The proposed approach opens the way to real-time or near-real-time analysis of crash scenarios and supports advanced applications such as digital twins and immersive visualization environments. In particular, the reduced model can be integrated with virtual reality tools to enable frame-by-frame inspection of deformation mechanisms, offering new perspectives for design evaluation and decision-making in crashworthiness analysis.

Automotive / 432

Metodologia numerico-sperimentale per la modellazione tridimensionale completa di pneumatici in ambito automotive

Author: Francesco Cogliani¹

Co-authors: Matteo Giacomini²; Valerio Mangeruga³

¹ *Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia*

² *Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari" - Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia*

³ *Università degli studi di Modena e Reggio Emilia*

Corresponding Authors: 280664@studenti.unimore.it, valerio.mangeruga@unimore.it, matteo.giacomini@unimore.it

Obiettivi

Nel contesto dello sviluppo virtuale in ambito automotive, l'accuratezza delle simulazioni NVH (Noise, Vibration, and Harshness) e di dinamica globale del veicolo dipende in larga misura dalla corretta modellazione dell'interazione ruota-strada e quindi dalla corretta modellazione dello pneumatico. Data la complessità del componente, l'industria si affida tipicamente a modelli condensati di tipo "black box" forniti direttamente dai costruttori di pneumatici. Tali formulazioni, tuttavia, includono intrinsecamente anche la rigidità e la massa del cerchio ruota. Questo vincolo costringe i costruttori di veicoli (OEM) a condividere preliminarmente i dati CAD e lo stile dei cerchi con i fornitori, sollevando delicate criticità in termini di confidenzialità industriale e rendendo il modello rigido rispetto a variazioni di design. L'obiettivo di questo lavoro è sviluppare una metodologia FEM completa di pneumatico ("white box") tramite reverse engineering sperimentale. Tale modello mira a disaccoppiare l'analisi dello pneumatico da quella del cerchio, superando le restrizioni di confidenzialità dei modelli commerciali e offrendo, al contempo, uno strumento versatile per condurre analisi e studi di sensibilità al variare dello stile del cerchio e delle condizioni operative.

Metodi

La modellazione è stata supportata da una mirata campagna di caratterizzazione sperimentale sul componente fisico. Sono state condotte prove di trazione su provini estratti in diverse sezioni chiave, per ricavare le rigidità strutturali equivalenti delle zone dello pneumatico. In ambiente FEM, è stata adottata una tecnica di modellazione mista con elementi 2D e 3D che mima il processo produttivo, volta a simulare al meglio la specifica funzione meccanica delle singole strutture interne. Per definire il corretto stato tensionale di base, il modello è stato sottoposto a un'analisi statica non lineare, resa necessaria dalla natura complessa del componente e del caricamento, step propedeutico e fondamentale per la successiva estrazione modale.

Risultati

L'approccio sperimentale, unito alla modellazione mista 2D/3D, ha permesso di riprodurre fedelmente il componente sfruttando le sue caratteristiche ortotropiche ed implementando di conseguenza rigidità direzionali realistiche nel dominio FEM. Ai fini della validazione, i risultati dell'analisi modale sono stati incrociati con quelli estratti dal modello condensato ufficiale del fornitore. Per garantire il massimo rigore metodologico, nel modello FEM completo sono stati imposti esattamente gli stessi vincoli e carichi utilizzati dal costruttore per la linearizzazione del proprio modello. Il confronto numerico ha evidenziato non solo un'eccellente correlazione modale, ma anche una piena corrispondenza in termini di rigidità statiche, confermando la robustezza delle assunzioni fatte durante il reverse engineering e la correttezza del pretensionamento applicato.

Conclusioni

Il lavoro dimostra la validità di un approccio ibrido sperimentale-numerico per la formulazione di un modello di pneumatico configurabile. Svincolandosi dai modelli condensati "black box" che legano in modo inscindibile pneumatico e cerchio, la metodologia proposta risolve le problematiche di confidenzialità intellettuale (IP) tra OEM e fornitori. Questo approccio garantisce agli ingegneri del veicolo una risorsa indipendente per condurre liberamente analisi strutturali su differenti design o materiali dei cerchi ruota, oltre a prestarsi per valutazioni di full vehicle in prima approssimazione. Si precisa che tale modello non intende sostituire i modelli condensati validati né il processo iterativo di co-design tra OEM e fornitore, ma si inserisce come prezioso strumento complementare per condurre analisi esplorative altrimenti precluse dalle restrizioni tipiche delle formulazioni condensate.

Automotive / 438

Testing Autonomous Driving Control Algorithms with Scaled Vehicles

Author: eugenio tramacere¹

Co-authors: Andrea Tonoli²; Luis Miguel Castellanos Molina²

¹ Politecnico di torino

² Politecnico di Torino

Corresponding Authors: luis.castellanos@polito.it, eugenio.tramacere@polito.it, andrea.tonoli@polito.it

The validation of Connected and Automated Vehicle (CAV) functions still faces a significant gap between purely virtual simulations and expensive full-scale experimental campaigns. This work presents a mixed-reality scaled-vehicle testbed designed to support the development, verification, and validation of autonomous driving control algorithms within a controlled and repeatable indoor environment. The proposed platform employs 1:18 scale vehicles operating inside a $6 \times 5 \text{ m}^2$ arena equipped with a ceiling-mounted vision system for high-frequency localization and a real-time communication and control architecture based on Wi-Fi and CAN protocols. The framework enables rapid prototyping through MATLAB/Simulink automatic code generation and deterministic execution on a real-time target machine, thus preserving consistency with industrial automotive workflows. To enhance realism while ensuring operational safety, the physical environment is synchronized with a digital twin in which virtual agents, such as pedestrians and surrounding vehicles, interact with real scaled vehicles in closed-loop scenarios. This hybrid approach allows the reproduction of complex and safety-critical maneuvers under repeatable conditions. The proposed infrastructure is integrated within a V-cycle methodology for autonomous driving system validation, covering early-stage simulation, hardware-in-the-loop testing with scaled vehicles, and progressive transfer toward full-scale implementation. Experimental results demonstrate the capability of the platform to reproduce collision-avoidance and overtaking maneuvers involving dynamic obstacles, while monitoring vehicle trajectories, accelerations, and control actions in real time. The testbed also serves as a living laboratory for public dissemination activities on automated driving technologies. Overall, the developed framework represents a cost-effective and scalable solution for bridging the gap between simulation-based development and full-scale vehicle testing in autonomous driving research.

Automotive / 440

Analysis of Direct Oil Cooling Channel Configurations in an Electric Machine Stator

Authors: chengyang ye¹; Andrea Tonoli¹; enrico zenerino¹

¹ Politecnico di Torino

Corresponding Authors: andrea.tonoli@polito.it, enrico.zenerino@polito.it, chengyang.ye@polito.it

With the rapid development of electric vehicles. High-power-density electric machines are essential for improving space utilization and reducing the overall system mass. Direct oil cooling has become an effective approach to enhance the thermal performance of electric machines. In this study, conjugate heat transfer simulations are conducted in Ansys Fluent to analyze the influence of stator oil cooling channel positions on the thermal performance of a 36 kW externally excited synchronous machine stator. Three cooling-channel configurations are evaluated under varying operating conditions, including a range of motor speeds, with each speed corresponding to a different balance between iron and copper losses. The results indicate that direct contact between cooling oil and the windings significantly improves cooling performance. Under low-speed operating conditions, where copper loss dominates, the difference in thermal performance between cooling channels located at the upper and lower winding regions is relatively small. However, as the rotational speed increases and the loss distribution changes, the cooling performance of the lower-positioned cooling channel decreases significantly.

Biomeccanica / 238

Il progetto Calliope e la proposta di uno approccio sforzo-informato per la progettazione di protesi per arti superiori

Author: Lorenzo Romanelli¹

Co-authors: ² Ciro Santus; ¹ Damiano Menel; ³ Flavio Napoleoni; ² Ivan Senegaglia; ³ Marco Controzzi; ³ Matteo Benedetti; ¹ Palma Borracci; ³ Raffaele De Biasi ⁴

¹ *Dipartimento Ingegneria Industriale, Università di Trento*

² *Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale Università di Pisa*

³ *Istituto di BioRobotica, Scuola Superiore Sant'Anna*

⁴ *Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali, Università di Roma La Sapienza*

Corresponding Authors: raffaele.debiasi@unitn.it, palma.borracci@santannapisa.it, flavio.napoleoni@santannapisa.it, lorenzo.romanelli-1@unitn.it, marco.controzzi@santannapisa.it, damianomenel0@gmail.com, ciro.santus@unipi.it, ivan.senegaglia@phd.unipi.it, matteo.benedetti@unitn.it

1. **Obiettivi** Lo sviluppo di protesi di nuova generazione per arti superiori richiede un approccio centrato sul paziente che dia priorità a comfort, funzionalità e integrazione anatomica. I classici metodi di fabbricazione necessitano, tuttavia, di numerosi passaggi manuali e della presenza fisica dell'amputato durante le varie fasi. Al tempo stesso, grazie ai recenti sviluppi nell'ambito della manifattura additiva, le strutture reticolari (lattice) offrono la possibilità di ottenere componenti con un elevato rapporto tra proprietà meccaniche cruciali, quali rigidità, resistenza e peso. Questo studio presenta dunque la progettazione, simulazione numerica e la produzione additiva di un'invasatura protesica per avambraccio ultraleggera basata su strutture reticolari.

2. Metodi

Il primo passaggio ha riguardato l'acquisizione delle scansioni 3D del moncone, dell'arto controlaterale e del modello in gesso. Partendo dalla scansione del modello in gesso, il liner è stato generato mediante operazioni di offset e rifilatura delle superfici lungo punti di riferimento anatomici. Un primo prototipo è stato fabbricato e testato dall'utente e due iterazioni sono state sufficienti per correggere l'allineamento globale del liner, mentre ulteriori due sono state eseguite per rifinire la geometria locale nella regione anteriore. In parallelo, l'invasatura esterna è stata sviluppata sia per ripristinare le proporzioni anatomiche sia per ospitare i componenti funzionali di una protesi di mano mioelettrica (batterie, elettronica, elettrodi a secco e polso). Una struttura reticolare planare è stata adottata per la progettazione strutturale dell'invasatura ed il materiale poliammide 12 (PA12) è stato scelto per la produzione consentendo un ottimo bilanciamento tra proprietà meccaniche, biocompatibilità e costo. Una volta ottenute le proprietà statiche elasto-plastiche del PA12, è stato implementato un processo di omogenizzazione elasto-plastica in modo da investigare il comportamento meccanico ortotropo della cella al variare del diametro delle trabecole. Nell'ottica di proporre una validazione sperimentale delle quantità omogenizzate ottenute, sono stati progettati due provini con strutture reticolari graduate e orientate diversamente e per la manifattura additiva è stata scelta una tecnica di fusione a getto multiplo (MJF). Le proprietà omogenizzate ottenute sono state poi impiegate per implementare, tramite metodo ad elementi finiti, un processo di ottimizzazione strutturale sforzo-informato con l'obiettivo di ottimizzare la densità della struttura reticolare in base alle condizioni locali di stress, consentendo una distribuzione efficiente del materiale e una taratura delle prestazioni. Di conseguenza, le aree soggette a maggiori sollecitazioni meccaniche sono state rinforzate con trabecole più spesse, mentre le zone a basso stress sono state alleggerite mediante elementi più sottili. Il coefficiente di sicurezza della struttura è stato valutato confrontando la tensione equivalente secondo il modello di Hill e la tensione di primo snervamento del materiale PA12.

3. Risultati

I confronti delle curve sforzo-deformazione ottenute dalle simulazioni numeriche del modello omogenizzato e del modello completo e dalle prove sperimentali hanno evidenziato una ottima sovrapposizione. A parità di ingombri, la geometria reticolare ottenuta in seguito all'ottimizzazione sforzo-informata ha permesso una riduzione di peso del 25.4% e del 13.2% rispetto ai modelli solidi e trabecolari con diametri medi, rispettivamente, ed un minimo coefficiente di sicurezza pari a 4.2. Inoltre, per la geometria ottenuta tramite l'ottimizzazione sforzo-informata si sono osservate deformazioni maggiori ma comunque compatibili con quelle tipiche delle protesi convenzionali. Infine, le distribuzioni dei diametri delle trabecole del modello CAD e del componente realizzato, ottenute tramite tomografia computerizzata, sono risultate ampiamente sovrapponibili certificando la qualità del processo di manifattura additiva impiegato.

4. Conclusioni

Questo lavoro ha presentato una metodologia innovativa per la progettazione e la fabbricazione

di monconi protesici basata su un'architettura reticolare concentrandosi sull'implementazione della metodologia, verificandone la resistenza meccanica e la manifatturabilità come prerequisiti per l'indagine clinica. L'approccio integra la mappatura degli stress tramite elementi finiti, l'assegnazione delle proprietà basata sull'omogeneizzazione e la produzione additiva avanzata, consentendo la realizzazione di strutture leggere, compatibili con l'anatomia e meccanicamente affidabili. Infine, la tomografia computerizzata (CT) ha confermato la manifatturabilità del design reticolare e dunque questo studio pone le basi per una nuova generazione di monconi protesici che combinano progettazione strutturale avanzata con processi di produzione additiva industrialmente realizzabili.

Biomeccanica / 276

Effetto della struttura Voronoi e dei trattamenti superficiali sulle prestazioni funzionali di viti ossee in lega Ti-6Al-4V

Authors: Maddalena Bracchi¹; Clara Mapelli²; Jacopo Fiocchi¹; Ausonio Tuissi³; Chiara Colombo²; Carlo Alberto Biffi¹

¹ CNR-ICMATE

² Politecnico di Milano

³ CNR - ICMATE Lecco

Corresponding Authors: maddalenabracchi@cnr.it, chiara.colombo@polimi.it, ausonio.tuissi@cnr.it, carloalberto.biffi@cnr.it, jacopo.fiocchi@cnr.it, clara.mapelli@mail.polimi.it

Negli ultimi anni le viti ossee in lega Ti6Al4V ELI sono sempre più impiegate in ambito ortopedico per la stabilizzazione delle fratture e per promuovere l'osteointegrazione. Le tecnologie di additive manufacturing (AM) permettono di realizzare fixtures personalizzate, caratterizzate da geometrie su misura e da strutture reticolari trabecolari integrate. Tali architetture porose favoriscono l'osteointegrazione, soprattutto in presenza di osso osteoporotico, e consentono di ridurre la rigidità dell'impianto, avvicinandola a quella del tessuto osseo naturale. Inoltre, la micro-rugosità tipica delle superfici ottenute mediante AM stimola l'adesione e la proliferazione degli osteoblasti, facilitando le fasi iniziali dell'integrazione ossea.

In questo studio, viti ossee realizzate tramite tecnologia Laser Powder Bed Fusion (LPBF) e dotate di una struttura reticolare di tipo Voronoi, orientata sia longitudinalmente sia trasversalmente, sono state sottoposte a trattamenti di finitura superficiale con l'obiettivo di ottimizzarne le caratteristiche morfologiche. La caratterizzazione delle superfici è stata condotta mediante profilometria superficiale, analizzando sia le regioni reticolari sia le superfici filettate. I risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti su viti non trattate, al fine di valutare l'effetto dei trattamenti sulle proprietà superficiali.

Le prestazioni meccaniche sono state quindi studiate attraverso prove di inserimento e prove di pull-out assiale, volte a valutare la stabilità primaria in un substrato di schiuma di poliuretano con densità analoga a quella dell'osso osteoporotico, con densità nell'intervallo 0.16-0.20 g/cm³. Sono state inoltre eseguite prove torsionali fino a rottura, in conformità allo standard ASTM F543-17, per analizzare l'influenza dei trattamenti superficiali sulle proprietà meccaniche delle diverse configurazioni di vite.

La stabilità secondaria è stata valutata studiando il comportamento meccanico delle viti inglobate in cemento osseo a base di PMMA, utilizzato come modello dell'osso neoformato (woven bone) nelle fasi immediatamente successive all'impianto. Infine, i risultati sperimentali sono stati confrontati con simulazioni agli elementi finiti (FEM) del comportamento in pull-out, con l'obiettivo di validare il modello numerico e individuare le zone critiche all'interno della struttura reticolare, fornendo indicazioni utili per un'ulteriore ottimizzazione progettuale delle viti.

I risultati mettono in evidenza l'impatto sia della struttura trabecolare Voronoi che della finitura superficiale sia sulla stabilità primaria che secondaria, entrambe ottenibili mediante materiali artificiali, per la valutazione delle prestazioni meccaniche di fixtures prodotte in tecnologia additiva.

Biomeccanica / 280**Analisi sperimentale e numerica di meta-biomateriali auxetici in stampa 3D per impianti ossei vertebrali****Authors:** Andrea Sorrentino¹; Katia Genovese²; Lorenzo Nicolini³; Davide Castagnetti¹¹ *Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia*² *Università degli Studi della Basilicata*³ *Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia***Corresponding Authors:** katia.genovese@unibas.it, 217058@studenti.unimore.it, andrea.sorrentino@unimore.it, davide.castagnetti@unimore.it

Recentemente, i meta-biomateriali auxetici hanno attirato una crescente attenzione in virtù delle loro inusuali caratteristiche, tra cui un valore del coefficiente di Poisson negativo, noto come comportamento auxetico. Tuttavia, le loro funzionalità avanzate non si limitano al solo coefficiente di Poisson negativo, ma includono, tra le altre, un'elevata resistenza a rottura e un comportamento sinclastico. Tali strutture sono generalmente realizzate tramite tecniche di manifattura additiva (stampa 3D) a polveri metalliche, tra cui, la fusione laser selettiva (SLM) e la fusione a fascio di elettroni (EBM). Grazie a una progettazione razionale della loro micro-struttura, è possibile realizzare biomateriali in stampa 3D per la sostituzione ossea ad elevata porosità e ridotta rigidità.

In questo contesto, il presente lavoro si focalizza sulla prototipazione, analisi numerica e caratterizzazione sperimentale mediante tecniche di stereo-correlazione digitale di immagini (DIC) di nuove strutture cellulari in meta-biomateriale auxetico per protesi ossee vertebrali trabecolari in stampa 3D. Nello specifico, il lavoro investiga due configurazioni geometriche di metamateriale basate su unità reticolari di forma prismatica, a base triangolare, collegate in un caso da legamenti rettilinei, nell'altro semplicemente raccordate. Entrambe le architetture investigate sono state realizzate tramite tecnologia additiva SLM in una lega di titanio biocompatibile (Ti6Al4V ELI) in campioni cubici formati da 27 (3x3x3) celle elementari. La morfologia della superficie e la microstruttura dei prototipi sono state analizzate utilizzando un microscopio elettronico a scansione (SEM) Nova NanoSEM 450. Analisi agli Elementi Finiti sono state affiancate alla caratterizzazione sperimentale per validare il comportamento a compressione quasi-statica delle strutture, valutandone la risposta strutturale in campo elastico e plastico. Il campo di spostamenti di una delle facce esterne dei provini e di una cella elementare è stato misurato tramite sistemi stereo-DIC dedicati, rispettivamente a basso ed alto ingrandimento. Attraverso un codice dedicato in ambiente Matlab, si è misurato il campo di spostamento della struttura e calcolato il coefficiente di Poisson, confrontandolo con quanto previsto nelle analisi numeriche.

I risultati sperimentali evidenziano lo spiccato comportamento auxetico di entrambe le strutture e valori del modulo elastico paragonabili a quelli delle ossa trabecolari vertebrali. Il lavoro mette in evidenza l'elevato potenziale dei meta-biomateriali auxetici, evidenziando al tempo stesso i limiti delle attuali tecniche di stampa 3D.

Biomeccanica / 307**Modellazione multiscala dell'osso trabecolare: dalla trabecola alla lacuna****Author:** Ludovica Clementini¹**Co-authors:** Federica Buccino²; Laura Maria Vergani²¹ *Department of Mechanical Engineering (DMEC), Politecnico di Milano, Milan*² *Department of Mechanical Engineering (DMEC), Politecnico di Milano, Milan. IRCCS Galeazzi-Sant'Ambrogio, Milan***Corresponding Author:** ludovica.clementini@polimi.it

L'osso rappresenta un esempio significativo di materiale composito naturale, capace di coniugare ridotta densità ed elevata efficienza meccanica. La risposta meccanica dell'osso è fortemente governata dalla sua organizzazione gerarchica e dalla distribuzione multiscala delle sue eterogeneità microstrutturali. Tra le eterogeneità più influenti, le lacune osteocitarie introducono discontinuità microstrutturali nel tessuto osseo, generando perturbazioni locali dei campi di sforzo e deformazione non direttamente misurabili sperimentalmente. In questo lavoro si propone un framework multiscala per la caratterizzazione meccanica dell'osso trabecolare a scala lacunare, basato sull'integrazione di tomografia μ CT da sincrotrone con prove di compressione in situ, segmentazione automatica mediante reti neurali convolutive, identificazione inversa delle proprietà elastiche del tessuto e modellazione agli elementi finiti dei provini mediante geometrie reali e sottomodelli locali. Il framework è validato su campioni di osso trabecolare umano, consentendo l'analisi morfometrica su larga scala di oltre 2×10^5 lacune e la riproduzione accurata della risposta globale forza-spostamento. Le analisi numeriche condotte sui sottomodelli locali mostrano concentrazioni di sforzo in corrispondenza delle lacune, con fattori di concentrazione compresi tra 1.45 e 1.99, governati principalmente dall'allungamento della lacuna; inoltre, l'effetto dell'orientazione emerge in modo marcato oltre una soglia angolare, evidenziando due distinti regimi di risposta meccanica. Le interazioni meccaniche tra lacune risultano fortemente localizzate e decadono rapidamente con la distanza, diventando trascurabili quando la separazione supera circa 6–7 raggi efficaci, intesi come scala caratteristica della dimensione lacunare nella direzione di interazione; ciò permette di definire un criterio di isolamento meccanico indipendente dalla scala assoluta. Il framework sviluppato consente pertanto di condurre studi statistici morfometrici e di collegare in modo consistente la risposta meccanica alla scala del campione con i campi di sforzo locali alla scala delle lacune, fornendo una base quantitativa per l'analisi dell'influenza della microstruttura sulla risposta meccanica dell'osso trabecolare.

Biomeccanica / 308

Progettazione di metamateriali fillotassici per prestazioni integrate fluidodinamiche e meccaniche nell'ingegnerizzazione del tessuto osseo

Author: Matteo Vivan¹

Co-authors: Federica Buccino¹; Laura Maria Vergani²

¹ Politecnico di Milano

² Politecnico Di Milano

Corresponding Authors: matteo.vivan@polimi.it, federica.buccino@polimi.it, laura.vergani@polimi.it

Negli ultimi anni, i metamateriali stanno emergendo come una delle soluzioni più promettenti nell'ambito dell'ingegneria dei tessuti, grazie alla loro capacità di esibire proprietà meccaniche e funzionali non riscontrabili nei materiali convenzionali. Attraverso un'accurata progettazione della loro architettura interna, è possibile modulare caratteristiche fondamentali quali rigidezza, resistenza, permeabilità e distribuzione degli sforzi, rendendoli particolarmente adatti ad applicazioni biomedicali. Tuttavia, uno dei principali limiti delle strutture attualmente impiegate risiede nella difficoltà di ottenere un compromesso ottimale tra prestazioni fluidodinamiche e meccaniche: architetture altamente permeabili tendono infatti a risultare meccanicamente deboli, mentre configurazioni più rigide spesso penalizzano il trasporto di nutrienti e la distribuzione degli stimoli meccanici necessari ai processi di osteogenesi.

Questo trade-off rappresenta un ostacolo cruciale nell'ingegneria dei tessuti come l'osso, dove, nonostante le naturali capacità rigenerative del tessuto osseo, condizioni patologiche come l'osteoporosi possono comprometterne la funzionalità. Le soluzioni tradizionali, come gli innesti ossei, presentano diverse limitazioni, rendendo necessario lo sviluppo di scaffold avanzati in grado di supportare efficacemente la rigenerazione in presenza di difetti critici.

In questo contesto, il presente studio propone un nuovo metamateriale bio-ispirato progettato per superare tale limite, sfruttando il principio della fillotassi. Il design, sviluppato in ambiente CAD (Cattia), si ispira alla distribuzione naturale di foglie e rami nelle piante, regolata da leggi matematiche quali l'angolo aureo e le sequenze di Fibonacci. Questa organizzazione consente una distribuzione spaziale dei canali altamente efficiente e modulabile, permettendo di migliorare simultaneamente la gestione del flusso e la risposta strutturale, mitigando il trade-off tipico delle architetture convenzionali.

La struttura filotassica è stata confrontata con una configurazione regolare a griglia, rappresentativa delle soluzioni attualmente in commercio, mantenendo costanti la densità relativa (62%) e la dimensione dei canali. Le proprietà biologiche sono state analizzate mediante simulazioni CFD in COMSOL, valutando permeabilità e sforzi di taglio, parametri chiave per il trasporto di nutrienti e la stimolazione dell'osteogenesi. Le proprietà meccaniche sono state investigate numericamente in ABAQUS e validate sperimentalmente tramite prove di compressione quasi-statica su campioni stampati in PLA.

I risultati evidenziano come la configurazione filotassica permetta di aumentare fino al 20% l'area favorevole all'osteogenesi rispetto alla struttura regolare, mantenendo al contempo una risposta meccanica superiore in termini di rigidità e capacità di assorbimento di energia, aumentando dell'84% il modulo elastico e del 43% l'energia assorbita durante la deformazione. Inoltre, essa introduce meccanismi di deformazione più efficienti, dominati dalla flessione anziché da una rottura fragile e progressiva.

In conclusione, questo studio dimostra che l'adozione di architetture filotassiche nei metamateriali rappresenta una strategia efficace per colmare il divario tra prestazioni fluidodinamiche e strutturali, offrendo scaffold ottimizzati per il bone tissue engineering e aprendo nuove prospettive nella progettazione di materiali bio-ispirati ad alte prestazioni.

Biomeccanica / 337

Alterazioni della rete lacuno-canalicolare ossea compromettono il trasferimento di carico e la risposta poroelastica

Author: Federica Buccino¹

Co-author: Laura Maria Vergani²

¹ Politecnico di Milano

² Politecnico Di Milano

Corresponding Authors: laura.vergani@polimi.it, federica.buccino@polimi.it

Obiettivo

L'osso trabecolare può essere descritto come un sistema poroelastico multiscala in cui la risposta meccanica emerge dall'interazione tra matrice solida e fluido interstiziale. In tale contesto, la rete lacuno-canalicolare (LCN) regola sia la distribuzione degli sforzi sia i flussi di fluido responsabili della mecano-trasduzione. Tuttavia, i limiti delle tecniche di imaging convenzionali hanno finora impedito una caratterizzazione tridimensionale non distruttiva della LCN a scala nanometrica e la sua integrazione con misure meccaniche locali. Questo lavoro propone un approccio integrato volto a correlare proprietà meccaniche e morfologia della LCN in condizioni sane, osteoporotiche e post-COVID-19.

Metodi

Campioni di osso trabecolare umano (sani, osteoporotici, post-COVID-19) sono stati analizzati mediante un approccio di Image-Guided Failure Assessment (IGFA), che integra misure meccaniche locali e imaging ad alta risoluzione. In particolare, le proprietà meccaniche del tessuto sono state valutate tramite nanoindentazione (G200, Keysight Technologies) con punta Berkovich e metodologia a stiffness continua (CSM), fino a una profondità di 2 μm . Il modulo elastico (E) e la durezza (H) sono stati determinati secondo Oliver e Pharr. Le indentazioni sono state pianificate e interpretate sulla base delle informazioni microstrutturali locali, consentendo una correlazione diretta tra risposta meccanica e caratteristiche del tessuto. Parallelamente, la rete lacuno-canalicolare è stata caratterizzata mediante nano-tomografia a contrasto di fase (Zernike phase-contrast nano-CT) presso la beamline P05 del sincrotrone DESY PETRA III, con risoluzione isotropa fino a ~ 25 nm, permettendo la visualizzazione tridimensionale non distruttiva di lacune e canalicoli. I dati di imaging sono stati elaborati tramite segmentazione automatizzata basata su reti neurali convoluzionali e modelli generativi, al fine di quantificare la geometria, la connettività e le proprietà di trasporto della rete. L'integrazione tra nanoindentazione e nano-CT nell'ambito dell'IGFA consente di associare i meccanismi locali di deformazione e potenziale innesco del danno alle caratteristiche morfologiche e funzionali della rete

lacuno-canalicolare, fornendo una descrizione multiscala accoppiata del comportamento meccanico del tessuto osseo.

Risultati

L'osso osteoporotico mostra una riduzione significativa del modulo elastico e della durezza rispetto al gruppo sano, accompagnata da un aumento dell'eterogeneità meccanica. Il gruppo post-COVID-19 presenta un comportamento opposto. L'imaging a PETRA III evidenzia una degradazione progressiva della rete lacuno-canalicolare, con riduzione della connettività, rarefazione dei canalicoli e alterazioni della geometria lacunare.

Dal punto di vista meccanico, la riduzione della rigidità locale implica una diminuzione dell'efficienza di trasferimento di carico (load transfer efficiency) tra trabecole, con conseguente localizzazione delle deformazioni. A scala lacunare, variazioni geometriche inducono fenomeni di strain amplification, aumentando i picchi di deformazione locale. Dal punto di vista poroelastico, la riduzione della connettività canalicolare osservata al nano-CT comporta una diminuzione della permeabilità della rete e una conseguente alterazione dei gradienti di pressione e del flusso di fluido interstiziale. Questo determina una riduzione degli stimoli fluidodinamici sugli osteociti, fondamentali per la mecano-trasduzione.

L'integrazione tra dati di nanoindentazione e imaging ad altissima risoluzione evidenzia quindi un disaccoppiamento tra risposta della matrice solida e trasporto di fluido nella LCN, particolarmente marcato nell'osteoporosi.

Conclusioni

Questo lavoro dimostra come la fragilità ossea sia il risultato di un'alterazione accoppiata delle proprietà meccaniche del tessuto e della funzionalità della rete lacuno-canalicolare. L'approccio integrato basato su nanoindentazione e nano-CT a PETRA III consente, per la prima volta, una caratterizzazione tridimensionale non distruttiva della LCN a scala nanometrica e la sua correlazione diretta con la risposta meccanica locale.

I risultati evidenziano come la degradazione della LCN riduca la permeabilità e comprometta i meccanismi poroelastici di mecano-trasduzione, mentre la riduzione della rigidità amplifica le concentrazioni di strain. Questo approccio apre nuove prospettive per modelli multiscala accoppiati solido-fluido e per una valutazione della qualità ossea basata su parametri meccanici e microstrutturali, oltre la densità minerale.

Ringraziamenti

Horizon Europe, Marie Skłodowska-Curie (MSCA), grant n. 101120290 (GAP). Si ringrazia il team di dottorandi che ha partecipato alla preparazione della campagna: A. Allahdiniyan, M. Ateeq, F. Hosseini, G. Jiang, S. Sebastiani, M. Vivan ed il team IRCCS Galeazzi per il taglio campioni.

Biomeccanica / 340

Rimodellamento lacunare nell'osso umano: evidenze 3D su larga scala e implicazioni biomeccaniche in osteoporosi e post-COVID-19

Author: Laura Maria Vergani¹

Co-author: Federica Buccino¹

¹ Politecnico di Milano

Corresponding Authors: laura.vergani9@gmail.com, federica.buccino@polimi.it

Obiettivo

Le lacune osteocitarie costituiscono l'unità fondamentale del sistema di sensing meccanico osseo, in cui la geometria tridimensionale regola l'amplificazione locale degli sforzi, i gradienti di deformazione ed il flusso di fluido interstiziale all'interno della rete lacuno-canalicolare. Questi fattori determinano direttamente la capacità degli osteociti di percepire e trasdurre stimoli meccanici, governando i processi di rimodellamento. Tuttavia, il legame tra condizioni patologiche sistemiche (osteoporosi, Covid-19) e le alterazioni della microarchitettura lacunare rimane ancora poco definito,

soprattutto nell'osso trabecolare. Il presente studio mira a identificare morfometrie tridimensionali associate a tali condizioni e ad interpretarne il significato biomeccanico.

Metodi

Sono state analizzate 48 teste femorali umane (Healthy, Osteoporosis, post-COVID-19; $n = 16$ per gruppo) mediante scansioni al sincrotrone a contrasto di fase, che consentono una risoluzione sub-micrometrica delle strutture lacunari. La segmentazione è stata eseguita tramite un approccio basato su reti neurali convoluzionali, permettendo l'analisi automatizzata e standardizzata di circa 9 milioni di lacune. Per ciascuna lacuna sono stati estratti descrittori morfometrici tridimensionali, tra cui volume, area superficiale, assi principali, sfericità (true e length-based) e orientazione spaziale. Le differenze tra gruppi sono state valutate mediante modelli lineari misti multilivello e analisi multi-variata, tenendo in considerazione la struttura gerarchica dei dati.

Risultati

L'osteoporosi risulta associata ad un aumento significativo delle dimensioni lacunari rispetto al gruppo post-COVID-19 ($p < 0,05$), evidenziato da maggiori volumi, aree superficiali e lunghezze dell'asse semi-minore, mentre il gruppo sano ha mostrato valori intermedi. Parallelamente, la sfericità lacunare risulta ridotta, indicando una deviazione dalla geometria isotropa e un aumento dell'anisotropia. La densità lacunare non presenta differenze tra i gruppi, suggerendo che il rimodellamento patologico agisca principalmente sulla geometria piuttosto che sulla numerosità delle lacune. Dal punto di vista biomeccanico, queste modificazioni implicano un'alterazione sostanziale del microambiente peri-lacunare. Lacune più grandi e meno sferiche sono associate a un'amplificazione degli sforzi locali e a una distribuzione anisotropa delle deformazioni, con conseguente aumento dei picchi di strain efficace sull'osteocita. Questo comporta anche una riorganizzazione dei gradienti di flusso del fluido canalicolare, influenzando i meccanismi di mecano-trasduzione. Le variazioni osservate nell'orientazione lacunare suggeriscono inoltre una riorganizzazione rispetto alle direzioni di carico, con potenziali effetti sulla capacità del tessuto di trasmettere e distribuire gli stimoli meccanici. Il gruppo post-COVID-19 presenta un comportamento intermedio e in larga parte sovrapponibile al gruppo sano, indicando un impatto più contenuto sulla microstruttura lacunare.

Conclusioni

L'osteoporosi emerge come una condizione caratterizzata da un rimodellamento morfologico sistematico delle lacune osteocitarie, che altera il campo di deformazione locale e il microambiente fluido-meccanico in cui operano gli osteociti. Tali alterazioni, non rilevabili tramite le sole misure densitometriche, evidenziano come la qualità ossea sia fortemente influenzata da parametri microstrutturali legati alla geometria e all'organizzazione spaziale delle lacune. La morfologia lacunare si configura quindi come un biomarcatore microstrutturale sensibile e biomeccanicamente rilevante, capace di identificare forme patologiche della fragilità ossea. Questo studio fornisce un benchmark quantitativo su larga scala e apre prospettive per l'integrazione tra imaging avanzato, intelligenza artificiale e biomeccanica multiscale nella valutazione della qualità ossea.

Ringraziamenti

Horizon Europe, Marie Skłodowska-Curie (MSCA), grant n. 101120290 (GAP). Si ringrazia il team di dottorandi che ha partecipato alla preparazione della campagna, il team ELETTRA per il supporto nel beamtime ed il team IRCCS Galeazzi per il taglio campioni.

Biomeccanica / 358

Dalla microstruttura ossea alla bio-fabbricazione: analisi della rete lacuno-calicolare per il design di scaffold biomimetici

Authors: Sara Sebastiani¹; Dmitry Karpov²; Federica Buccino¹; Laura Maria Vergani¹

¹ Dipartimento di Ingegneria Meccanica (DMEC), Politecnico di Milano, Via La Masa 1, 20156 Milano, Italia

² ESRF, The European Synchrotron, Grenoble 38000, Francia; Università Grenoble Alpes, CEA, IRIG, MEM, NRX, Grenoble 38054, Francia

Corresponding Authors: sara.sebastiani@polimi.it, dmitry.karpov@univ-grenoble-alpes.fr, laura.vergani@polimi.it, federica.buccino@polimi.it

Background e obiettivi

L'ingegneria tissutale ossea mira allo sviluppo di scaffold porosi in grado di promuovere la rigenerazione del tessuto. Nonostante la struttura gerarchica dell'osso naturale e il ruolo riconosciuto della biomimesi come criterio di design, gli approcci esistenti riproducono prevalentemente la struttura trabecolare (meso-scala), trascurando l'organizzazione alla multi-scala. In particolare, il network lacuno-canalicolare (LCN), una rete di lacune interconnesse da canalicoli, definisce una porosità alla micro/sub-micro-scala. Dato il suo ruolo fondamentale nel trasporto di nutrienti e meccano-sensibilità del tessuto, la sua inclusione nel design di scaffold ossei potrebbe determinarne un'aumentata efficacia. Ad oggi, la caratterizzazione del LCN è limitata principalmente all'osso corticale; risultano invece carenti gli studi quantitativi su LCN trabecolare a scala nanometrica, in condizioni sane e patologiche. Ciò limita inoltre lo sviluppo di modelli meccanici e fluidodinamici realistici, attualmente basati su geometrie idealizzate.

Il presente lavoro si propone di: (i) caratterizzare il LCN trabecolare umano alla nano-scala, confrontando casi sani e patologici; (ii) sviluppare modelli strutturali e fluidodinamici basati su geometrie reali; (iii) trasferire tali informazioni nel design di scaffold multi-scala bioispirati.

Metodi

Campioni di osso trabecolare umano, provenienti da pazienti ortopedici (sani, osteoporotici, post-Covid-19), sono stati lavorati in provini ($1 \times 1 \times 6$ mm) orientati lungo la direzione di carico fisiologico. Tomografie nanometriche (voxel size 50 nm) sono state acquisite presso il sincrotrone ESRF (ID16b), consentendo la visualizzazione di lacune e canalicoli. Le immagini sono state segmentate tramite una pipeline sviluppata in Python per ottenere la ricostruzione tridimensionale del LCN. Sono stati estratti parametri morfologici quali forma e dimensione lacunare, densità e diametro canalicolare e grado di interconnettività. Le geometrie reali sono state utilizzate per modelli numerici fluidodinamici e strutturali. Parallelamente, la polimerizzazione a due fotoni (2PP) è stata impiegata per realizzare modelli rappresentativi di LCN e scaffold multi-scala, in cui il LCN è integrato in un'architettura trabecolare realistica. I provini sono stati analizzati tramite prove di compressione con imaging in-situ presso il sincrotrone BESSY II (BAMline).

Risultati

L'imaging ha permesso di ottenere un dataset tridimensionale ad alta risoluzione del LCN trabecolare umano in condizioni sane e patologiche. La pipeline di segmentazione ha consentito una ricostruzione dettagliata di lacune e canalicoli. Le analisi morfologiche evidenziano differenze tra le classi considerate, ad esempio nella sfericità delle lacune e nel grado di interconnessione della rete. L'utilizzo diretto delle geometrie reali nei modelli numerici ha permesso di analizzare la relazione tra peculiarità morfologiche e distribuzione di flusso, sollecitazioni di taglio e deformazioni. Le prove meccaniche in-situ su modelli realizzati tramite 2PP, integrate con l'analisi delle immagini, hanno confermato tali risultati. I design di scaffold multi-scala, in cui una struttura trabecolare reale integra una micro-porosità ispirata al LCN sano, sono stati fabbricati con successo e validati preliminarmente mediante prove in-situ.

Conclusioni

Il lavoro propone un approccio integrato per lo studio del LCN trabecolare umano alla nano-scala, combinando imaging avanzato, modellazione numerica e validazione sperimentale. Il dataset ottenuto consente la ricostruzione della geometria reale del network in condizioni sane e patologiche, permettendo un confronto diretto tra le classi. Superando i modelli idealizzati, le simulazioni su geometrie realistiche evidenziano il ruolo della morfologia del LCN nella risposta meccanica e fluidodinamica del tessuto. La tecnologia 2PP dimostra la fattibilità della fabbricazione di strutture gerarchiche e l'integrazione del LCN in scaffold trabecolari. Questo approccio apre a un design informato di scaffold multi-scala, in cui la micro-struttura contribuisce attivamente alle prestazioni del sistema.

Biomeccanica / 361

Analisi sperimentale di polimeri per la realizzazione di analoghi meccanici del nervo sciatico del ratto

Authors: Matilde Minuto¹; Mattia Frascio^{None}; Letizia Rossetti²; Massimiliano Avalor³

¹ Università degli Studi di Genova

² Unige

³ Università di Genova

Corresponding Authors: massimiliano.avallo@unige.it, mattia.frascio@unige.it, matilde.minuto@edu.unige.it, letizia.rossetti@edu.unige.it

I roditori costituiscono un modello sperimentale ampiamente adottato nella ricerca biomedica, in virtù della loro elevata omologia fisiologica con l'essere umano e della disponibilità di protocolli sperimentali consolidati. Tra questi, il nervo sciatico del ratto rappresenta uno dei riferimenti più utilizzati per lo studio dei nervi periferici umani, in particolare nelle indagini relative ai processi di rigenerazione, riparazione e caratterizzazione meccanica [1]. Tuttavia, i nervi periferici dei roditori presentano una marcata variabilità, sia inter che intra campione, nelle loro proprietà meccaniche e strutturali, rendendo complessa la riproducibilità dei risultati e il confronto sistematico tra differenti studi sperimentali.

Per mitigare tali limitazioni, sono stati sviluppati costrutti sintetici, nonché modelli analitici e numerici, finalizzati alla replica del comportamento dei tessuti biologici [2–4]. Benché tali approcci abbiano dimostrato efficacia, essi richiedono spesso processi di fabbricazione articolati, costi elevati o una conoscenza approfondita delle proprietà tissutali, fattori che ne ostacolano l'adozione sistematica nella pratica laboratoristica quotidiana.

Nel presente studio proponiamo un analogo sintetico del nervo sciatico del ratto caratterizzato da semplicità costruttiva, elevata riproducibilità ed economicità, in grado di replicare il comportamento meccanico del tessuto nativo. A tal fine, diversi polimeri sono stati sottoposti a prove di trazione e confrontati con campioni biologici. Il polimero con le performance più elevate ha evidenziato una risposta elastica strettamente sovrapponibile a quella del nervo naturale, presentando al contempo una resistenza a trazione superiore, caratteristica cruciale per le prove su giunzioni adesive.

Le prove di adesione condotte su campioni naturali e sintetici incollati con cianoacrilato hanno inoltre mostrato che il polimero ottimale è in grado di riprodurre con elevata fedeltà il comportamento meccanico dei nervi incollati, evidenziando valori di rigidità compatibili con quelli dei tessuti biologici, con un livello di confidenza stimato attorno al 95%.

[1] Angius, Diana, et al. *Biomaterials*, 33.32, 8034 (2012)

[2] Gul, Burcin Ustbas, et al. *JPRAS*, 72.3, 477 (2019):

[3] Kim, Juliana HK, et al. *Biomed. Eng. Online*, 6.1, 48 (2007)

[4] Federico, Salvatore, and Walter Herzog. *J. Biomech*, 41.16, 3309 (2008)

Biomeccanica / 376

ANALISI NUMERICA DEL RISCHIO DI FRATTURA NEL SITO DI INSERZIONE DI PIN FEMORALI A SEGUITO DI ARTROPLASTICA TOTALE DEL GINOCCHIO

Authors: Fabio Distefano¹; Gabriele Di Carlo¹; Danilo Leonetti¹; Gabriella Epasto¹

¹ Università degli Studi di Messina

Corresponding Authors: gabriella.epasto@unime.it, fdistefano1@unime.it, danilo.leonetti@unime.it, gabrieledica1@gmail.com

La chirurgia ortopedica robot-assistita sta registrando una crescente diffusione grazie a una maggiore precisione e a un migliore allineamento nel posizionamento degli impianti protesici. L'artroplastica totale del ginocchio robot-assistita (*robotic-assisted total knee arthroplasty (RATKA)*) è la procedura chirurgica di riferimento per il trattamento di patologie degenerative o traumatiche del ginocchio non responsive ai trattamenti conservativi, al fine di ridurre il dolore e ripristinare la funzionalità fisiologica nei pazienti. Il trattamento mostra effetti positivi sulla qualità di vita; tuttavia, complicanze come le fratture periprotetiches correlate al posizionamento dei pin in siti di perforazione critici, sebbene rare, sottolineano l'importanza della corretta scelta della zona di inserimento del pin, della precisione tecnica durante il trattamento e di un adeguato monitoraggio post-operatorio per aumentare la sopravvivenza dell'impianto e ridurre i tassi di revisione negli interventi protesici.

Il presente lavoro ha l'obiettivo di investigare l'influenza della zona di perforazione femorale, per il posizionamento dei pin, come fattore di rischio per le fratture nel sito di inserzione dei pin.

Sono state analizzate numericamente diverse configurazioni ciascuna caratterizzata dall'impiego di

due pin di diametro pari a 4 mm. Le configurazioni differiscono per l'altezza di inserimento dei pin, a livello diafisario o dell'epifisi distale, e per l'eccentricità della perforazione, con l'obiettivo di indagarne l'influenza sulla risposta meccanica del femore. È stato inoltre esaminato il ruolo delle tecniche di fissazione monocorticali e bicorticali. Per queste ultime, oltre al decorso antero-posteriore, sono state considerate traiettorie oblique da anteromediale a posterolaterale e viceversa, al variare dell'angolo di inclinazione.

Le configurazioni sopra descritte sono state sottoposte a quattro diverse condizioni di carico: forze di attività muscolare corrispondenti a un soggetto di 75 kg; carichi di compressione o torsione applicati sulla testa del femore e pari rispettivamente a 1500 N e 12 Nm; carico di 500 N applicato perpendicolarmente al centro del femore per simulare una prova di flessione a 3 punti.

I risultati hanno mostrato una forte influenza dell'eccentricità di perforazione sulla risposta meccanica del femore con un incremento in termini di tensioni, deformazioni e strain energy density massime per le condizioni di eccentricità più severe. I risultati hanno mostrato un'influenza ridotta dell'altezza di inserimento dei pin a livello diafisario sulle caratteristiche meccaniche, mentre un aumento delle stesse è stato riscontrato per il posizionamento a livello epifisario.

Biomeccanica / 387

Cyclic Compression Test Procedure for an innovative 3D-Printed Vertebral Filling Device

Authors: Giuseppe Mirone¹; Raffaele Barbagallo²; Rosalia Mineo³; Matteo Giunta³

¹ *University of Catania -Italy*

² *Università degli Studi di Catania*

³ *Mt Ortho srl*

Corresponding Authors: matteo.giunta@mtortho.com, raffaele.barbagallo@unict.it, giuseppe.mirone@unict.it, rosalia.mineo@mtortho.com

This paper presents the development of a dedicated experimental procedure for the mechanical characterization of SPHEREPLAST™, a novel vertebral filling device designed to restore load-bearing capabilities in compromised vertebral bodies. The device consists of porous trabecular spheres with a diameter of 3.3 mm, manufactured via Electron Beam Melting (EBM) additive technology in Ti6Al4V-ELI (grade 23) titanium alloy. These elements are inserted into the damaged vertebral body using a stainless-steel cannula designed for the scope. Due to the absence of specific regulatory standards for such patented devices, a testing protocol is proposed to assess durability and performance under realistic physiological conditions. A custom-designed containment apparatus, with an internal volume comparable to that filled with spheres in real cases, was mounted on a hydraulic testing machine to apply a series of sinusoidal compression cycles to a group of spheres. The test was designed to simulate approximately three months of post-implantation patient activity, i.e., the expected healing period, both in terms of the total number of cycles and the magnitude of the applied loads. A procedure is identified for analyzing the experimental data, obtained through continuous acquisition of load and crosshead displacement during the test, aiming at the identification of the drift in the package height and the cyclic displacement amplitude, delivering useful indicators to evaluate the progressive packing of the spheres, their effective stiffness, and the overall durability of the system. The proposed procedure provides a reliable benchmark for future design variants and quality control.

Biomeccanica / 402

Vacuum-Driven Artificial Muscles Exploiting Snap-Through Instability for Fast and Efficient Linear Actuation

Author: Salvatore Garofalo¹

Co-authors: Rabiun Mamman²; Luigi Bruno¹; Leonardo Pagnotta¹; Giada Risso³; Caterina Lamuta²

¹ *Università della Calabria*

² *University of Iowa (USA)*

³ *School of Engineering and Applied Sciences (SEAS), Harvard University*

Corresponding Authors: salvatore.garofalo@unical.it, luigi.bruno@unical.it, leonardo.pagnotta@unical.it

Vacuum-driven artificial muscles are promising candidates for lightweight and compliant robotic systems; however, achieving fast, efficient, and load-retaining actuation at relatively low pressure remains challenging. In this work, we present a vacuum-driven linear artificial muscle that exploits geometrically programmed snap-through instability to enhance actuation speed and energy efficiency. The actuator consists of a one-dimensional 3D-printed metamaterial skeleton enclosed within a sealed nylon membrane. Two material systems were investigated: FDM-printed PLA with different infill densities and SLA-printed Flexible 80A resin. A combined experimental and finite element approach was used to characterize the snap-through response, bistability, internal energy evolution, and actuator performance under quasi-static and dynamic loading conditions.

The results show that the snap-through transition is primarily governed by the unit-cell geometry, while material stiffness controls the energy landscape and the ability to retain a secondary stable configuration. PLA-based actuators exhibited true bistability and load-dependent self-locking after vacuum removal, whereas Flexible 80A actuators showed reversible snap-through actuation without self-locking due to their lower stiffness and reduced energy barrier. Among the investigated configurations, the PLA actuator with 75% infill provided the best overall performance, achieving a peak mechanical efficiency of approximately 50% while lifting a 0.5 kg load under a vacuum pressure of -65 kPa. The highest actuation speed, approximately 325.4 mm/s, was obtained with the PLA 100% infill actuator under a 0.1 kg load. Flexible 80A actuators demonstrated smooth and repeatable reversible actuation, with enhanced cyclic durability but lower efficiency and no load-retaining capability.

Overall, the proposed design demonstrates that snap-through instability combined with tailored structural stiffness can enable fast, efficient, and self-locking vacuum-driven artificial muscles. This approach offers a promising route toward compact, lightweight, and energy-efficient actuators for soft robotics, wearable devices, and human-interactive systems.

Biomeccanica / 421

Plant-inspired biomimetic multifunctional composites

Author: Flavia Libonati¹

¹ *Università di Genova*

Corresponding Author: flavia.libonati@unige.it

Natural soft fibrous tissues, resulting from a billion-year evolution, exhibit exceptional mechanical properties combined with morphing and sensing functionalities, characteristics that are challenging to replicate in synthetic materials. Such properties emerge from repeating building blocks arranged into complex structural motifs, which confer robustness and enable diverse mechanical functions. An example is provided by cellulose fibrous tissues that constitute the reinforcement interspersed in a soft matrix in plant tissues. Their orientation drives mechanical stiffness and yields other functionalities, shape morphing, in particular. In synthetic materials, hydrogels have the highest shape-morphing potential due to water-induced residual stresses. Also, they are superior due to their stimuli-responsiveness to various triggers (e.g., humidity, temperature, electric or magnetic field, etc). Yet, their mechanical properties are generally inferior. In literature, various hydrogels are designed with either morphing capabilities or enhanced mechanical properties, often focusing on one property at a time. Here, by harnessing biomimetic principles, silk fiber-reinforced alginate hydrogel matrix biocomposites are designed, fabricated (in a single- and bi-lamellar fashion), and tested to synergistically tune their mechanical and morphing properties. Different configurations are investigated to unveil the structure-property relationship and to reach different changes in shape. These multifunctional biocomposites show tunable and robust mechanical properties, controllable shape-morphing deformation, and the ability to self-controlled movement, such as object encapsulation, grip, and release, holding a wide potential for several applications in soft robotics, medicine, and tissue engineering.

Sviluppo di un modello matematico per il calcolo delle frequenze proprie di un banco prova per viti a ricircolo di sfere

Author: Lorenzo Romanelli¹

Co-authors: Emiliano Rustighi²; Fabrizio Defant³; Matteo Benedetti⁴; vigilio fontanari⁴

¹ Dipartimento Ingegneria Industriale, Università di Trento

² Università degli Studi di Trento

³ Pama SpA

⁴ Università di Trento

Corresponding Authors: matteo.benedetti@unitn.it, emiliano.rustighi@unitn.it, lorenzo.romanelli-1@unitn.it, vigilio.fontanari@unitn.it

1. **Obiettivi** Le viti a ricircolo di sfere sono componenti cruciali per la trasformazione del moto rotatorio in moto traslazionale e hanno un impiego chiave nella movimentazione di utensili di taglio per svolgere lavorazioni per asportazione di truciolo. Esse necessitano, tuttavia, di un'accurata operazione di monitoraggio del precarico tra le sfere e le piste sulla chiocciola e sulla vite, al fine di garantire posizionamenti precisi della tavola. In questo contesto, l'analisi dinamica del sistema permette di ottenere una valutazione indiretta dell'andamento del precarico al variare del tempo. Il lavoro si pone dunque l'obiettivo di sviluppare un modello matematico di equazioni differenziali per ottenere l'andamento dei gradi di libertà del sistema al variare del tempo, riuscendo anche ad ottenere grandezze potenzialmente utili come le pulsazioni proprie del sistema.
2. **Metodi** Per il calcolo delle frequenze proprie del sistema sono stati implementati due modelli matematici. Nel primo caso il banco è stato modellato con un sistema a parametri concentrati mentre nel secondo caso è stato adottato un approccio ibrido in cui alcuni componenti hanno mantenuto un'analisi a parametri concentrati mentre la vite è stata modellata come un sistema continuo. In aggiunta, per entrambi i casi, il vincolo in corrispondenza del cuscinetto assialmente bloccato è stato modellato sia considerando uno spostamento assiale nullo sia introducendo la cedevolezza assiale del cuscinetto come da catalogo. In via preliminare, sono stati considerati i gradi di libertà traslazionali e torsionali e, considerata la dipendenza dei contributi di rigidità dalla posizione assiale della tavola, i termini cinetici e potenziali sono stati ottenuti linearizzando i vari termini in intorno delle differenti configurazioni considerate. La lagrangiana del sistema ha permesso di ottenere il sistema di equazioni differenziali dal quale sono state costruite le matrici di massa rigidità e smorzamento riducendo il problema nella classica forma $M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = 0$. Per il sistema a parametri concentrati è stato possibile sviluppare la lagrangiana considerando che $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = Q_i$ dove il termine Q_i è stato impiegato per introdurre nel modello i termini viscosi. Al contrario, per il sistema ibrido la lagrangiana è stata manipolata considerando il principio variazionale di Hamilton e dunque l'azione S è stata definita come l'integrale temporale della lagrangiana ovvero $S = \Delta_c q \int_{t_1}^{t_2} L(\dot{q}, q, t) dt$.
3. **Risultati** I risultati ottenuti hanno permesso di valutare le differenze tra il modello a parametri concentrati ed il modello ibrido permettendo di analizzare criticamente la necessità dell'introduzione della vite come elemento continuo. Inoltre, è stato ottenuto l'andamento delle pulsazioni proprie al variare della posizione assiale della tavola e sono state analizzate le differenze ottenute inserendo o meno la cedevolezza assiale del cuscinetto assialmente bloccato.
4. **Conclusioni** Nel presente lavoro sono stati sviluppati modelli matematici per l'analisi dinamica di un banco prova di una vite a ricircolo di sfere. In particolare, i modelli implementati sono stati sia a parametri concentrati sia ibridi (parametri concentrati/continuo) includendo o ignorando la cedevolezza assiale del cuscinetto assiale. La diversità dei modelli implementati ha permesso di investigare criticamente l'introduzione di talune approssimazioni come, ad esempio, considerare la vite come elemento discreto e non continuo. La pulsazione propria traslazionale rappresenta, infine, un parametro interessante per il monitoraggio delle viti a ricircolo; infatti, in base ai cataloghi dei principali costruttori di viti, quest'ultimo può essere collegato alla rigidità del contatto tra madrevite e sfere, e dunque al precarico della vite, ed anche alla rigidità del contatto tra le

sfere e le piste dei cuscinetti. Il valore di pulsazione propria traslazionale ottenuto dalla modellazione numerica può dunque essere confrontato con il corrispondente valore ottenuto tramite prove su banchi prova valutando la decrescita del precarico durante le condizioni operative.

Circular Design / 255

Trade-offs Between Use-Phase Efficiency and Environmental Footprint: Recycled Nd-Magnets in Washing Machines

Authors: Giulia Cortina¹; Maurizio Guadagno¹

Co-authors: Lorenzo Berzi¹; Massimo Delogu¹

¹ *Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Firenze*

Corresponding Authors: massimo.delogu@unifi.it, giulia.cortina@unifi.it, maurizio.guadagno@unifi.it, lorenzo.berzi@unifi.it

Objectives

The widespread proliferation of Electrical and Electronic Equipment (EEE) has intensified the challenges associated with managing Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), particularly regarding the recovery of critical raw materials. Within the framework of the Harmony project, this study focuses on the development of a washing machine drain pump utilizing recycled bonded magnets. The adoption of Neodymium (Nd) magnets in these components is analyzed in the context of the Energy-using Products (EuP) Directive and “Class A++” energy labeling requirements, despite the inherently limited duty cycles of such motors.

Methods

A Life Cycle Assessment (LCA) methodology is employed to compare short-loop and long-loop recycling processes for bonded magnets against primary material production. Furthermore, the study introduces a detailed analytical comparison based on the characterization of operational hours versus total cycle time to accurately quantify the real-world energy consumption of the pump.

Results

The analysis evaluates the differences in consumption associated with Nd-based magnetic solutions to determine their effective impact on the overall energy balance of the appliance. The findings provide a data-driven assessment of the fundamental trade-offs between use-phase energy efficiency and the environmental footprint embodied in the magnetic materials.

Conclusions

This comparison identifies the most sustainable pathway for industrial design by successfully balancing stringent regulatory energy standards with circular economy objectives. Ultimately, the study demonstrates the viability of utilizing recycled magnetic materials to mitigate environmental impact without compromising the functional efficiency of the appliance.

Circular Design / 286

LCA case study for an air conditioning system

Authors: Nicola Carlucci¹; Andrea Antonacci¹; Francesco Del Pero²; Gabriele Arcidiacono¹; Francesco Saccone³; Claudio Filippini³

¹ *Università degli Studi Guglielmo Marconi*

² *UniMarconi*

³ *Olimpia Splendid S.p.A.*

Corresponding Authors: f.delpero@unimarconi.it, andrea.antonacci@leanprove.com, n.carlucci@studenti.unimarconi.it, g.arcidiacono@unimarconi.it, c.filippini@olimpiasplesid.it, f.saccone@olimpiasplesid.it

Environmental impacts from domestic ventilation is causing increasing concerns in the latest years. This paper presents a Life-Cycle Assessment of an air/air monobloc domestic heat pump by the company Olimpia Splendid S.p.A, named UNICO EVO 20 HP PVAN. The study has been carried out following the PEP-ecopassport guidelines, ensuring a standardised and repeatable approach. Primary data are obtained from manufacturer and suppliers; the modelling activity is performed using the Ecoinvent 3.11 cutoff database and it is performed through the Brightway2/Activity Browser software. Results show that most of the impact is caused by the Use phase, followed by the Manufacturing phase: respectively 70% and 25% in the category "Climate Change - Total".

Circular Design / 310

A scenario proposal for the collection of Rare Earths Permanent Magnets adopted on modern WEEE

Authors: Lorenzo Berzi¹; Massimo Delogu^{None}; Maurizio Guadagno²; Roberto Ciccarella³; Shaman Alwawi³

¹ *Department Industrial Engineering of Florence*

² *Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università degli Studi di Firenze*

³ *Firenze*

Corresponding Authors: lorenzo.berzi@unifi.it, shaman.alwawi@unifi.it, roberto.ciccarella@unifi.it, massimo.delogu@unifi.it, maurizio.guadagno@unifi.it

Objectives

In the framework of the Critical Raw Materials (CRM) Act, the recovery of Neodymium-Iron-Boron (NdFeB) magnets is a strategic priority. While large-scale applications like wind turbines belong to a traceable industrial sector, small EEE (power tools for kitchen, hobby, and professional use) present significant criticalities due to high product variety, low individual magnet mass, and the lack of systematic tracking. This study proposes a collection and recovery scenario specifically tailored for these small-scale devices.

Methods

The evaluation is based on a statistical model built upon the integration of four integrated hypotheses, related to the quantities of magnets per unit; the European market penetration percentage of Nd-based permanent magnets; total EEE sales volumes across relevant categories; Application of statistical scrapping laws to determine end-of-life material stream.

Results

The work presents a calculation model capable of generating forecasting scenarios of PM to be collected contained in small appliances and professional tools compared to current streams.

Conclusions

The study provides an analytical tool to guide WEEE management policies toward critical material recovery.

Circular Design / 342

A Hybrid Modal Superposition Framework for High-Fidelity Reconstruction of Dynamic Structural Response

Author: Gabriele Liuzzo¹

Co-author: Pierluigi Fanelli²

¹ *Department of Economics, Engineering, Society and Business Organization (DEIM), University of Tuscia, Largo dell'Università, 01100 Viterbo, Italy*

² *Department of Economics, Engineering, Society and Business Organization (DEIM), University of Tuscia, Largo dell'Università, 01100 Viterbo, Italy*

Corresponding Author: gabriele.liuzzo@unitus.it

Storicamente, la descrizione della risposta dinamica delle strutture mediante la combinazione di forme modali ha trovato largo impiego nei settori dell'ingegneria meccanica, civile e aeronautica. L'ipotesi fondamentale alla base di tale approccio è che una generica configurazione deformata possa essere rappresentata come combinazione lineare dei modi propri di vibrare della struttura, opportunamente pesati. In questo contesto, i metodi di ricostruzione modale hanno suscitato un interesse costante grazie alla loro versatilità e al ridotto costo computazionale, sia in termini di risorse impiegate sia di tempi di calcolo. Tuttavia, l'efficacia di tali metodi nel riprodurre con elevata fedeltà la risposta reale della struttura dipende in maniera cruciale dalla selezione di un insieme di modi che sia al contempo rappresentativo e contenuto. Una scelta non ottimale può infatti compromettere significativamente l'accuratezza della ricostruzione, introducendo errori anche rilevanti. Ne consegue che il problema dell'identificazione modale, inteso come selezione e pesatura dei contributi modali più significativi, rappresenta ancora oggi una questione aperta, oggetto di numerosi studi in letteratura, spesso caratterizzati da una forte dipendenza dallo specifico ambito applicativo. Il presente lavoro si inserisce in tale contesto proponendo approcci ibridi per la ricostruzione ad alta fedeltà della risposta dinamica strutturale, basati sull'integrazione di tecniche analitiche, metodi numerici e strategie di fitting dei dati. In particolare, viene affrontato il problema della ricostruzione della deformata a partire da un numero limitato di misure, spazialmente distribuite sulla struttura, condizione tipica in ambito sperimentale. Il lavoro proposto mira a definire criteri sistematici per la selezione modale e per la stima dei coefficienti di partecipazione, anche nei casi in cui non sia disponibile una soluzione in forma chiusa. I risultati sono supportati da confronti numerici e, ove possibile, da evidenze sperimentali. In prospettiva, lo sviluppo delle metodologie proposte si orienta verso l'estensione della ricostruzione modale al caso di grandi deformazioni, ambito in cui le ipotesi di linearità alla base della classica sovrapposizione modale risultano non più pienamente valide. In tale contesto, si rende necessario introdurre formulazioni e strategie di ricostruzione in grado di catturare effetti non lineari mantenendo al contempo un adeguato livello di efficienza computazionale. Parallelamente, gli algoritmi di monitoraggio strutturale sviluppati vengono concepiti in un'ottica più ampia, con l'obiettivo di superare il tradizionale ambito delle piccole deformazioni e di estendersi al monitoraggio di macchine e sistemi complessi in condizioni operative reali.

Circular Design / 391

Integrazione tra simulazione di processo, LCA e LCC per la valutazione sostenibile di packaging alimentare in plastica e fibre cellulosiche

Authors: Amelia Felaco¹; Francesco Caputo¹; Luciano Cantone²; Mario Munno¹; Stefano Beneduce¹

¹ *Università degli studi della campania luigi vanvitelli*

² *Università degli Studi di Roma Tor Vergata*

Corresponding Authors: luciano.cantone@uniroma2.it, francesco.caputo@unicampania.it, mario.munno2@unicampania.it, stefano.beneduce@unicampania.it, amelia.felaco@unicampania.it

La progressiva sostituzione delle plastiche di origine fossile con materiali a base cellulosica nel packaging alimentare è sempre più soggetta a vincoli normativi ed ambientali. Tuttavia, l'efficienza e l'efficacia dal punto di vista della sostenibilità ambientale delle soluzioni che prevedono l'impiego di fibre naturali non può essere assunta a priori, poiché essa dipende non solo dalla disponibilità del materiale di base, ma anche dalla fattibilità produttiva, dai vincoli geometrici e funzionali (spessore dell'imballaggio) e dall'efficienza del processo. Questo studio propone una metodologia che integra la modellazione e simulazione agli elementi finiti del processo di produzione (imbutitura), validata sperimentalmente, con la valutazione del ciclo di vita (LCA) dalla culla alla tomba e una valutazione dei costi lungo l'intero ciclo di vita (LCC) dell'imballaggio, consentendo un confronto ambientale ed economico fisicamente coerente, a parità di condizioni funzionali, tra differenti soluzioni.

Un cartone multistrato in fibra Chemi-Thermo-Mechanical Pulp (CTMP) è stato caratterizzato sperimentalmente mediante 48 prove di trazione conformi agli standard ISO, analizzando anisotropia, effetti della temperatura e sensibilità all'umidità. Sulla base della campagna sperimentale, è stato calibrato un modello costitutivo ortotropo elasto-plastico, con relativo criterio di danno, implementato negli algoritmi del software Abaqus/Explicit®, per simularne il comportamento durante un

processo di imbutitura. È quindi stato sviluppato un prototipo di macchina imbutitrice per poter eseguire prove sperimentali necessarie alla validazione delle previsioni numeriche in termini di risposta forza-spostamento, morfologia delle deformazioni indesiderate (grinze in prossimità delle aree da sigillare) e localizzazione di eventuali fenomeni di collasso. Un approccio Design of Experiments ha consentito di identificare le combinazioni dei parametri di processo per la relativa fattibilità e di determinare lo spessore minimo dell'imballaggio tecnicamente realizzabile.

I risultati della simulazione validata - massa della vaschetta, scarti di processo ed energia di formatura - sono stati così direttamente impiegati per la generazione dell'inventario del ciclo di vita (LCI). Sono stati valutati quattro scenari utilizzando il metodo ReCiPe 2016 ed avvalendosi del software SimaPro®: imballaggio in PET vergine, in PET riciclato, in fibra di cellulosa vergine e in fibra di cellulosa riciclata, mantenendo una rigorosa equivalenza geometrica e funzionale.

L'imballaggio in plastica mostra un impatto ambientale migliore in termini di consumo d'acqua e uso del suolo, ma peggiore in termini di esaurimento delle risorse fossili e di alcune categorie di parametri legati alla salute umana. L'imballaggio in fibra di cellulosa riduce la dipendenza da risorse fossili, ma presenta un impatto ambientale peggiore associato al consumo idrico, all'uso del suolo e all'eutrofizzazione. La pratica del riciclo migliora significativamente l'impatto ambientale per entrambi i materiali selezionati. Dal punto di vista economico, l'analisi LCC evidenzia il ruolo critico dei parametri di processo, degli scarti e del consumo energetico nel determinare la competitività delle soluzioni considerate. Nel complesso, i risultati dimostrano che la sostenibilità è un traguardo a livello di sistema, vincolato dal processo e dagli obiettivi progettuali effettivamente raggiungibili. Il framework proposto fornisce una metodologia solida e trasferibile per integrare simulazione di processo, valutazione ambientale ed economica, supportando decisioni di eco-design basate su dati reali, sebbene questi non sempre siano di facile reperimento.

Circular Design / 449

Approccio "Proxy-Based LCA" integrato con la metodologia MBSE per la progettazione circolare del prodotto industriale

Author: CHIARA GASTALDI¹

Co-author: Eugenio Brusa²

¹ *POLITECNICO DI TORINO*

² *Politecnico di Torino - Dip. Ingegneria meccanica e aerospaziale*

Corresponding Authors: eugenio.brusa@polito.it, chiara.gastaldi@polito.it

L'implementazione dei principi dell'economia circolare nello sviluppo del prodotto industriale si pone come odierna risposta al degrado ambientale e ai cambiamenti climatici e necessita di istruire metodologie efficaci e quantitative da affiancare a quelle tradizionalmente applicate nell'ingegneria. Il Model-Based Systems Engineering (MBSE) ha raggiunto la maturità necessaria, un adeguato supporto di normative tecniche ed è concepito in forma ampiamente modulare per permettere questa integrazione tra sostenibilità, rigenerazione e digitalizzazione del processo di progettazione. Oggetto del lavoro è l'integrazione tra progettazione circolare e MBSE. Essa parte dalla necessità di configurare l'ambiente come "stakeholder" obbligatorio di tutto il processo. Si avvale di strumenti di tipo qualitativo come la ruota "LIDS" definita in letteratura e le "eco-checklist", specie per la definizione dei requisiti di progetto ecocompatibili, ma poi affronta e implementa tecniche di riciclo (recycling), riuso (reuse), riprocessamento (remanufacturing) e di aggiornamento tecnologico del prodotto (refurbishment) per l'estensione della sua vita utile. Il fulcro del metodo proposto è l'utilizzo dell'analisi di "Life Cycle Assessment (LCA)" in fase di concezione di prodotto, sulla base di una proiezione dei dati necessari per la sua implementazione derivati da prodotti simili e precedenti, per supportare fin dall'avamprogetto l'esigenza di prevedere la rigenerazione circolare. In questo senso essa è indicata come "proxy-based". Questo permette al progettista di rendere quantitative alcune valutazioni comparative tra le soluzioni proposte e operare una scelta motivata, per cui la LCA supporta la definizione quantitativa delle prestazioni in termini di ecocompatibilità, mentre il processo MBSE guida il percorso decisionale. Come esempi applicativi, per descrivere pragmaticamente le procedure proposte, sono considerati il caso della rigenerazione di pannelli fotovoltaici e di motori a combustione interna. Essi esemplificano il processo proposto e dimostrano l'efficacia nella valutazione preventiva delle reali potenzialità di riutilizzo e di riciclo dei materiali, come i benefici in termini relativi di costo/efficacia del riprocessamento e dell'aggiornamento tecnologico. Tra i risultati salienti

del lavoro si rileva l'aspetto metodologico, che consiste nella dimostrazione che l'anticipazione delle valutazioni di ecocompatibilità dalla fase inoltrata dello sviluppo, in cui il prodotto è già definito nelle sue parti e nei materiali, alla fase di definizione e progettazione preliminare è fattibile. Si ha, inoltre, una misura di quanto essa comporti una selezione dei materiali e dei componenti molto più efficace e compatibile con i tempi e i costi di immissione sul mercato. Dal punto di vista del processo, il lavoro dimostra come questo approccio permetta di definire tecniche e strumenti di monitoraggio della vita utile da includere nel sistema, per poi operare la rigenerazione a fine vita. Dal punto di vista tecnologico, il lavoro dimostra la possibilità di utilizzare software e strumenti MBSE per supportare le specifiche azioni progettuali inerenti sostenibilità e rigenerazione. Per contro, le limitazioni e le criticità dell'approccio in tema di reperimento di informazioni per via "proxy-based" sono scontornate e quantificate, peraltro dimostrando che non sono tali da renderlo inefficace o impraticabile, come potrebbe apparire, essendo basato su proiezioni da verificare a posteriori, ma praticabile a tutti gli effetti con la quantità di dati oggi disponibili sui prodotti, che portano a proiezioni essenzialmente verosimili.

Compositi / 242

Emissioni acustiche per il monitoraggio dell'evoluzione del danno in campioni di materiale composito riciclati.

Authors: Andrea Zucchelli¹; Roberto Palazzetti^{None}

¹ *Università di Bologna*

Corresponding Authors: a.zucchelli@unibo.it, roberto.palazzetti@polimi.it

Il lavoro qui presentato rientra in un più ampio progetto di studio sul riciclo di materiali pre-impregnati, sviluppato in collaborazione tra PoliMi e UniBo. Gli autori intendono proporre una nuova metodologia di riciclo di materiale composito di scarto, e questo lavoro rientra nelle attività di caratterizzazione e studio del nuovo materiale.

Il riciclo dei materiali compositi è di fondamentale importanza a causa dell'espansione del settore e del conseguente aumento dei rifiuti prodotti. La metodologia proposta consente di recuperare una parte significativa degli scarti generati dal processo di nesting e dai residui di fine rotolo, ritagliando e ri assemblando il materiale altrimenti destinato in discarica secondo una specifica e regolare architettura. Il processo porta alla produzione di una cosiddetta "lamina equivalente", che può essere utilizzata in un processo di laminazione tradizionale, e che è stata utilizzata nella fabbricazione dei provini impiegati in questo studio.

Il materiale risultante è quindi formato da strati discontinui e ordinati di fibre corte, che non è stato ancora investigato. Sebbene le sue proprietà statiche siano già state valutate, l'innescò e l'evoluzione del danno rappresentano ancora un tema aperto: si è deciso quindi di investigare il problema mediante le emissioni acustiche durante una prova meccanica, in particolare la prova di flessione a 4 punti. Questo test consente di avere un'ampia zona sollecitata allo stesso livello di tensione superando il problema delle discontinuità localizzate.

Si sono realizzate quindi due tipologie di provini: la prima utilizzando il materiale tradizionale, un materiale composito in carbonio e resina epossidica bi-direzionale tradizionale a fibra lunga; la seconda utilizzando il nuovo materiale riciclato. Durante le prove un microfono ne registrava le emissioni acustiche, utilizzate successivamente per distinguere le diverse modalità di danneggiamento, e la propagazione delle stesse.

Lo studio presenta quindi un'analisi comparativa tra i due diversi spettri sonori evidenziandone similitudini e differenze, oltre che individuando impronte caratteristiche delle due configurazioni.

Gli spettri acustici delle due configurazioni mostrano alcune analogie, ma anche caratteri specifici che consentono di distinguere i due gruppi di campioni. In particolare, i dati sono stati analizzati considerando: (i) lo spazio ampiezza/durata degli eventi acustici, (ii) l'energia dei singoli eventi in funzione dello spostamento imposto durante la prova e la sua cumulata, ed infine (iii) la sentry function, strumento sviluppato in passato da uno degli autori, e diffusamente utilizzato nello studio di emissioni acustiche, in particolare di materiali compositi.

Le due tipologie di campioni hanno evidenziato meccanicamente comportamenti molto diversi una volta raggiunto il carico massimo, ed è per tale motivo che si è deciso di normalizzare lo studio fino a tale punto.

L'analisi ha evidenziato alcuni aspetti interessanti:

1) Nei provini discontinui gli eventi acustici hanno globalmente durata inferiore, ma intensità molto

simile a quelli registrati per i provini in materiale continuo;

2) Al raggiungimento del carico massimo l'energia liberata nei provini continui è molto maggiore rispetto a quelli discontinui a causa della natura quasi esplosiva dell'evento finale; invece, fino a pochi istanti prima del raggiungimento del picco, la produzione acustica dei campioni discontinui risulta essere maggiore, indice di un danneggiamento che probabilmente inizia precedentemente rispetto alle controparti continue;

3) La sentry function evidenzia probabili danneggiamenti, in entrambe le configurazioni, già durante il tratto lineare della curva, non visibili ad occhio nudo: anche l'analisi di questa curva sembra indicare un inizio di degradamento nella fase lineare di carico, più evidente ed anticipata nei provini discontinui.

Questa analisi preliminare richiede una validazione su un campione statistico maggiormente significativo, ma può aprire la strada al monitoraggio in tempo reale di componenti realizzato in materiale riciclato, migliorandone l'affidabilità e, di conseguenza, la diffusione.

Compositi / 318

Functionally graded adhesive joints fabricated via multi-material additive manufacturing

Authors: Alessandro Pirondi¹; Fabrizio Moroni¹; Francesco Musiari¹

¹ *Università di Parma - Dipartimento di Ingegneria dei Sistemi e delle Tecnologie Industriali*

Corresponding Authors: francesco.musiari@unipr.it, fabrizio.moroni@unipr.it, alessandro.pirondi@unipr.it

This study investigates an advanced strategy to enhance the performance of adhesively bonded joints through functionally graded curing enabled by multi-material additive manufacturing. Conventional thermal curing of adhesives in complex geometries is often limited by heat conduction and material distribution, leading to suboptimal mechanical performance. In this work, spatially controlled temperature gradients are generated across the adhesive layer using embedded, additively manufactured resistive heating elements fabricated from conductive filaments and placed at the adherend–adhesive interfaces. This approach enables programmable, gradient thermal curing along the overlap region and through the adherend thickness, promoting precise curing, reduced residual stresses, and improved load distribution. Mechanical testing is conducted to evaluate the strength and failure behavior of the graded joints, and the results are compared with those of conventional homogeneous adhesive joints. The results demonstrate that functionally graded adhesive joints produced using embedded 3D-printed heating elements exhibit progressive failure mechanisms and a load-bearing capacity improved by up to 170%. The proposed methodology provides a scalable platform for tailoring local adhesive properties and for designing functionally graded adhesive joints, offering new opportunities to optimize stiffness distribution and mechanical performance in advanced structural applications.

Compositi / 287

Progettazione di recipienti in pressione multistrato realizzati mediante accoppiamento forzato di cilindri coassiali in materiale composito.

Authors: Luigi SOLAZZI¹; Nicola Zani¹; Giorgio Donzella²

¹ *Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale - Università degli Studi di Brescia (IT)*

² *Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Università di Brescia.*

Corresponding Authors: giorgio.donzella@unibs.it, nicola.zani@unibs.it, luigi.solazzi@unibs.it

L'utilizzo dei materiali compositi è oggi ampiamente diffuso nella realizzazione di componenti strutturali, grazie all'elevato rapporto resistenza strutturale/densità che li caratterizza. Uno degli obiettivi primari della sostituzione di questi materiali a quelli tradizionali, in particolare di tipo metallico, è la riduzione della massa del componente, garantendo gli stessi livelli di sicurezza e affidabilità strutturale. La presente ricerca si inserisce in questo contesto, focalizzandosi sulla progettazione di recipienti in pressione realizzati mediante l'accoppiamento forzato di più strati cilindrici coassiali in materiale composito, estendendo ai materiali anisotropi una soluzione già diffusa per materiali isotropi come l'acciaio. L'obiettivo è quello di sfruttare in modo ancora più efficiente le proprietà meccaniche del materiale, al fine di ottenere un ulteriore alleggerimento del manufatto rispetto alla configurazione monostrato. La pressione di contatto generata dall'interferenza tra gli strati consente infatti di introdurre uno stato di sollecitazione iniziale di compressione sull'elemento più interno che si oppone a quello indotto dalla pressurizzazione, riducendo lo spessore complessivo del manufatto e conseguentemente la massa totale del componente. L'approccio di calcolo proposto, implementato in Matlab, consente di analizzare e confrontare tra loro differenti soluzioni progettuali, costituendo uno strumento idoneo per l'ottimizzazione strutturale del componente. In particolare, vengono assunti come parametri il numero degli strati con il relativo spessore, orientazione delle fibre e sequenza di laminazione, nonché le interferenze di montaggio tra di essi. E' altresì prevista la presenza di un eventuale liner metallico interno. Lo studio propone anche una possibile configurazione di giunzione tra il mantello multistrato e fondi piani in materiale metallico, collegati al mantello mediante uno specifico adesivo strutturale. Le analisi effettuate su un caso di studio rappresentativo evidenziano che la soluzione multistrato con interferenza consente una significativa riduzione di massa rispetto a una configurazione tradizionale in materiale composito monostrato, mantenendo prestazioni strutturali molto simili.

Compositi / 306

INDAGINE SUI MECCANISMI DI ROTTURA IN COMPOSITI A FIBRA DISCONTINUA OTTENUTI DA SCARTI DI PREIMPREGNATO

Authors: Lorenzo Calervo¹; Roberto Palazzetti^{None}

Co-authors: Luca Michele Martulli ¹; Maheshwara Reddy Jedla ¹; Paolo Bettini ¹; Tommaso Maria Brugo ²

¹ Politecnico di Milano

² University of Bologna - DIN

Corresponding Authors: lorenzo.calervo@polimi.it, maheshwarareddy.jedla@polimi.it, tommasomaria.brugo@unibo.it, paolo.bettini@polimi.it, roberto.palazzetti@polimi.it, lucamichele.martulli@polimi.it

Obiettivi: In questo lavoro gli autori presentano i risultati di uno studio dedicato alla valutazione delle proprietà meccaniche e all'analisi dei meccanismi di rottura in compositi a fibra discontinua. L'ampio impiego dei materiali compositi genera notevoli scarti di preimpregnato, fino al 35% del materiale acquistato, solitamente accumulato in discariche o smaltito in inceneritori. Questo studio propone di riciclare gli scarti tagliandoli in patches regolari e riassemblandoli in nuovi fogli e rotoli. I materiali così ottenuti conservano circa il 90% della rigidezza e il 50% della resistenza, risultando idonei per applicazioni strutturali meno gravose. L'obiettivo di questo studio è duplice: da un lato valutare l'effetto di diverse forme di patches, a parità di area, come rappresentazione di differenti geometrie di interfaccia nelle zone di accostamento, valutandone l'influenza sulle proprietà meccaniche; dall'altro analizzare in dettaglio l'innescò e l'evoluzione della frattura al variare di tali geometrie, così da comprendere i meccanismi di danneggiamento che governano il comportamento del materiale discontinuo.

Materiali e metodi: Il materiale utilizzato è un HEMT-3 CC601E 380 g/m², un tessuto in fibra di carbonio twill 2x2 impregnato con resina epossidica, con una densità di 1.58 g/cm³ e uno spessore di lamina polimerizzata di 0.35 mm. Le patches presentano quattro differenti geometrie, tutte con area costante di 25 cm²: una forma quadrata, due forme a parallelogramma con angoli acuti interni di 22.5° e 45°, e una forma ad arco con raggio di 17.5 mm. Per ciascuna tipologia è stato realizzato un foglio riciclato, o "lamina equivalente", composto da due strati: nel primo le patches sono affiancate senza vuoti né sovrapposizioni, mentre il secondo, identico e posto sopra al primo ma sfalsato di

mezza patch in entrambe le direzioni, ne garantisce la coesione impedendone il distacco. Per determinare le proprietà meccaniche e valutare il comportamento a rottura delle diverse geometrie di interfaccia sono stati realizzati quattro pannelli da cui sono stati ricavati provini a forma di osso di cane, successivamente testati in trazione. Sulla superficie frontale dei provini è stato realizzato, con bombolette spray, uno speckle pattern a puntini neri su fondo bianco per applicare tecniche di Digital Image Correlation (DIC) attraverso il sistema Aramis e monitorare in-situ l'andamento della deformazione sul provino, con particolare attenzione alla regione attorno alla discontinuità in corrispondenza dell'interfaccia. In modo analogo, sullo spessore del provino (circa 2 mm) è stato realizzato uno speckle pattern ancora più fine, applicato con un aerografo, per monitorare, con lo stesso principio, non solo le deformazioni ma anche l'inizio e l'evoluzione della frattura nello spessore. Infine, micrografie ex-situ ad alta risoluzione hanno permesso di analizzare nel dettaglio le modalità di rottura al termine dei test.

Risultati: I risultati hanno mostrato che le diverse geometrie di giunzione determinano un lieve incremento della rigidità dalle discontinuità orizzontali fino a quelle inclinate a 45°, mentre la resistenza è rimasta sostanzialmente invariata. Per ciascuna geometria, la perdita di rigidità ha avuto inizio in momenti diversi, evidenziando la sensibilità del materiale alla forma dell'interfaccia. Inoltre, il successivo rateo di decadimento della rigidità risulta anch'esso variabile, con velocità di degradazione differenti a seconda della configurazione. Per quanto riguarda le modalità di rottura, indipendentemente dalla geometria della giunzione, il monitoraggio in-situ tramite microscopio digitale nello spessore mostra che le fratture si innescano nelle zone ricche di resina in corrispondenza delle interfacce tra patches, le regioni più deboli, per poi propagarsi attraverso delaminazioni e rottura di fibre. Inoltre, i risultati della DIC evidenziano livelli di deformazione più elevati sistematicamente attorno alle giunzioni tra patches, che sono le prime a cedere, con fratture che si originano dai bordi del provino e avanzano verso il centro lungo la larghezza. Le osservazioni ex-situ allo stereomicroscopio, condotte a diversi livelli di ingrandimento, hanno fornito una visualizzazione dettagliata delle superfici di frattura, delle cricche nella matrice e delle fibre rotte.

Conclusioni: Le variazioni nella lunghezza e nell'inclinazione dell'interfaccia di giunzione determinano morfologie di frattura simili, ma con un ritardo nell'onset della cricca e nella nascita di delaminazioni, oltre a variabilità nelle prestazioni meccaniche e nel decadimento della rigidità. Nel complesso, lo studio evidenzia il potenziale del materiale composito riciclato sia dal punto di vista meccanico che nella caratterizzazione del cedimento, offrendo basi solide per future applicazioni strutturali e per una gestione più sostenibile dei rifiuti.

Compositi / 324

Ottimizzazione di strutture reticolari 3D all'interfaccia di giunzioni ibride metallo-composito SMC per l'aumento della resistenza meccanica.

Author: Fabrizio Moroni¹

Co-authors: Andrea Zucchelli²; Carlo Gotti³; Luca Raimondi²; Mario Castro⁴; Ulderico Tarasconi¹

¹ Dipartimento di Ingegneria dei Sistemi e delle Tecnologie Industriali - DISTI, Università degli Studi di Parma

² Dipartimento d'Ingegneria Industriale - Università di Bologna

³ Advanced Mechanics and Materials-Interdepartmental Center for Industrial Research (CIRI-MAM), Alma Mater Studiorum-Università di Bologna

⁴ Dipartimento d'Ingegneria Industriale, Advanced Mechanics and Materials-Interdepartmental Center for Industrial Research (CIRI-MAM), Alma Mater Studiorum-Università di Bologna

Corresponding Authors: luca.raimondi@unibo.it, ulderico.tarasconi@unipr.it, fabrizio.moroni@unipr.it, a.zucchelli@unibo.it, mario.castro@unibo.it, carlo.gotti@unibo.it

In un contesto industriale sempre più orientato all'alleggerimento strutturale e all'ottimizzazione delle prestazioni, il design multimateriale rappresenta una strategia chiave per settori come l'automotive e i trasporti. In tale ambito, l'integrazione tra leghe metalliche leggere, come l'alluminio,

e materiali compositi consente di combinare elevate proprietà meccaniche con riduzioni di peso significative. Tra i compositi, gli SMC (Sheet Moulding Compounds) risultano particolarmente attrattivi grazie al buon compromesso tra prestazioni, costo e produttività. Tuttavia, la realizzazione di giunzioni efficaci metallo-composito rimane una sfida critica, principalmente a causa della limitata resistenza dell'interfaccia.

Studi preliminari hanno dimostrato che tale resistenza può essere significativamente incrementata mediante l'introduzione di strutture superficiali tridimensionali sul substrato metallico, in grado di favorire l'infiltrazione delle fibre durante il processo di compression molding. In continuità con questi studi, il presente lavoro analizza l'effetto di strutture a piramidi a base quadrata sull'efficacia dell'infiltrazione e sulle prestazioni meccaniche della giunzione, considerando anche l'influenza di specifici parametri geometrici, quali dimensioni caratteristiche e presenza di raccordi alla base delle piramidi.

A tal fine, verranno realizzati giunti metallo-composito co-curati caratterizzati da differenti configurazioni geometriche dell'interfaccia. Il grado di infiltrazione sarà valutato mediante osservazioni microscopiche delle sezioni dei campioni, mentre le prestazioni meccaniche saranno investigate tramite prove di strappo. L'obiettivo dello studio è identificare le configurazioni geometriche più efficaci per massimizzare la resistenza della giunzione, quantificando al contempo il miglioramento ottenibile rispetto a soluzioni tradizionali basate su preparazioni superficiali allo stato dell'arte.

Compositi / 369

Studio di giunzioni ibride avanzate metallo-composito con funzionalità self-sensing

Author: Carlo Gotti¹

Co-authors: Fabrizio Moroni ²; Mario Castro ³; Luca Raimondi ³; Tommaso Maria Brugo ⁴; Andrea Zucchelli ⁵

¹ *Advanced Mechanics and Materials-Interdepartmental Center for Industrial Research (CIRI-MAM), Alma Mater Studiorum-Università di Bologna, Bologna, Italy*

² *Università degli Studi di Parma*

³ *Dipartimento d'Ingegneria Industriale - Università di Bologna*

⁴ *University of Bologna - DIN*

⁵ *Università di Bologna*

Corresponding Authors: luca.raimondi@unibo.it, fabrizio.moroni@unipr.it, carlo.gotti@unibo.it, a.zucchelli@unibo.it, tommasomaria.brugo@unibo.it, mario.castro@unibo.it

Le giunzioni ibride metallo-composito stanno trovando crescente impiego in strutture leggere grazie al buon compromesso tra rigidità, resistenza e riduzione di massa; tuttavia, la loro affidabilità è spesso limitata dalla difficoltà di individuare precocemente danni all'interfaccia, quali distacchi locali o delaminazioni, che possono evolvere senza evidenze macroscopiche. In questo contributo proponiamo un approccio di Structural Health Monitoring integrato nella giunzione, basato su una misura capacitiva continua e non invasiva. La giunzione è concepita come un sistema tipo condensatore, in cui una parte metallica funge da elettrodo di riferimento mentre contro-elettrodi sottili applicati sulla superficie del composito costituiscono gli altri elementi per costruire il sistema di misura; lo strato polimerico rinforzato con fibre di vetro agisce da dielettrico, rendendo la capacità sensibile alle variazioni di continuità e di spessore del materiale interposto. Un aspetto distintivo del lavoro è l'impiego di interfacce 3D costituite da micro strutture reticolari a forma piramidale ottenute per manifattura additiva: oltre a contribuire al trasferimento di carico, tali geometrie modificano la distribuzione del campo elettrico e possono aumentare la sensibilità del segnale rispetto a soluzioni con interfacce piane. L'architettura di sensing è stata valutata sia in configurazione con elettrodo singolo, sia in configurazione multi elettrodo, per esplorare la possibilità di ottenere un'informazione anche spaziale sull'evoluzione del danno. La risposta del sistema è stata indagata combinando prove meccaniche a danneggiamento controllato con simulazioni elettrostatiche. Nelle analisi numeriche è stata simulata la propagazione virtuale della cricca all'interfaccia metallo-composito al fine di verificare il suo effetto sul campo elettrostatico e quindi sulla misura della capacità. Nel complesso, le evidenze sperimentali e numeriche indicano che la capacità varia in modo coerente con l'avanzamento della separazione tra metallo e composito e che la presenza dell'interfaccia 3D rende il

segnale più informativo, in particolare nelle fasi iniziali di degradazione. Inoltre, l'adozione di più elettrodi consente di seguire qualitativamente la progressione del fronte di danno lungo la giunzione, distinguendo le zone non ancora danneggiate da quelle già degradate. I risultati supportano la fattibilità per lo sviluppo della tecnologia self-sensing capacitiva come strumento per diagnosi precoce e tracciamento del danno in tempo reale in giunzioni ibride, riducendo la dipendenza da ispezioni periodiche e favorendo il loro impiego di giunzioni ibride nelle applicazioni industriali.

Compositi / 258

Modellazione dell'innesco e della propagazione delle delaminazioni nelle strutture in materiale composito mediante un approccio combinato CZM-VCCT

Authors: Leonardo Guido Salvi¹; Guilherme Da Cruz Sobral Picoto De Assunção^{None}; Sajjad Safaei¹; Andrea Bernasconi¹; Luca Michele Martulli¹

¹ *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: lucamichele.martulli@polimi.it, leonardoguido.salvi@polimi.it, guilherme.dacruz@mail.polimi.it, andrea.bernasconi@polimi.it, sajjad.safaei@polimi.it

La delaminazione rappresenta un meccanismo critico di cedimento nei materiali compositi laminati. Originata da concentrazioni di sforzi interlaminari, è responsabile della propagazione di danni estesi all'interno di strutture leggere. La crescita della delaminazione può ridurre significativamente la resistenza residua e la rigidità dei componenti, risultando particolarmente pericolosa nelle applicazioni critiche per la sicurezza. Pertanto, una simulazione accurata di tale fenomeno richiede la modellazione sia dell'innesco del danno sia della sua evoluzione sotto carichi quasi statici e ciclici. In questo lavoro viene presentato un framework di modellazione ibrido che combina il Cohesive Zone Modelling (CZM) per l'innesco della delaminazione con la Virtual Crack Closure Technique (VCCT) per la sua propagazione. Il CZM consente una rappresentazione accurata dell'inizio della delaminazione tramite una legge di trazione-separazione, offrendo uno strumento versatile per modellare la nucleazione del danno interlaminare senza la necessità di definire preventivamente una cricca. Al raggiungimento della completa degradazione dei primi elementi, viene definita una delaminazione discreta.

Il fronte di delaminazione viene quindi automaticamente rimappato su un nuovo modello e l'analisi viene trasferita a una formulazione basata sulla VCCT. Quest'ultima è impiegata per valutare lo Strain Energy Release Rate (SERR) in condizioni di modo misto al fronte di cricca, al fine di determinarne la propagazione.

La metodologia ibrida proposta è implementata in un workflow automatizzato in Python, che gestisce tutte le fasi: dal pre-processing agli elementi finiti, all'estrazione del fronte di delaminazione, fino all'aggiornamento del danno e al post-processing.

Il framework è validato mediante benchmark sperimentali consolidati, al fine di valutarne la capacità di prevedere la posizione di innesco della cricca e il comportamento di propagazione sotto diverse condizioni di carico.

Questo approccio combinato consente di sfruttare la semplicità della VCCT —che richiede esclusivamente i valori di tenacità a frattura per modellare la propagazione —compensandone al contempo i limiti nella previsione dell'innesco tramite l'impiego del CZM. Il risultato è uno strumento versatile e accurato per l'analisi della delaminazione nei laminati compositi.

Compositi / 279

MODELLO SHEAR-LAG PER LA PREVISIONE DELLA PERDITA DI RIGIDEZZA IN LAMINATI IN COMPOSITO CRICCATI E SOGGETTI A CARICHI GENERICI

Author: Matteo De Boni¹

Co-authors: Lucio Maragoni ²; Marino Quaresimin ²; Paolo Andrea Carraro ²

¹ *Università degli Studi di Padova*

² *Università di Padova*

Corresponding Authors: marino.quaresimin@unipd.it, paoloandrea.carraro@unipd.it, matteo.deboni.1@phd.unipd.it, lucio.maragoni@unipd.it

Nel corso della loro vita utile, i componenti strutturali realizzati in materiale composito sono spesso caratterizzati da una progressiva perdita di rigidità, causata principalmente dall'innesco e dalla propagazione di molteplici cricche all'interno del materiale. Questa riduzione di rigidità può compromettere il corretto funzionamento del componente e portare a condizioni di lavoro non sicure. È quindi immediatamente evidente la necessità di sviluppare dei modelli analitici efficienti, in grado di stimare la riduzione di rigidità in un componente danneggiato.

Nel corso degli ultimi anni, diversi modelli sono stati proposti per affrontare questo tipo di problema, e tra i più significativi e ampiamente utilizzati vi sono i cosiddetti modelli shear-lag. Tuttavia, da un'attenta revisione della letteratura disponibile, si evidenzia l'assenza di un modello che non richieda parametri aggiuntivi o procedure iterative, e che sia in grado di tener conto della presenza di flessione e torsione in un laminato generico criccato. La capacità di includere carichi di flessione/torsione o lay-up non simmetrici in modelli predittivi di immediata utilità pratica come questi, rappresenta un vantaggio significativo, soprattutto considerando le complesse condizioni di carico a cui sono soggetti la maggior parte dei componenti reali.

In questo lavoro viene quindi proposto un modello shear-lag per la previsione della perdita di rigidità in un laminato in composito criccato e soggetto a carichi generici. Dopo una panoramica generale sulla natura e le ipotesi del metodo proposto, verranno presentati risultati quantitativi per diversi casi studio, e questi verranno confrontati con risultati sperimentali presenti in letteratura.

Compositi / 371

Vernice meccanoluminocromica per il rilevamento d'impatti su laminati compositi

Authors: Andrea Zucchelli¹; Chiara Gualandri²; Daminano Genovese³; Emma Contini²; Francesco Mongioi¹; Lorenzo Gatti²; Lucia Maini³; Tommaso Maria Brugo¹; Tommaso Ternelli¹

¹ *University of Bologna - DIN*

² *Dipartimento di Chimica - Università di Bologna*

³ *Dipartimento d'Ingegneria Industriale - Università di Bologna*

Corresponding Authors: a.zucchelli@unibo.it, emma.contini2@unibo.it, lorenzo.gatti12@unibo.it, l.maini@unibo.it, francesco.mongioi2@unibo.it, tommaso.ternelli@unibo.it, tommasomaria.brugo@unibo.it, c.gualandri@unibo.it, damiano.genovese2@unibo.it

L'impiego di materiali compositi in ambito aerospaziale presenta criticità legate alla suscettibilità agli impatti. Per risolvere tale problematica, sono stati sviluppati sistemi di monitoraggio strutturale (SHM) in grado di rilevare danni e monitorare l'integrità dei laminati in tempo reale. Tuttavia, tali sistemi richiedono l'integrazione di sensori, quali ad esempio i reticoli di Bragg o materiali piezoelettrici, che, a causa della loro fragilità, possono compromettere le proprietà meccaniche del composito ospitante. Inoltre, la gestione dei segnali implica complessità legate a cablaggi, connessioni e interferenze, con impatti negativi su peso, affidabilità e costi della struttura stessa. In questo contesto i materiali meccanoluminocromici (MLC) offrono una valida alternativa, poiché modificano il loro spettro di emissione in risposta a stimoli meccanici.

In questo lavoro, un additivo MLC è stato disperso in una matrice polimerica per ottenere una vernice intelligente, combinando sensibilità meccanoluminocromica e buone proprietà meccaniche. In particolare, un polimero di coordinazione ibrido (HCP) a base di rame è stato disperso per la prima volta in una vernice epossidica termoindurente. La vernice intelligente sviluppata è stata applicata su laminati in CFRP. Quest'ultimi sono stati testati ad impatto a bassa velocità (LVI), generando danni appena visibili (BVD) alla luce naturale. Le immagini della zona d'impatto, esposta a luce ultravioletta (UV), sono state quindi acquisite tramite fotocamera digitale in formato RAW ed analizzate mediante un algoritmo in Matlab appositamente sviluppato. L'integrale del rapporto verde su

blu di ciascun pixel della zona d'impatto ha mostrato una correlazione quasi lineare con la massima forza massima d'impatto misurata durante i test effettuati a differenti energie. Tramite l'algoritmo è stato quindi possibile determinare la mappa di pressione massima sviluppata durante l'impatto. Il danno interno è stato quindi valutato mediante analisi micrografica e correlato alla risposta meccanoluminocromica.

In conclusione, la vernice intelligente sviluppata rappresenta una soluzione efficiente, economica e facilmente implementabile per il rilevamento di danni da impatto sviluppati nelle strutture in composito.

Compositi / 381

Experimental evaluation of static and fracture behaviour across manufacturing stages of CMC material

Author: Sana ULLAH¹

Co-authors: Angelo De Fenza²; Gennaro Scarselli³; Mario De Stefano Fumo²; Riccardo Nobile¹

¹ *University of Salento*

² *Italian Aerospace Research Centre (CIRA)*

³ *University of Southampton*

Corresponding Authors: sanaullah.sanaullah@unisalento.it, a.defenza@cira.it, riccardo.nobile@unisalento.it, g.scarselli@soton.ac.uk, m.destefano@cira.it

Objective

Mechanical characterization of Ceramic Matrix Composite (CMC) was performed using a comprehensive experimental tests composed of static tests (tensile, compression and three point-bending) on all manufacturing stages (CFRP, C/C, uncoated and coated CMC) and fracture tests (DCB, ENF and SENB) on final coated CMC. As the final mechanical behaviour of the CMC material is the result of all the changes induced by manufacturing stages, it is important from a scientific and technical point of view to understand not only the change of the main mechanical and constitutive properties, but also the failure modes that characterize each stage. Therefore, the main objective of the research activity is to analyze the manufacturing-induced changes in mechanical properties before and after pyrolysis and silicon infiltration. Further, SiC surface coating effects were also evaluated comparing the mechanical properties with uncoated CMC. Finally, fracture tests have been carried out on the final CMC coated material to provide not only the fracture toughness values both in mode I and II, but also an understanding about fracture mechanism. The overall activity will help to analyze the underlying failure mechanism in case of static and fracture failure using mechanical properties to refine manufacturing process and damage tolerance parameters to define the design criteria of the components in aerospace industry.

Materials and Methodology

CMC composite material is manufactured using Liquid Silicon Infiltration (LSI). The manufacturing process starts with a 2x2 impregnated fabric with phenolic resin used to form CFRP. This laminate then undergoes a pyrolysis process at high temperature evaporating resin, and an amorphous porous C/C composite is formed. Then, liquid silicon is infiltrated in that C/C composite to finally develop C/SiC CMC. Finally, SiC surface coating is applied to improve mechanical properties. Static tests have been performed using two layup with orientation 0°/90° and ±45° according to ASTM standards and six samples for each type of test were considered. All tests were carried out on universal servo hydraulic material testing system MTS810 with a maximum load capacity of 100 kN. During tensile tests two extensometers were attached to the gauge area of the sample to measure the axial and transversal strain, which allows evaluating stress-strain behavior and Poisson ratio. For the fracture tests, mode I interlaminar fracture energy was evaluated by a Double Cantilever Beam (DCB) test according to ASTM D5528 standards. Specifically, piano hinges were glued to the outer surfaces of the sample having an initial pre-crack length of 53 mm in the half thickness of the sample. DCB test is performed in several steps of loading and unloading cycles and the crack propagation during each cycle is measured using a DRS system capturing 25 images/second. To evaluate mode II fracture energy, End Notch Flexural (ENF) test was carried out on the sample having similar geometry as in DCB test and 3-point bending load is applied to generate mode II sliding crack using AITM standards. Finally, to measure fracture toughness value, Single Edge Notch Bending (SENB) test is performed on sample having notch with pre crack of 0.6 mm in the lower surface of in the thickness

direction of the sample. 3-point bending load is applied according to ASTM C1421 standards and load deflection curve is developed.

Results and Discussion

Static tests on all four stages namely (CFRP and pyrolysed C/C, uncoated CMC and coated CMC) showed a consistent stress-strain behavior confirming the reproducibility of the tests. During initial two stages, CFRP and pyrolysed C/C, the mechanical strength and failure strain is leading in CFRP stage because of minimal porosity and stronger fiber-matrix interphase, while after pyrolysis, strength reduce enormously due to degradation of fibers at high temperature and removing of matrix (phenolic resin). After silicon infiltration, carbon fibers react with silicon to form a SiC matrix and mechanical strength and strain significantly increase. Compressive strength of coated CMC in $0^\circ/90^\circ$ is found to be 42% higher than uncoated CMC while 8% higher in $\pm 45^\circ$ layup than uncoated CMC. This increase is associated with the failure mechanism during test, as micro-buckling and kink bad initiation and coating surface might suppresses the crack on surface. During tensile and 3 point-bending tests, failure is mainly influenced due to tensile loading resulting fiber failure in $0^\circ/90^\circ$ layup and matrix cracking and fiber rotation in $\pm 45^\circ$, hence coating effects remain negligible. Regarding fracture tests results, which has been carried out only on final coated CMC as coating changes mainly the mechanical behaviour of the specimen surface, mode I and mode II fracture energies and fracture toughness values were respectively 410 J/m^2 , 631 J/m^2 and $7.61 \text{ MPa m}^{1/2}$. **Conclusion**

Results of static tests showed that failure mechanism during tests in $0^\circ/90^\circ$ layup is mainly influenced by fiber failure, while in $\pm 45^\circ$ composite it is mainly governed by matrix cracking and fiber rotation. After each stage of manufacturing, significant changes in mechanical properties are observed due to manufacturing process at each stage. Results of fracture tests revealed that coated CMC has strong resistance to crack growth in both mode I and mode II crack opening. Finally higher fracture toughness and work of fracture (WOF) values under bending loads indicate enough toughness to arrest the small cracks before reaching the failure.

Compositi / 393

Previsione del comportamento a fatica di giunti incollati in composito, basata sull'identificazione dei parametri tramite test standard indipendenti

Authors: Paolo Andrea Carraro¹; Marino Quaresimin¹; Giannis Floros²; Serafin Sanchez-Carmona³; Alberto Barroso³

¹ Università di Padova

² University of Patras

³ University of Seville

Corresponding Author: paoloandrea.carraro@unipd.it

Questo lavoro è uno dei risultati della COST action CertBond (CA18120), finalizzata a definire una roadmap per la certificazione di strutture primarie incollate in ambito aeronautico. L'obiettivo del presente lavoro è duplice: da un lato, validare un modello previsionale del danno e della vita a fatica in giunti incollati in composito, dall'altro indagare l'affidabilità dell'uso di prove standard indipendenti per l'identificazione dei parametri del modello. Tali prove sono state eseguite nell'ambito del progetto CertBond attraverso un Round Robin Exercise precedente. I parametri del modello di fatica sono stati quindi ricavati dai dati ottenuti in questo programma sperimentale.

Successivamente, il modello è stato applicato a giunti single-lap ed i risultati sono stati confrontati con quelli di test a fatica condotti nel presente lavoro. Il modello, basato sulla singolarità delle tensioni locali per l'innescò della cricca, combinato con un criterio di propagazione in Modo Misto, fornisce stime accurate della vita spesa per l'innescò e la propagazione delle cricche, nonché per la rottura finale.

Le proprietà del materiale richieste per il modello sono rappresentate dai valori dell'ERR critico in Modo I e Modo II, così come dalle leggi di potenza in Modo I e II che correlano la velocità di propagazione all'ERR. Queste proprietà possono essere ottenute tramite prove indipendenti su provini DCB ed ENF, e quindi utilizzate con successo per modellare geometrie e condizioni di carico più complesse.

Inoltre, è necessaria anche la curva che mette in relazione il fattore di intensità delle tensioni generalizzato (NSIF) con il numero di cicli per l'innescò della cricca, nonché la sua distribuzione statistica.

Questa non può essere ottenuta tramite prove DCB ed ENF, ma richiede test su giunti incollati con la stessa geometria d'angolo (angolo di apertura) del giunto per il quale si vuole effettuare la previsione. Tuttavia, è stato dimostrato che, attraverso prove indipendenti e la strategia di modellazione proposta, il comportamento a fatica del giunto può essere ben previsto sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo.

Compositi / 394

Monitoraggio strutturale di laminati in composito mediante tecniche di machine learning applicate a misure elettriche

Authors: Alessandro Pontefisso¹; Mattia Guidolin¹; Monica Reggiani¹; Michele Zappalorto²

¹ *Università di Padova*

² *Università degli Studi di Padova- Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali*

Corresponding Authors: monica.reggiani@unipd.it, alessandro.pontefisso@unipd.it, mattia.guidolin@unipd.it, michele.zappalorto@unipd.it

Introduzione

I compositi a matrice polimerica rinforzati con fibre continue si distinguono per le loro eccellenti proprietà meccaniche, ma, nonostante il vasto potenziale applicativo, la loro adozione su larga scala è tuttora vincolata da sfide tecniche irrisolte, specialmente riguardo ai meccanismi di rottura. La natura dei cedimenti tipici di questi laminati ne rende complesso il monitoraggio e incerta la valutazione dell'integrità strutturale. Tali limitazioni ne frenano l'impiego in settori strategici dove la sicurezza dell'utente è prioritaria, accrescendo l'esigenza di protocolli predittivi e sistemi di monitoraggio (SHM) affidabili. In questo contesto, hanno acquisito rilevanza le tecniche che correlano il degrado del materiale alle variazioni delle sue proprietà elettriche, definendo modelli capaci di interpretare l'incremento della resistenza elettrica in funzione dell'estensione del danno.

In letteratura il modello proposto da Zappalorto et al. [1] offre, a partire dalle proprietà di rigidità e di conducibilità elettrica del materiale, la possibilità di predire la perdita di rigidità di un laminato al manifestarsi di danneggiamento. In particolare, a partire dalla misura dell'aumento di resistenza elettrica, misurata sul piano nella direzione di carico, e nota la distanza media tra le cricche trasversali, nonché l'estensione media della delaminazione, è possibile calcolare la variazione di rigidità. Tale metodo richiede quindi una misura quantitativa dell'estensione del danno, o limita l'utilizzatore alla conoscenza di un intervallo entro cui la proprietà indagata varia in funzione della variazione di resistenza elettrica.

Obiettivo del lavoro

Per cercare di fornire un'alternativa alla misurazione quantitativa del danno, gli autori di questo lavoro hanno impiegato una seconda misurazione della variazione di resistenza elettrica nel laminato, ovvero quella attraverso lo spessore, per sviluppare un metodo in grado di stimare la variazione di rigidità.

Metodo

L'equazione proposta da Zappalorto et al. [1] è stata combinata a mezzo di tecniche di machine learning con le misurazioni di resistenza elettrica attraverso lo spessore, facendo leva su un dataset creato tramite analisi alle differenze finite su configurazioni molteplici di danno. Risulta quindi possibile sviluppare un interpolatore che lega l'estensione del danno espresso secondo i parametri individuati dal modello analitico con la variazione di conducibilità elettrica sia nella direzione di carico (come da modello analitico) che attraverso lo spessore (da dataset numerico), consentendo quindi di stimare tali parametri di danno ed impiegarli nell'equazione analitica della perdita di rigidità.

Risultati e conclusione

L'analisi dimostra la fattibilità della soluzione proposta, evidenziando come la misura della variazione di resistenza elettrica attraverso lo spessore, in combinazione con quella lungo la direzione di carico, permetta una previsione della perdita di rigidità del componente. Emerge inoltre come tale tecnica presenti una efficacia che varia con le proprietà della configurazione in esame, e che quindi il suo impiego nella pratica applicativa richieda una qualifica preliminare.

Bibliografia

[1] Zappalorto, M., Carraro, P. A., & Quaresimin, M. (2022). Modelling the correlation between the electrical resistance and stiffness degradation in conductive composite laminates with complex damage scenarios. *Composite Structures*, 280, 114914.

Compositi / 396

Un software innovativo per prevedere l'evoluzione del danno a fatica e la perdita di rigidità in componenti strutturali in materiale composito.

Authors: Lucio Maragoni¹; Marino Quaresimin¹; Paolo Andrea Carraro¹

¹ *Università di Padova*

Corresponding Authors: paoloandrea.carraro@unipd.it, marino.quaresimin@unipd.it, lucio.maragoni@unipd.it

I materiali compositi rivestono un ruolo fondamentale nel lightweight design, grazie al loro elevato rapporto prestazioni/peso, che consente di ridurre il consumo di carburante e le emissioni di CO₂, e di aumentare l'efficienza dei sistemi di produzione energetica e di automazione.

A causa della loro struttura multiscala, i materiali compositi sottoposti a carichi ciclici mostrano un comportamento del danno complesso, caratterizzato dall'innescò e dalla propagazione di cricche multiple nella matrice, delaminazione, e rottura delle fibre. L'evoluzione progressiva del danno comporta una perdita di rigidità e una redistribuzione degli sforzi che promuove la separazione finale del componente. Gli strumenti di progettazione tradizionali e i software commerciali non sono in grado di fornire una stima accurata dell'innescò del danno, dell'andamento della rigidità e della rottura finale nei compositi, mentre strumenti accademici più precisi richiedono tecniche computazionali molto onerose, che ne limitano l'utilizzo anche per geometrie semplici. Ciò porta alla progettazione di strutture sovradimensionate e più pesanti, per compensare la scarsa affidabilità dei risultati di analisi.

Negli ultimi due decenni, il gruppo Compositi del DTG-UNIPD ha lavorato intensamente allo sviluppo di modelli multi-scala e multi-meccanismo in grado di prevedere con elevata accuratezza la progressione del danno in un laminato composito mediante un approccio a danno discreto, in cui ogni evento di danneggiamento viene trattato individualmente. Recentemente è stata sviluppata una strategia innovativa brevettata per integrare tali modelli nei software commerciali agli elementi finiti, ottenendo una combinazione di elevata precisione nelle previsioni ed efficienza computazionale.

Questa strategia è ora implementata nel software FLA distribuito da RESCOMP Engineering (spinoff dell'Università di Padova) ed è stata applicata alla previsione della perdita di rigidità e della rottura finale di un componente automobilistico (montante dell'ala) in collaborazione con Dallara Automobili. Il confronto con prove sperimentali dedicate ha mostrato un accordo soddisfacente tra le previsioni del software e i dati sperimentali, evidenziando la capacità dello strumento di migliorare sia le prestazioni sia la sicurezza dei componenti in composito nella fase di progettazione, riducendo inoltre i costi tipicamente associati alle estese campagne sperimentali necessarie per la validazione dei modelli tradizionali.

Compositi / 405

ASSESSING THE POTENTIAL OF OPUNTIA FICUS-INDICA SPINES FOR BIODEGRADABLE COMPOSITES

Authors: Calogero Volpe¹; Leonardo Pagnotta¹

¹ *Università della Calabria*

Corresponding Authors: calogero.volpe@unical.it, leonardo.pagnotta@unical.it

Natural reinforcements derived from *Opuntia ficus-indica* have attracted increasing attention for biodegradable composite applications, particularly in agriculture and packaging. While cladode fibers, flours, mucilage, and their combinations have already been investigated, spines used as standalone reinforcements remain largely unexplored despite their hierarchical structure and potentially favorable mechanical properties.

This study assesses the potential use of *Opuntia ficus-indica* spines as reinforcements for biodegradable composites, using polylactic acid (PLA) as a reference matrix. After providing a detailed overview of the current state of research in this field, integrating available experimental data and highlighting the main trends governing the mechanical behavior of plant-based reinforcements, the study develops and applies a comparative micromechanical predictive framework based on mechanical and morphological data available in the literature.

Within this framework, the mechanical response of PLA-based composites reinforced with *Opuntia* spines is predicted and compared with that of related systems based on other *Opuntia*-derived constituents. The comparison is further extended to potential composite systems incorporating spines from other cactus species. A unified micromechanical approach is adopted to estimate elastic modulus and tensile strength as a function of reinforcement type and volume fraction.

The results indicate that *Opuntia* spines exhibit a high potential for mechanical reinforcement, with the micromechanical predictions showing higher stiffness and strength than those associated with the other plant-derived constituents considered in this study. These trends are consistent with their high cellulose crystallinity, aligned microfibrillar structure, and favorable geometry. Preliminary experimental observations, although limited and exploratory, showed trends consistent with the micromechanical predictions.

Overall, the proposed micromechanical framework provides a structured basis for comparing different reinforcement strategies and supports the potential of *Opuntia ficus-indica* spines as promising candidates for biodegradable composite applications.

Compositi / 410

Analisi sperimentale del comportamento a fatica di un composito polimerico rinforzato con fibre di carbonio continue ottenuto per fabbricazione additiva

Authors: Antoine Pujol¹; Alessandra Panerai²; Luca Michele Martulli²; Michele Carboni²; Andrea Bernasconi²

¹ ENS Paris-Saclay

² Politecnico di Milano

Corresponding Authors: lucamichele.martulli@polimi.it, michele.carboni@polimi.it, antoine.pujol@ens-paris-saclay.fr, andrea.bernasconi@polimi.it, alessandra.panerai@polimi.it

Obiettivo

In questo lavoro è stato analizzato il comportamento a fatica ad alto numero di cicli di un composito polimerico rinforzato con fibre di carbonio continue (CCFRP), ottenuto mediante fabbricazione additiva per co-estrusione. In particolare, lo studio si concentra sulla caratterizzazione congiunta della risposta meccanica e termica del materiale sottoposto a sollecitazioni cicliche, al fine di valutarne il potenziale impiego in applicazioni strutturali.

Metodi

Sono stati realizzati provini in PA12 rinforzato con fibre di carbonio continue mediante tecnologia FFF (Fused Filament Fabrication) con sistema Anisoprint. Dopo una fase preliminare di prove di trazione quasi-statica, necessarie per determinare le proprietà meccaniche di riferimento (UTS $\approx$ 570 MPa), sono stati condotti test di fatica tensione-tensione ($R = 0,1$). I livelli di carico applicati sono stati fatti variare tra il 65% e l'80% della resistenza ultima. Durante le prove sono stati acquisiti segnali di forza, spostamento e temperatura superficiale. Il comportamento meccanico è stato analizzato tramite l'evoluzione dell'area di isteresi e del modulo di Young dinamico, mentre la risposta termica è stata valutata mediante monitoraggio della variazione di temperatura. È stato inoltre effettuato un test ex-situ con osservazioni al microscopio per studiare l'evoluzione dei difetti durante la fatica.

Risultati

Le prove di trazione hanno evidenziato prestazioni superiori per provini con tab rettangolari rispetto a quelli smussati, con rottura prevalentemente nel tratto utile e comportamento fragile. I risultati

delle prove di fatica mostrano una dispersione tipica ma permettono di definire una curva di Wöhler descritta dalla legge di Basquin ($A \approx 635 \text{ MPa}$, $b \approx -0,04$). Il materiale presenta una resistenza a fatica intermedia rispetto a laminati compositi tradizionali e ad altri CCFRP prodotti con tecnologie differenti. Dal punto di vista termico, l'incremento di temperatura durante le prove è risultato limitato ($<3^\circ\text{C}$), indicando un comportamento dominato da meccanismi meccanici piuttosto che termici. L'analisi dell'area di isteresi e del modulo dinamico ha evidenziato un comportamento in due fasi: una fase iniziale di stabilizzazione con riduzione della dissipazione e aumento della rigidità, seguita da una fase di danneggiamento con incremento della dissipazione e degradazione del modulo. Le osservazioni microscopiche hanno mostrato che i difetti di fabbricazione (porosità e discontinuità di matrice) si orientano inizialmente lungo la direzione di carico, per poi crescere e coalescere fino a determinare la rottura.

Conclusioni

Il CCFRP prodotto tramite co-estrazione presenta un comportamento a fatica caratterizzato da una risposta termica debole e da meccanismi di danneggiamento dominati dall'evoluzione dei difetti microstrutturali. La resistenza a fatica risulta promettente per applicazioni strutturali, pur rimanendo inferiore rispetto a compositi tradizionali ottimizzati. Il ruolo critico dei difetti di fabbricazione evidenzia la necessità di migliorare i processi produttivi e la qualità dell'interfaccia fibra-matrice. Futuri sviluppi dovrebbero includere studi in-situ e tecniche avanzate di monitoraggio del danno per una comprensione più approfondita dei meccanismi di rottura e per l'ottimizzazione delle prestazioni del materiale.

Compositi / 415

SHM mediante onde ultrasoniche guidate su flaperon in CFRP termoplastico: validazione in condizioni operative

Authors: Alessandro De Luca¹; Antonio Aversano²; Antonio Polverino²; Donato Perfetto²; Francesco Caputo³; Giuseppe Lamanna⁴; Luciano Pianese²

¹ *Università della Campania Luigi Vanvitelli, Dipartimento di Ingegneria*

² *Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli*

³ *Università della Campania Luigi Vanvitelli*

⁴ *Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli"*

Corresponding Authors: giuseppe.lamanna@unicampania.it, antonio.polverino@unicampania.it, luciano.pianese@unicampania.it, donato.perfetto@unicampania.it, antonio.aversano@unicampania.it, alessandro.deluca@unicampania.it, francesco.caputo@unicampania.it

Il presente lavoro descrive la valutazione sperimentale di una metodologia di Structural Health Monitoring basata sull'impiego di onde ultrasoniche guidate, applicata a un dimostratore full-scale di flaperon sviluppato nell'ambito del programma Clean Sky 2, nel contesto dell'iniziativa Next Generation Civil TiltRotor. Il dimostratore rappresenta una fase avanzata del percorso di validazione secondo l'approccio building-block ed è realizzato in laminato composito termoplastico in PEEK rinforzato con fibre di carbonio, nello specifico Toray Cetex® TC1200. Tale materiale coniuga elevate prestazioni meccaniche con una maggiore riciclabilità, risultando coerente con gli obiettivi di sostenibilità delle future strutture aeronautiche.

Il sistema di monitoraggio è costituito da una rete di trasduttori piezoelettrici installati sulla superficie del componente, utilizzati per l'eccitazione e l'acquisizione di onde guidate secondo una configurazione pitch-catch di tipo round-robin. La campagna sperimentale è stata progettata per valutare la risposta del sistema SHM in presenza di diverse condizioni strutturali e operative. In particolare, sono state considerate configurazioni integre e configurazioni rappresentative di danneggiamento, sia in assenza di carico sia in presenza di un carico quasi-statico. Il danneggiamento associato a un impatto a bassa velocità, LVI (Low Velocity Impact), è stato simulato mediante un approccio reversibile basato sull'applicazione di una massa aggiunta, in grado di riprodurre gli effetti principali di scattering delle onde guidate senza compromettere l'integrità del dimostratore. Contestualmente, un carico quasi-statico rappresentativo di condizioni aerodinamiche è stato applicato in corrispondenza del bordo d'attacco, con l'obiettivo di riprodurre stati tensionali compatibili con le condizioni operative del componente.

I risultati ottenuti evidenziano la capacità della metodologia proposta di individuare variazioni di segnale riconducibili alla presenza di danneggiamento, limitando al contempo l'influenza delle alterazioni indotte dal carico operativo. Tali evidenze confermano la robustezza dell'approccio sviluppato

e ne supportano l'avanzamento verso livelli più elevati di maturità tecnologica per l'applicazione di sistemi SHM basati su onde guidate a grandi strutture aeronautiche in composito termoplastico.

Compositi / 244

Characterisation of High-Risk Zone Failure Modes in Self-Healing Composites using Physics-Informed Neural Networks

Author: Claudia Barile¹

Co-author: Vimalathithan Paramsamy Kannan¹

¹ *Politecnico di Bari*

Corresponding Authors: pk.vimalathithan@poliba.it, claudia.barile@poliba.it

Self-healing materials are a class of advanced engineering material that can autonomously repair itself by mimicking the healing system of organic tissues. The emergence of self-healing composites has been recognised as a substantial advancement in enhancing the reusability and in extending the service life of composite structures. This emergence necessitates a comprehensive characterisation of their failure behaviour under various load conditions. The present study investigates the failure behaviour of high-performance self-healing composites under static tensile load. A particular emphasis is given to the failure behaviour at the high-risk zones, which contributes to the catastrophic failure of the composite. In order to achieve this research objective, an acoustic emission (AE) and artificial intelligence (AI) based technique has been integrated into the analysis. The AE signals registered from the high-risk zones during the tensile tests are acquired. Representative physical features of the AE signal showing weak correlation are selected using correlation analysis. A deep learning neural network (NN) is built to classify the AE signals generated from different failure modes. The network is modelled to be trained using the physical features and the time domain AE signal, thereby developing a physics-informed neural network (PI-NN) framework. The PI-NN framework classifies the AE signals generated from tensile and shear failures in the self-healing composites under high-risk tensile load conditions. The results are validated using fractographic analysis using scanning electron microscopy (SEM). The research outcomes of this study aid in characterising the failure behaviour of the self-healing composites in the virgin, damaged, and healed states.

Compositi / 433

Effetto di z-pin sulla resistenza statica di giunzioni composite

Author: Gabriela Loi¹

Co-authors: Daniele Loi¹; Gianluce Marongiu¹; Francesco Aymerich²

¹ *Università degli Studi di Cagliari*

² *Università di Cagliari - Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Chimica e dei Materiali*

Corresponding Authors: gianluca.marongiu@unica.it, danielle.lai@unica.it, gabriela.loi@unica.it, francesco.aymerich@unica.it

Nelle applicazioni che coinvolgono giunzioni di elementi compositi a spessore sottile, il processo di co-curing è ampiamente preferito rispetto alle tecniche di giunzione tradizionali, in quanto migliora la capacità portante del giunto e induce una distribuzione degli sforzi più uniforme nella regione incollata. Tuttavia, la ridotta resistenza trasversale dei materiali fibro-rinforzati e le elevate tensioni di peeling e taglio che si sviluppano ai bordi dell'interfaccia incollata rendono le giunzioni composite ottenute con processi di co-curing particolarmente suscettibili allo sviluppo di delaminazioni sull'interfaccia di giunzione e, quindi al debonding. Per questo sono state proposte numerose tecniche per migliorarne la tenacità a frattura. Tra queste, lo z-pinning —che consiste nell'inserimento

di sottili elementi cilindri fibrosi o metallici attraverso lo spessore del materiale non ancora indurito —si è dimostrato efficace nel migliorare le prestazioni strutturali di diverse configurazioni di giunto. La presenza dei pin contrasta la propagazione della delaminazione mediante la formazione di una zona di bridging in prossimità del fronte di avanzamento della cricca. Ciò nonostante, la maggior parte degli studi sullo z-pinning ha preso in esame schemi di rinforzo che prevedono l'inserimento di pin sull'intera regione di sovrapposizione, con conseguenti elevate densità di pin che possono compromettere le proprietà di rigidità e resistenza del materiale composito.

Per questo motivo, il presente studio esamina le prestazioni quasi-statiche e la progressione del danno in giunzioni composite del tipo step-lap (giunzioni a scalino) selettivamente rinforzate con pin z metallici. I giunti, realizzati con una sequenza di laminazione cross-ply e con una lunghezza di sovrapposizione di 40 mm, sono stati rinforzati mediante pin in acciaio inossidabile. I pin sono stati inseriti manualmente in fori realizzati con un ago di 0.5 mm di diametro e disposti su quattro file parallele alla linea di giunzione. Giunzioni rinforzate e non-rinforzate sono state messe in sacco a vuoto e consolidate in autoclave. I pannelli ottenuti sono stati successivamente tagliati per ricavare provini rettangolari di larghezza pari a 20 mm da sottoporre a prove di trazione quasi-statica.

I risultati sperimentali indicano che la presenza dei rinforzi non modifica i meccanismi di danneggiamento che governano la rottura delle giunzioni testate. Infatti, il processo di danneggiamento delle giunzioni inizia con la formazione di delaminazioni ai bordi della linea di giunzione. Successivamente, le delaminazioni propagano attraverso la regione giuntata fino al completo debonding degli aderenti. Al fine di acquisire una comprensione più approfondita dei meccanismi di danneggiamento e di tenacizzazione indotti dai pin, è stato sviluppato un modello agli elementi finiti dei giunti per ognuna delle configurazioni di rinforzo considerate. Il comportamento della giunzione e l'interazione tra i pin e gli aderenti compositi sono stati modellati impiegando una legge di danneggiamento coesivo. Le previsioni numeriche mostrano un soddisfacente accordo con le osservazioni sperimentali in termini di resistenza ultima, curve forza-deformazione e spostamento, ed evoluzione della cricca di debonding. Il modello proposto riproduce correttamente l'effetto benefico dei pin sulla resistenza statica dei giunti e sulla loro tolleranza al danno, dimostrando che la presenza dei pin non ritarda l'innesco della delaminazione, bensì ne contrasta la propagazione riducendo il tasso di rilascio di energia —e dunque l'energia disponibile per la propagazione—al fronte della cricca.

Compositi / 254

Uncertainty identification related to thermoplastic composite materials under impact loading

Author: Dayou Ma¹

Co-authors: Shunqi Zhang¹; Icaro Araujo²; Otávio Bianchi²; Sandro Amico²; Andrea Manes³

¹ Politecnico di Milano

² Federal University of Rio Grande do Sul

³ Politecnico di Milano

Corresponding Authors: shunqi.zhang@polimi.it, andrea.manes@polimi.it, dayou.ma@polimi.it

Thermoplastic composites have gained significance due to their superior properties and recycling potential. However, their mechanical performance is highly sensitive to the manufacturing process, commonly referred to as material uncertainty. In this study, thermoplastic composites of thermoplastic polyurethane (TPU) and Kevlar fabric (+45/-45) were produced via hot compression moulding, and their performance was evaluated under low-velocity impact tests. A ply-scale strategy was proposed for modelling the mechanical behaviour during the loading process, in which the uncertainty associated with thickness variation due to manufacturing was identified and modelled. Based on multiple impact tests on the composite panels and the numerical results, the effects of material uncertainty on strength and stiffness were analysed, emphasizing the importance of accounting for it in the design of thermoplastic composite parts.

Compositi / 314

Modellazione del legame costitutivo di compositi ceramico-polimerici soggetti a compressione monoassiale

Author: Chiara Battaglia^{None}

Co-authors: Bernardo Disma Monelli¹; Federico Conforti²; Marco Beghini¹; Tommaso Grossi¹

¹ *Università di Pisa*

² *Surfaces Group*

Corresponding Authors: federico.conforti@lunabrasivi.it, tommaso.grossi@ing.unipi.it, marco.beghini@unipi.it, chiara.batxyz@gmail.com, bernardo.disma.monelli@unipi.it

I compositi particellari polimerico-ceramici trovano un'ampia applicazione nella produzione di utensili abrasivi per la finitura superficiale di pietre naturali e artificiali. In molti casi il processo produttivo di tali utensili si articola in tre fasi: miscelazione delle polveri, loro precompattazione e reticolazione della componente polimerica in maniera tale da ottenere un manufatto avente le caratteristiche richieste.

Nella fase di precompattazione il materiale è caratterizzato da proprietà meccaniche estremamente ridotte in termini di rigidità e resistenza. In questa condizione, durante le operazioni di movimentazione necessarie al trasferimento dalla postazione di compattazione a quella di reticolazione, il manufatto è soggetto prevalentemente a sollecitazioni di compressione monoassiale, i cui livelli possono compromettere in modo irreversibile sia la geometria sia l'integrità del pezzo. La conoscenza del legame costitutivo tensione-deformazione per questa classe di materiali in tali condizioni risulta quindi cruciale per minimizzare la percentuale di scarti dovuti al mancato rispetto della forma definita dalla specifica oppure alla perdita di integrità strutturale.

Il presente lavoro si propone di determinare il legame costitutivo tensione-deformazione per questa classe di materiali nella condizione di compressione monoassiale e di sviluppare una procedura per la stima dei relativi parametri costitutivi. A tale scopo è stata condotta una campagna sperimentale di prove di compressione monoassiale su tre differenti tipologie di materiali, ciascuna analizzata in tre diverse condizioni di precompattazione.

L'analisi fenomenologica della risposta meccanica e l'interpretazione delle curve forza-schiacciamento hanno consentito di individuare una legge costitutiva in grado di rappresentare coerentemente la fisica del problema. Successivamente è stato quindi sviluppato un modello meccanico della prova di compressione, capace di simulare il comportamento di provini di geometria e dimensioni note, assumendo assegnata la legge costitutiva, e di ricavare la corrispondente curva forza-schiacciamento al variare dei parametri del modello. Tale modello è stato, infine, implementato in un algoritmo di ottimizzazione bayesiana il quale, attraverso il confronto tra le curve sperimentali e quelle numeriche, ha permesso la stima dei parametri costitutivi per ciascun materiale e condizione considerati.

Compositi / 439

Crashworthiness di compositi ibridi con rinforzi tridimensionali: effetto delle architetture through-thickness su delaminazione e assorbimento energetico

Authors: Alberto Ciampaglia¹; Davide S. Paolino²; Raffaele Ciardiello¹

¹ *Politecnico di Torino*

² *Politecnico di Torino - DIMEAS*

Corresponding Authors: davide.paolino@polito.it, raffaele.ciardiello@polito.it, alberto.ciampaglia@polito.it

La crescente diffusione dei materiali compositi nei settori automotive, ferroviario e aerospaziale ha reso sempre più rilevante la caratterizzazione della crashworthiness di strutture leggere soggette a carichi impulsivi. In particolare, nei compositi laminati, l'assorbimento energetico durante impatti

sul bordo è fortemente influenzato dai fenomeni di delaminazione interlaminare, propagazione instabile delle cricche e frammentazione del materiale, che determinano modalità di collasso. In questo contesto, i rinforzi tridimensionali (3D), ottenuti mediante fibre passanti nello spessore, rappresentano una soluzione promettente per incrementare la stabilità del collasso e migliorare l'efficienza di dissipazione energetica. Lo studio analizza sperimentalmente la risposta al crash di compositi ibridi rinforzati con differenti architetture 3D innovative, con particolare attenzione all'influenza della geometria del rinforzo e del materiale utilizzato per le fibre through-thickness.

La campagna sperimentale è stata condotta mediante prove di impatto dinamico su provini piani progettati per attivare meccanismi di splaying, delaminazione e frammentazione progressiva del materiale. Sono state investigate differenti configurazioni di rinforzo tridimensionale, variando frequenza, simmetria e tipologia delle fibre passanti nello spessore. La risposta dei materiali è stata valutata attraverso curve parametri di crashworthiness quali Specific Energy Absorption (SEA), Crush Force Efficiency (CFE) e Stroke Crushing Stress (SCS), oltre ad analisi ottiche ad alta velocità dei meccanismi di danneggiamento.

I risultati mostrano che i rinforzi 3D consentono di modificare le modalità di collasso rispetto ai laminati bidimensionali convenzionali, favorendo una frammentazione più progressiva del materiale e riducendo le oscillazioni di carico durante l'impatto. Le configurazioni con maggiore frequenza di fibre through-thickness hanno evidenziato gli incrementi più elevati in termini di assorbimento energetico, con aumenti della SEA fino a circa il 60–70% rispetto alle configurazioni non rinforzate. Inoltre, l'introduzione del rinforzo tridimensionale porta a una maggiore stabilità della risposta crash, con incrementi del CFE e una significativa riduzione dei fenomeni di collasso localizzato e propagazione incontrollata delle cricche. Le osservazioni mediante camere ad alta velocità mostrano che i rinforzi 3D ostacolano l'apertura delle delaminazioni e favoriscono meccanismi di crushing progressivo, incrementando l'energia dissipata durante la frammentazione.

I risultati ottenuti confermano il potenziale dei compositi rinforzati 3D per applicazioni strutturali leggere soggette a impatti dinamici, evidenziando come l'ottimizzazione dell'architettura through-thickness possa rappresentare una strategia efficace per migliorare simultaneamente crashworthiness, stabilità del collasso e sostenibilità dei materiali compositi avanzati.

Compositi / 446

Effetto sinergico di nanoparticelle di TiO₂ e polidopamina (PDA) sulle proprietà meccaniche dei biocompositi in fibra naturale

Authors: Antonino Scianni¹; Antonino Valenza¹; Antonio Pantano²; Guglielmo Marchesa¹; Marco Luciano¹; Nicola Montinaro¹; Vincenzo Fiore¹

¹ Università degli studi di Palermo

² Università degli Studi di Palermo

Corresponding Authors: antonino.valenza@unipa.it, vincenzo.fiore@unipa.it, nicola.montinaro@unipa.it, guglielmo.marchesa@unipa.it, antonio.pantano@unipa.it, marco.luciano@unipa.it

I biocompositi a matrice polimerica rinforzati con fibre naturali rappresentano un'alternativa sostenibile ai compositi tradizionali, ma presentano limitazioni note legate alla scarsa adesione fibra-matrice, con conseguenti effetti negativi sulle prestazioni meccaniche. L'efficace incorporazione e dispersione omogenea di nanoparticelle può aumentare la tenacità della matrice e migliorare l'interazione chimica e meccanica con le fibre, dimostrandosi una strategia promettente per mitigare tali criticità.

Per migliorare l'adesione tra fibre di lino e resina epossidica questo studio analizza la combinazione di nanoparticelle di TiO₂ e polidopamina (PDA). Quest'ultima, formando un rivestimento corrugato sulla superficie delle fibre ne modifica la struttura chimica e morfologica, fungendo da substrato ottimale per un'adeguata deposizione e distribuzione uniforme delle nanoparticelle. Diversi pre-trattamenti delle fibre, condizioni di crescita del rivestimento in PDA, e concentrazione delle

nanoparticelle, sono stati valutati e investigati in termini di caratterizzazione morfologica, chimica, termica e meccanica.

I risultati ottenuti chiariscono le interazioni tra PDA, TiO₂, fibre, e matrice nei singoli step di processo, evidenziando i parametri più influenti sulle prestazioni meccaniche finali. Viene così proposta una strategia di funzionalizzazione ottimizzata, con indicazioni progettuali utili ad ampliare il campo d'impiego strutturale dei biocompositi.

Compositi / 447

Modellazione agli elementi finiti basata sulla microstruttura di compositi Carbon Forged a fibra corta: risposta meccanica e comportamento piezoresistivo.

Author: Emanuele Mattei¹

Co-authors: Alberto Ciampaglia¹; Davide S. Paolino²; Raffaele Ciardiello¹

¹ Politecnico di Torino

² Politecnico di Torino - DIMEAS

Corresponding Authors: emanuele.mattei@polito.it, raffaele.ciardiello@polito.it, davide.paolino@polito.it, alberto.ciampaglia@polito.it

Il presente lavoro riguarda la caratterizzazione sperimentale e la modellazione numerica di un composito a fibra di carbonio lunga discontinua, prodotto internamente e assimilabile a un sistema Carbon Forged/SMC. L'obiettivo principale è valutare la risposta piezoresistiva del materiale e sviluppare un modello agli elementi finiti in grado di rappresentarne l'eterogeneità mesostrutturale, con particolare attenzione alla distribuzione locale delle fibre e alla loro influenza sulla risposta meccanica.

La campagna sperimentale è stata condotta mediante prove di trazione in controllo di spostamento, integrando misure di campo di deformazione tramite Digital Image Correlation e acquisizione simultanea della resistenza elettrica mediante configurazione a due elettrodi. Tale approccio ha permesso di correlare l'evoluzione dello stato deformativo del provino con la variazione normalizzata di resistenza elettrica. In parallelo, analisi di microtomografia a raggi X sono state utilizzate per estrarre informazioni spaziali relative alla frazione volumica locale di fibra e al tensore di orientazione. Questi dati sono stati impiegati per ricostruire numericamente la mesostruttura del materiale e generare automaticamente un modello LS-DYNA basato sull'approccio *CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID, in cui le fibre sono rappresentate mediante elementi beam incorporati nella matrice epossidica, modellata con elementi solidi. Il diametro equivalente dei beam è stato calibrato iterativamente sulla rigidità sperimentale, mentre la rottura delle fibre è stata introdotta tramite una descrizione costitutiva danneggiabile, al fine di evitare sovrastime non fisiche delle tensioni negli elementi di rinforzo.

I risultati sperimentali mostrano, per tutti i provini analizzati, una relazione approssimativamente lineare tra variazione normalizzata di resistenza e deformazione assiale, con fattori di gauge positivi e coerenti. Tale comportamento conferma la possibilità di impiegare il materiale per il monitoraggio dello stato deformativo e dei carichi trasmessi mediante una strumentazione elettrica relativamente semplice. La validazione del modello numerico è stata effettuata confrontando curve forza-spostamento, carichi di rottura, profili sezionali di deformazione lungo la zona utile e modalità di frattura. Il modello riproduce il carico globale di rottura con uno scostamento medio pari a -5,9% e cattura le principali tendenze spaziali dei campi di deformazione misurati sperimentalmente.

In conclusione, il lavoro evidenzia il potenziale dei compositi a fibra di carbonio lunga discontinua come materiali multifunzionali, capaci di combinare prestazioni meccaniche e capacità di auto-monitoraggio piezoresistivo. La metodologia proposta, basata sull'integrazione di prove sperimentali, microtomografia e modellazione mesostrutturale, rappresenta uno strumento utile per la previsione della risposta meccanica di materiali compositi eterogenei. Le discrepanze residue tra modello e prove

sono attribuite principalmente alla porosità indotta dal processo produttivo, che non è stata ancora rappresentata esplicitamente nel modello numerico e costituisce un possibile sviluppo futuro.

Compositi / 409

Sustainable Hybrid Composites for Formula Crash-box Design: Experimental and Numerical Analysis

Authors: Monica Capretti¹; Simonetta Boria¹

Co-authors: Stefano Giancroce²; Matteo Mora²; Giulio Strambi²

¹ *Università di Camerino*

² *HP Composites SpA*

Corresponding Authors: simonetta.boria@unicam.it, monica.capretti@unicam.it

Passive safety components in racing automotive vehicles operate at the intersection of lightweight, structural efficiency, and energy absorption. Although in motorsport applications, carbon fibers remain the standard composite reinforcements with demonstrated mechanical performance and guaranteed structural integrity, growing sustainability requirements have spurred interest in alternative green materials. In this context, natural fibers have been a prominent focus of recent research and industry studies. Their renewability, wide availability, low environmental impact, and good energy-absorption capability make them a promising sustainable alternative to synthetic reinforcements such as carbon fibers. Nonetheless, their mechanical properties are inferior, making the application of natural fibers to structural components still challenging. These structures, indeed, operate under extreme performance conditions whilst simultaneously meeting stringent lightweighting requirements. A possible solution to balance sustainability benefits and performance reduction is hybridization, which integrates conventional and bio-based materials. The ultimate goal of this study is to incorporate flax fibers into a Formula crash-box, aiming to meet certification requirements while reducing the carbon footprint. A design methodology is developed that integrates experimental procedures and finite element analyses to reduce the time and cost of the prototyping phase and optimize the overall design process. The crushing efficiency of the carbon/ and flax/epoxy materials is evaluated by conducting impact tests under varying loading conditions and geometric configurations, with a focus on the effect of curvature on energy absorption. Flat and corrugated coupons, circular and square tubes are tested using pure carbon and flax reinforcements, as well as interply hybrids. Optimized material cards derived from the mechanical characterization of the composites of interest are applied to the properly designed numerical models, which accurately predict the experimental responses. A macro-scale model is then developed to reproduce the structural-level performance observed in standard homologation tests for a carbon crash-box. Finally, flax fibers are successfully incorporated into a hybrid carbon-flax configuration. In particular, a genetic optimization is implemented to determine the optimal stacking sequence that maximizes crashworthiness performance and sustainability of the crash-box. The optimal carbon-flax solution is then tested under the homologation conditions and shows good agreement with the numerical simulation prediction, achieving energy absorption comparable to that of the pure carbon fiber alternative while remaining within the imposed weight limit.

Compositi / 423

Effetto dei CNT sul decadimento delle proprietà meccaniche dei biocompositi in fibra naturale in seguito ad invecchiamento termogroscopico salino

Authors: Antonio Pantano¹; Giuseppe Napoli¹; Guglielmo Marchesa²; Nicola Montinaro²

¹ *Università degli Studi di Palermo*

² *Università degli studi di Palermo*

Corresponding Authors: guglielmo.marchesa@unipa.it, antonio.pantano@unipa.it, nicola.montinaro@unipa.it, giuseppe.napoli@unipa.it

I biocompositi a matrice polimerica rinforzati con fibre naturali rappresentano un'alternativa sostenibile ai compositi tradizionali, ma presentano limitazioni note legate all'elevato assorbimento di umidità e alla scarsa adesione fibra-matrice, con conseguenti effetti negativi sulle prestazioni meccaniche. L'efficace incorporazione di nanoparticelle può aumentare la tenacità della matrice e migliorare l'interazione chimica e meccanica con le fibre, dimostrandosi una strategia promettente per mitigare tali criticità.

Questo studio analizza l'effetto dei nanotubi di carbonio (CNTs) sulla cinetica di assorbimento dell'umidità e sulla degradazione meccanica di biocompositi a base di resina epossidica e fibre di agave, a seguito di invecchiamento termo-igroscopico in ambiente salino. La caratterizzazione meccanica (trazione, flessione, impatto e short-beam shear) è stata condotta in tre condizioni: prima dell'invecchiamento (UNAGED), subito dopo (WET) e dopo un'ulteriore fase di essiccazione (DRY).

I risultati mostrano come i CNTs riducano significativamente l'assorbimento di acqua e migliorino le proprietà meccaniche, con effetti più evidenti nelle condizioni UNAGED e DRY. La concentrazione ottimale è stata individuata in funzione del tipo di sollecitazione e delle condizioni di invecchiamento, chiarendo le interazioni tra CNTs, fibre e matrice a seguito di esposizione termo-igroscopica salina. Questi dati offrono indicazioni progettuali utili ad estendere la vita utile dei biocompositi e a favorirne l'impiego industriale.

Dinamica/Ferroviario / 349

Validazione sperimentale di un modello multibody flessibile ridotto del montante di un carrello elevatore per la previsione dei carichi strutturali

Author: Federico Mammini¹

Co-authors: Francesco Bucchi ¹; Francesco Frendo ¹; Marco Pinelli ²; Michele Sgamma ¹

¹ *Università di Pisa*

² *Toyota Material Handling Manufacturing Italy*

Corresponding Authors: michele.sgamma@cisup.unipi.it, federico.mammini@phd.unipi.it, francesco.bucchi@unipi.it, marco.pinelli@toyota-industries.eu, francesco.frendo@unipi.it

La simulazione accurata delle manovre operative di veicoli industriali è fondamentale per ridurre i costi e i tempi associati alle attività sperimentali. In questo contesto, il miglioramento della capacità predittiva dei modelli multibody con corpi flessibili, in particolare per la stima dei carichi strutturali, riveste un ruolo chiave.

Il presente studio si concentra su un carrello elevatore industriale prodotto da Toyota Material Handling Manufacturing Italy e ha l'obiettivo di migliorare l'affidabilità della simulazione di una prova di superamento di un ostacolo, eseguita con differenti condizioni di carico, mantenendo al contempo un costo computazionale contenuto.

Un aspetto cruciale per una corretta previsione dei carichi trasmessi al telaio del veicolo è la modellazione flessibile del gruppo montante-forche, costituito da più sottostrutture interconnesse. A tal fine, viene adottato un approccio di sintesi modale dei componenti basato sul metodo di Craig-Bampton, per ottenere una rappresentazione flessibile ridotta del sottosistema montante.

Per la validazione del modello, è stata condotta un'ampia campagna sperimentale sulla struttura isolata montante-forche, comprendente prove statiche per analizzare i meccanismi di trasferimento dei carichi, validare le condizioni di vincolo e misurare le cedevolezza della struttura, e prove dinamiche per caratterizzare il comportamento vibrazionale della struttura.

Il modello flessibile ridotto del montante, una volta validato, è stato integrato nel modello multibody completo del veicolo, consentendo di valutare il suo contributo nella previsione dei carichi strutturali

durante la manovra di attraversamento ostacolo. L'efficacia della strategia di modellazione proposta è stata valutata mediante un insieme di indicatori di prestazione (KPI), confrontati direttamente con le misure sperimentali ottenute durante le prove su strada del veicolo completo.

I risultati dimostrano che l'inclusione di una rappresentazione flessibile ridotta del montante migliora significativamente la correlazione tra dati numerici e sperimentali, fornendo uno strumento affidabile ed efficiente dal punto di vista computazionale per la simulazione delle condizioni operative dei veicoli industriali.

Dinamica/Ferroviario / 380

Band Gap Formation in Fractal-Inspired Mechanical Metamaterials: A Study on the Sierpinski carpet Geometry

Authors: Chiara Sperli¹; Francesco Cadini¹; Luca Lomazzi¹

¹ *Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica*

Corresponding Authors: chiara.sperli@polimi.it, francesco.cadini@polimi.it, luca.lomazzi@polimi.it

Elastic wave control via mechanical metamaterials has attracted significant research interest, as these structures can exhibit unconventional dynamic properties, including phononic band gaps, arising primarily from their architecture rather than their constituent material.

Among the architectural strategies explored, fractal-based geometries, characterized by self-similarity and scale invariance across multiple length scales, have emerged as promising candidates. Their hierarchical structure offers degrees of freedom for wave tuning that are unavailable in conventional periodic lattices, and has been associated with richer wave propagation behavior.

Despite this promise, the mechanisms by which fractal hierarchy governs band gap formation, and in particular its relationship to the underlying periodic architecture, remain incompletely understood. To address this gap, the present study investigates the dynamic behavior of a two-dimensional structure inspired by the Sierpinski carpet through systematic finite element analyses in Abaqus. Modal analysis and frequency response analysis under out-of-plane harmonic excitation are performed by varying the fractal generation order n .

The results show that absolute band gaps (ABGs) emerge above a threshold fractal order and closely correspond to those of the equivalent periodic square lattice, defined by the unit cell of the finest scale of the hierarchy. The fractal geometry further modifies the gap structure by introducing localized modes at the internal boundaries between fractal generations, resulting in a characteristic splitting of the primary band gap. These findings shed light on the interplay between periodic architecture and fractal geometry in shaping elastic wave propagation, and underscore the potential of Sierpinski carpet-inspired designs for metamaterials with controllable dynamic behavior.

Dinamica/Ferroviario / 426

Influence of Physical Discontinuities on Eddy Current Effects in Homopolar Permanent-Magnet Arrays for Maglev Applications

Author: Marius Pakštys¹

Co-authors: Renato Galluzzi²; Andrea Tonoli¹; Nicola Amati¹

¹ *Politecnico di Torino*

² *Tecnologico de Monterrey*

Corresponding Authors: nicola.amati@polito.it, andrea.tonoli@polito.it, renato.galluzzi@tec.mx, marius.pakstys@polito.it

Objective

Hybrid electromagnetic suspension (HEMS) is a promising levitation architecture with reduced

power consumption as permanent magnets (PMs) provide a passive force bias. It represents an enabler for commercial maglev system implementation. With levitation modules arranged in a transverse-flux (homopolar) configuration, less losses are provisioned with respect to a heteropolar configuration, interacting with a non-laminated rail. This is especially appealing for maintaining low infrastructure costs. Although levitation module continuity is preferable, it cannot be guaranteed in practice due to bogie auxiliary systems and train articulation requirements. Discontinuities are responsible for induced eddy currents at non-zero speeds, introducing parasitic lift and drag forces. Lift suppression and drag both worsen as speed increases. Loss in lift force results in increased levitation power consumption and drag force presents an additional load for the propulsion drive to sustain. The aim of the present work is to investigate the role of magnetic flux discontinuities on the severity of eddy current effects in homopolar PM arrays for maglev applications.

Method

Small-scale homopolar PM modules arranged in continuous and discontinuous configurations are modelled and tested on a magnetic levitation test bench. The system is modelled using the Fourier transform of the magnetic flux density, following the approach in literature. The model is refined considering the presence of PMs as well as physical phenomena such as magnetic flux leakage and skin depth. Moreover, static lift force computation necessary for the model is made using an equivalent magnetic circuit. Magnetic flux density distribution for continuous and discontinuous arrays is analytically computed, along with induced eddy current density. The relationship between eddy current vortex count and magnetic flux discontinuities is discussed. Forces are also computed and compared to those acquired experimentally. A range of air gaps (5 –7 mm) and speeds (1.5 –28 m/s) are investigated.

Results

Analytical and experimental results show good agreement, with average errors across speeds and air gaps below 0.4 N for all forces. Results show the importance of reducing discontinuities in the interest of maintaining low magnetic drag. Indeed, the horizontal Lorentz force component is dominant and shows a relative increase of 57% between continuous and discontinuous arrays, for maximum speed and minimum air gap conditions. Parasitic lift force suppression remains an issue as well; however, it is not significantly exacerbated by the introduction of magnetic flux discontinuities. In this context, a relative increase of 13% is observed for maximum speed and minimum air gap conditions.

Conclusions

Analytical and experimental analysis of homopolar PM arrays in continuous and discontinuous configurations highlights the need for the appropriate design of HEMS modules for maglev applications. An increase in magnetic drag presents larger loads for the propulsion drive to sustain, lowering overall system efficiency. Moreover, lift force suppression is also of concern for high-speed operation and additionally impacts system efficiency due to power consumption from compensatory magnetic flux strengthening using active coils. These parasitic forces can be mitigated by ensuring levitation module continuity where possible. The presented analytical model reproduces experimental force behaviour at different speeds and air gaps and can be used to estimate performance at the design stage.

Dinamica/Ferroviario / 442

Effetto dello sloshing in un recipiente a pressione per applicazioni nucleari

Authors: Antonietta Lo Conte¹; Chiara Mariani¹; Massimo Fossati¹

¹ Politecnico di Milano- Dipartimento di Meccanica

Corresponding Authors: massimo.fossati@polimi.it, antonietta.loconte@polimi.it, chiara4.mariani@mail.polimi.it

Questo articolo affronta l'analisi del fenomeno sismico dello sloshing in un recipiente in pressione per applicazioni nucleari. Le distribuzioni di pressione impulsiva e convettiva vengono esaminate utilizzando le normative, basate su modelli meccanici semplificati, unitamente agli spettri di risposta

sismica di piano (FRS). La dinamica dello sloshing viene approfondita mediante un modello di fluidodinamica computazionale (CFD) e un'analisi di interazione fluido-struttura bidirezionale, sottoponendo il componente a storie temporali di accelerazione compatibili con gli spettri di risposta sismica (FRS). L'analisi fluidodinamica è basata sul metodo ai volumi finiti con una formulazione multifase. Nel calcolo della risposta sismica, è stato impiegato l'approccio Large Mass per applicare l'eccitazione alla base dei supporti. I risultati sono di notevole interesse, in quanto consentono di valutare l'idoneità delle procedure previste dalle norme tecniche e la loro affidabilità rispetto a metodologie più complesse e più onerose dal punto di vista computazionale.

Dinamica/Ferroviario / 372

Experimental Validation of a Numerical Analysis for Transient Resonance Response of an Integral Bladed Disk

Authors: Ethan Raoul Lorito¹; Christian Maria Firrone¹; Gianmaria Sartor²; Antonio Giuseppe D'Ettolè²

¹ *Politecnico di Torino*

² *GE Avio*

Corresponding Authors: ethanlorito8@gmail.com, gianmaria.sartor@avioaero.it, christian.firrone@polito.it, antonio.dettolè@avioaero.com

The design process of modern aeronautical engines requires the dynamic characterization and stress certification tests of critical components, such as the bladed disks forming the stages of compressor and turbine modules.

During these tests, the bladed disk is assembled into a spinning test rig where a predefined acceleration ramp is recreated simulating different operating conditions. In particular, the operating loads due to fluid-structure interaction, are replicated by a separate excitation system.

From the experimental Campbell diagram, obtained as an output, it is sometimes possible to observe a series of unconventional dynamic responses (Non-Synchronous Vibrations) that are not predicted by the dynamic analyses as a part of the standard industrial workflow. A possible explanation is found in literature as transient effects introduced in the dynamic response of the system by an excessive ramp applied to the disk.

The objective of this work is to reproduce NSV in an academic environment and confirm the capability of commercially available structural FEA software to accurately predict the transient resonance response in bladed disks to finally introduce these transient analyses in the design process of aero-engines.

In order to achieve this goal, a series of 3D finite element transient dynamic analyses are validated with the results of a test campaign conducted on a dummy integral bladed disk subjected to various sweep rates and excited by means of permanent magnets. A set of critical crossings from the Campbell diagram, corresponding to well separated vibration modes, are selected for the validation.

The numerical time-history of a rotating blade's axial displacement is compared with the experimental one, measured through strain gauges (SGs), and the relative error is calculated.

The results show an optimal correlation between the numerical and experimental transient resonance response for a vibrating mode of a tuned bladed disk (i.e. a disk ideally having all sectors equally to each other), while the correlation decreases in presence of mistuning. Differences between the predicted and the measured results are mainly attributable to a difference in the natural frequencies of the selected modes between the real disk and the finite element model and to the real geometry of the disk which is actually mistuned.

In conclusion, for the test case that have been considered, commercially available FEA software proved to be able to accurately predict the transient response in bladed disks as well as the actual related stress field to consider for fatigue damage prediction.

Fatica e Frattura / 270

Vibration Fatigue under Sine-on-Random Loading: A comparative analysis of the predictive capability and application limits

of spectral methods

Authors: Filippo Veschi¹; Filippo Foiani²; Massimiliano Palmieri²; Filippo Cianetti²

¹ *University of Perugia*

² *Università degli Studi di Perugia*

Corresponding Authors: filippo.foiani@dottorandi.unipg.it, filippo.cianetti@unipg.it, massimiliano.palmieri@unipg.it

In several industrial sectors, primarily aerospace and defense, mechanical components are frequently subjected to Sine-on-Random (SoR) loading. Such processes are characterized by a marked non-Gaussianity that limits the applicability of conventional spectral methods for fatigue damage estimation. This study critically analyzes the primary frequency-domain strategies currently available, comparing approaches based on cycle distribution with equivalent PSD based methods.

The evaluation is conducted by benchmarking these strategies against time-domain analyses using profiles defined by industry standards, in order to quantify the accuracy, robustness, and computational cost of each approach. The results highlight the predictive capability and operational limits of the considered techniques and provide practical selection criteria based on the specific characteristics of the SoR signal.

Building on these findings, an alternative strategy based on the equivalence of spectral moments is also outlined.

Fatica e Frattura / 271

A finite atomistic J-integral and the limits of continuum fracture mechanics

Author: Pasquale Gallo¹

¹ *Università di Trento*

Corresponding Author: pasquale.gallo@unitn.it

The extension of fracture mechanics concepts to the atomic scale raises fundamental questions on the validity of continuum-based parameters. In particular, the J-integral relies on assumptions such as infinitesimal crack advance and scale separation, which become questionable when dealing with discrete atomic systems. This work aims to provide a physically consistent formulation of the J-integral at the atomic scale and to identify the conditions under which the continuum description ceases to be applicable.

An energy-based finite formulation is introduced, where the J-integral is evaluated as the potential energy difference between two configurations with slightly different crack lengths under the same critical deformation. The crack increment is defined as the smallest physically admissible advance, corresponding to a single bond-breaking event. Molecular statistics simulations are carried out on single-edge cracked single-crystal silicon specimens, considering geometrically scaled models from the macroscale down to nanometric dimensions. The results are compared with finite element analyses based on the conventional formulation.

The atomistic J-integral is found to be nearly constant across all considered sizes, with a value of about 2.5 J/m², indicating that fracture is governed by a localized bond-breaking mechanism independent of structural scale. Consistently, the fracture process zone exhibits a characteristic size of approximately 0.5 nm, which does not vary with specimen dimensions. In contrast, the continuum J-integral progressively departs from this behavior as the size decreases, with noticeable deviations when the structural dimensions approach the intrinsic length associated with fracture.

These results show that the loss of validity of continuum fracture mechanics originates from the disappearance of scale separation rather than from the inadequacy of a specific fracture parameter. The proposed formulation provides a simple and robust way to evaluate fracture at the atomic scale, without relying on stress or displacement field reconstruction, and establishes a direct link between fracture energy and atomic bond breaking.

Fatica e Frattura / 277

Monitoraggio di cricche di fatica mediante la tecnica della caduta di potenziale in corrente continua in configurazione multi-sonda

Author: Luca Vecchiato¹

Co-authors: Alberto Campagnolo²; Lorenzo Conte¹; Giovanni Meneghetti³

¹ *Università di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale*

² *Università di Padova*

³ *Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale*

Corresponding Authors: giovanni.meneghetti@unipd.it, alberto.campagnolo@unipd.it, luca.vecchiato@unipd.it, lorenzo.conte.2@studenti.unipd.it

L'innesco e propagazione di cricche di fatica rappresenta un fenomeno di primaria importanza sia in ambito di prove di meccanica della frattura sia nel monitoraggio strutturale di componenti reali. La misura delle dimensioni della cricca richiede l'impiego di tecniche sperimentali non distruttive, tra cui il metodo del potenziale elettrico in corrente continua. Questo metodo sfrutta la variazione della resistenza elettrica nel componente criccato indotta dalla cricca che, con il suo accrescimento, riduce la sezione resistente. Per fare questo, il metodo prevede l'iniezione di una corrente continua di intensità nota e costante attraverso il componente e la successiva misura del potenziale sullo stesso. Tradizionalmente, questo metodo è stato applicato in configurazione a sonda singola, nella quale si misura un unico valore di caduta di potenziale sul componente. Per sua natura, tale configurazione è in grado di fornire indicazioni sull'estensione dell'area criccata, ma non sulla sua posizione, dimensione e forma. Per superare tale limitazione, il presente lavoro propone una configurazione multi-sonda, che prevede di misurare la differenza di potenziale su più punti del componente. Nel presente lavoro, il metodo è stato applicato a provini cilindrici in AlSi10Mg realizzati mediante manifattura additiva e contenenti difetti simulati superficiali e/o interni. In particolare, ciascun provino è stato sensorizzato con un massimo di sette sonde di misura della caduta di potenziale, con l'obiettivo di identificare la geometria della cricca di fatica originata dai difetti simulati sollecitando assialmente i provini.

Fatica e Frattura / 283

Crack Opening Profile method for stress intensity factor estimation in interacting, interface and mixed mode cracks

Author: Anis Allahdiniyan¹

Co-authors: Linda Maggi²; David A Hoey²; David Taylor²; Laura Maria Vergani³; Federica Buccino³

¹ *PhD student*

² *Trinity College Dublin*

³ *Politecnico Di Milano*

Corresponding Authors: anis.allahdiniyan@polimi.it, maggil@tcd.ie, dahoe@tcd.ie, laura.vergani@polimi.it, dtaylor@tcd.ie, federica.buccino@polimi.it

Introduction

The Crack Opening Profile (COP) method estimates the stress intensity factor (K) directly from measurements of crack face displacements along the whole crack front, avoiding detailed stress analysis. Previous work showed that Westergaard based COP expressions can recover K for symmetric centre cracked plates in linear elastic materials [1–2]. However, many real components contain non symmetric configurations, where cracks interact with free edges, material interfaces or neighbouring cracks, producing different loading and stress intensity factor at the two tips [3]. In such cases,

conventional stress based approaches require complex modelling and accurate boundary conditions, which are difficult to guarantee in practice [4]. The aim of this work is to extend the COP concept to these interacting and interface cracks by introducing a two parameter formulation capable of capturing independent stress intensity factors at the two crack tips, and to outline a generalized mixed mode framework for more complex loading scenarios.

Materials and Methods

Starting from Westergaard's solution for a centre crack, we derive an analytical COP expression with two independent stress intensity factors, K_A and K_B , associated with each crack tip [2]. The approach is evaluated using two dimensional plane stress finite element simulations on three classes of interacting cracks (crack–edge, crack–interface and crack–crack) and on mixed mode configurations, covering a wide range of non dimensional geometric parameters. For each model, displacement fields along the crack are extracted and fitted with the proposed COP equation to obtain K_A and K_B , which are then compared with J integral results and handbook solutions. Experimental validation is performed on PMMA plates containing selected interacting crack and crack–edge geometries, as well as mixed mode specimens, tested in tension and compression and analysed by Digital Image Correlation (DIC) using Zeiss software to obtain COP measurements.

Results

Across the plane stress simulations, the two parameter COP expression reproduced the crack opening profiles for all interaction classes and mixed mode cases with coefficients of determination above 0.96, accurately capturing both magnitude and asymmetry. COP derived stress intensity factors K_A and K_B generally agreed with J integral and handbook values within a few percent, with larger deviations (up to about 10–20%) only in the most severe interaction geometries. PMMA experiments confirmed these trends: COP based stress intensity factors followed the expected linear scaling with applied stress and reproduced the differences between the two crack tips with acceptable scatter.

Conclusion

The present study demonstrates that the Crack Opening Profile method can be extended from symmetric cracks to interacting and interface cracks, and to mixed mode loading. This displacement based framework allows local mode I and, in mixed mode configurations, mode II stress intensity factors to be extracted directly from measured crack openings, reducing reliance on detailed stress analysis and complex finite element modelling in non symmetric configurations. The approach provides a practical basis for further development of generalized mixed mode COP formulations and for application to more complex geometries relevant to structural and biomedical systems.

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support from the European Union Horizon Europe research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie (MSCA) grant agreement No 101120290 (GAP). The authors are grateful for the financial support and resources that have enabled the progress of this research.

References

- [1] Allahdiniyan and Taylor, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 2025, 138:104940.
- [2] Westergaard, Journal of Applied Mechanics 1939, 6(2):A49–A52.
- [3] Choi, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 2016, 82:88–95.
- [4] Buccino et al., Engineering Fracture Mechanics 2022, 270:108582.

Fatica e Frattura / 285

Implementation of a combined Quasi-Brittle/Ductile Damage Model for assessing the fatigue life of Combustion Chamber Channels using FEniCSx+MFront.

Authors: Antonio Gallo¹; Enrico Armentani¹; Giuseppe Abbiati²; Jakob Larson Degn²; Michele Ferraiuolo³; Michele Perrella¹

¹ *Università degli Studi di Napoli Federico II*

² *University of Aarhus*

³ CIRA S.c.p.a.

Corresponding Authors: m.ferraiuolo@cira.it, enrico.armentani@unina.it, michele.perrella@unina.it, jdl@cae.au.dk, antonio.gallo2@unina.it, abbiati@cae.au.dk

The aim of this study is to assess the fatigue life of combustion chamber channels in a liquid-propellant rocket engine (LRE) for aerospace applications. In order to increase the durability and service life of thrust chamber, a reliable and robust strategy for predicting damage mechanisms is required. Within this context, a combination of the Lemaitre-Dufally quasi-brittle damage model and the Bonora ductile damage model was implemented to improve the understanding of the fracture mechanisms of complex structure. The resulting model was developed using the open-source finite element (FE) code FEniCSx, combined with the open-source MFront tool to define the constitutive laws. Such a numerical procedure was chosen in order to overcome the limitations and cumbersome of commercial FE codes in the implementation of custom complex material models. The numerical results obtained from the analysis were compared with experimental data reported in the literature, showing satisfactory agreement and providing an effective tool for addressing fatigue and damage material behaviour of structural components.

Fatica e Frattura / 289

Studio dell'influenza della superficie grezza da manifattura additiva sulla stima del limite a fatica di provini in Ti6Al4V prodotti con diversa orientazione

Author: Daniele Rigon¹

Co-authors: Enrico Savio ²; Filippo Mioli ²; Giovanni Meneghetti ²

¹ Università degli Studi di Padova

² Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corresponding Authors: giovanni.meneghetti@unipd.it, daniele.rigon@unipd.it

La manifattura additiva (AM) consente la realizzazione di componenti meccanici con geometrie complesse, offrendo vantaggi significativi nelle applicazioni in cui la riduzione del peso costituisce un requisito fondamentale. Tuttavia, le condizioni superficiali e la presenza di difetti interni derivanti dal processo produttivo possono influenzare negativamente il comportamento a fatica, in particolare nel regime ad alto numero di cicli. Risulta pertanto essenziale sviluppare modelli predittivi in grado di descrivere l'effetto di tali parametri sul comportamento a fatica.

Recentemente è stato proposto un approccio basato sulla meccanica della frattura, nel quale viene definita un'equivalenza tra i parametri di rugosità valutati sulla superficie grezza ottenuta mediante Powder Bed Fusion-Laser Beam (PBF-LB) e una dimensione di cricca equivalente, tramite l'impiego della statistica dei valori estremi. Tale approccio ha mostrato buone capacità predittive nella stima del limite a fatica di provini caratterizzati da superficie grezza orientata parallelamente alla direzione di costruzione e da una popolazione di difetti interni di dimensione trascurabile.

Il presente studio si propone di estendere tale approccio a superfici grezze da PBF-LB caratterizzate da differenti orientazioni. A tal fine, vengono presentati i risultati preliminari di prove a fatica condotte su provini piatti in Ti6Al4V realizzati con diverse inclinazioni rispetto alla direzione di costruzione e progettati in modo da isolare la porzione di superficie grezza di interesse. Sono state considerate diverse orientazioni per la superficie rivolta verso l'alto e quella rivolta verso il basso.

La caratterizzazione superficiale è stata eseguita mediante profilometria ottica, assumendo come dimensione della cricca equivalente il parametro S_v valutato nella zona di superficie maggiormente sollecitata tramite statistica dei valori estremi. Sono quindi state effettuate prove di fatica ad ampiezza costante ($R = -1$) per determinare il limite a fatica di ciascuna serie. Infine, i risultati sperimentali sono stati confrontati con le stime teoriche nell'ambito di uno studio preliminare volto allo sviluppo del modello.

Fatica e Frattura / 237

Fatica torsionale di ghise sferoidali: competizione poro–intaglio e ruolo della tenacizzazione da factory roof

Authors: Lorenzo Festi¹; Matteo Benedetti¹

Co-authors: Matteo Pedranz²; Danilo Lusuardi²; Francesco Frendo³; Andrea Chiocca³; Vigilio Fontanari¹

¹ Università di Trento

² Fonderie Ariotti

³ Università di Pisa

Corresponding Authors: matteo.benedetti@unitn.it, vigilio.fontanari@unitn.it, lorenzo.festi@unitn.it, danilo.lusuardi@fonderieariotti.com, francesco.frendo@unipi.it, andrea.chiocca@unipi.it, matteo.pedranz@fonderieariotti.com

1. Obiettivi

Il lavoro propone l'estensione di due recenti contributi sulla competizione intaglio–poro nelle ghise sferoidali EN-GJS-600–3 all'analisi del comportamento a fatica in torsione alternata ($R=-1$). In stato di sollecitazione assiale è stato dimostrato come l'interazione tra micro-shrinkage porosity e concentrazioni di tensione geometriche possa essere descritta integrando tomografia X-ray (CT), statistica dei valori estremi (EVS) e criterio a densità di energia di deformazione (SED), consentendo di prevedere la transizione da regime pore-dominated a notch-dominated. Parallelamente, l'approccio Effective Critical Plane (ECP) ha mostrato elevata accuratezza nella valutazione della resistenza a fatica multiassiale di componenti intagliati, includendo effetti di non proporzionalità e volume di processo.

Obiettivo del presente contributo è: (i) estendere il framework EB-HSV/SED all'interazione poro–intaglio in torsione; (ii) integrare l'approccio ECP per descrivere correttamente lo stato tensionale multiassiale al piede d'intaglio; (iii) identificare sperimentalmente l'istante di primo innesco della cricca in torsione monitorando l'emissione acustica (AE) durante il regime di carico ciclico, con particolare attenzione all'effetto di tenacizzazione derivante dalla morfologia factory roof delle superfici di propagazione dei difetti di fatica.

2. Metodi

Sono stati testati provini cilindrici con intaglio a V (raggio al fondo 0.2 mm) e angolo di apertura variabile ($2\alpha = 60^\circ-180^\circ$) in torsione $R = -1$. La popolazione di microporosità è stata caratterizzata tramite CT metrologica e modellata mediante distribuzione dei massimi valori estremi (LEVD), stimando il difetto atteso nel volume altamente sollecitato definito in termini energetici (EB-HSV).

L'effetto dell'intaglio è stato valutato tramite un'analisi FEM lineare elastica, mediando la densità di energia su un volume di controllo di raggio R_1 calibrato sul materiale. In parallelo, è stato implementato l'approccio di Piano Critico Efficace (Smith-Watson-Topper e Fatemi-Socie mediati su volume di controllo) per descrivere lo stato multiassiale locale in torsione.

L'interazione poro–intaglio è stata risolta iterativamente determinando il fattore di concentrazione a fatica combinato $K_f P_N$, in funzione del difetto estremo atteso nel EB-HSV.

Durante le prove torsionali è stata monitorata l'emissione acustica ad alta frequenza per identificare il primo evento di nucleazione della cricca. Il confronto tra soglia AE e limite di fatica nominale ha consentito di separare la fase di nucleazione da quella di propagazione iniziale, quantificando l'eventuale contributo di tenacizzazione associato alla morfologia factory roof tipica del carico torsionale.

1. Risultati I risultati evidenziano una transizione progressiva tra tre regimi:
2. Pore-dominated, per grandi angoli di apertura ($2\alpha \geq 170^\circ$), dove l'EB-HSV è elevato e il difetto estremo governa l'innesco;
3. Regime misto poro–intaglio, per $140^\circ \leq 2\alpha \leq 160^\circ$, con interazione parziale;
4. Notch-dominated, per $2\alpha \leq 100^\circ$, dove l'innesco è controllato dal campo di tensione locale. In torsione si osserva un comportamento differente rispetto al carico assiale: per intagli severi la resistenza a fatica risulta superiore alle previsioni puramente elastiche. L'analisi AE mostra che l'innesco della cricca avviene a livelli di carico inferiori rispetto al cedimento finale, indicando un significativo contributo di rallentamento della propagazione iniziale.

Le osservazioni frattografiche confermano la presenza di morfologia factory roof, con evidenza di contatto e abrasione ciclica delle superfici di frattura. Tale fenomeno induce una riduzione efficace dell'intensità locale di tensione di taglio fuori piano (Mode III), traducendosi in un apparente effetto di notch strengthening in torsione. Il modello integrato EB-HSV + ECP riproduce correttamente l'andamento sperimentale del limite a 5×10^6 cicli al variare dell'angolo 2α , inclusa la zona di crossover tra regime poro e regime intaglio.

5. Conclusioni

Lo studio dell'interazione poro-intaglio condotto su provini sollecitati in torsione ha permesso di:

- prevedere quantitativamente la transizione tra regimi di innesco;
- integrare effetti di sollecitazione multiassiale tramite il Piano Critico Efficace;
- distinguere sperimentalmente le fasi di nucleazione e di propagazione corta mediante emissione acustica;
- evidenziare il ruolo della tenacizzazione da factory roof nel ridurre la sensibilità all'intaglio in torsione.

Il lavoro fornisce un metodo fisicamente fondato e orientato al progetto per la valutazione a fatica di componenti in ghisa sferoidale soggetti a torsione in presenza di microporosità e discontinuità geometriche.

Fatica e Frattura / 248

Applicazione dell'approccio del piano critico efficace per l'analisi a fatica di componenti con intagli acuti

Authors: Andrea Chiocca¹; Francesco Frendo²; Michele Sgamma²

¹ *Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale*

² *Università di Pisa*

Corresponding Authors: francesco.frendo@unipi.it, michele.sgamma@cisup.unipi.it, andrea.chiocca@unipi.it

I giunti saldati rappresentano spesso gli elementi critici di strutture sottoposte a carichi variabili nel tempo, in quanto le concentrazioni di tensioni, modifiche microstrutturali, tensioni residue e condizioni di carico complesse possono favorire l'insorgenza precoce di cricche di fatica. Sebbene le attuali procedure di progettazione siano efficaci in molti casi pratici, la loro accuratezza può risultare ridotta in presenza di storie di carico complesse (multiassiali e non-proporzionali), oppure la loro applicazione può rivelarsi critica per dettagli geometrici non contemplati dalle norme. Questo contributo presenta un'applicazione dell'approccio del Piano Critico Efficace (ECP –Effective Critical Plane) alla valutazione della vita a fatica di giunti saldati.

Il metodo valuta un parametro di danneggiamento efficace, basato sul fattore di piano critico, partendo da un campo di tensione/deformazione mediato localmente attorno ad un hot-spot, incorporando così la teoria del micro-supporto strutturale di Neuber. Il problema della singolarità dello stato di tensione all'apice di un intaglio acuto e, conseguentemente, dell'onere di definizione di una discretizzazione adeguata per il calcolo del fattore di ECP, è stato superato, sulla base della conoscenza della soluzione asintotica del campo di tensione, tramite la valutazione del fattore locale di CP alla radice di un intaglio con raggio di raccordo finito.

La metodologia sviluppata ha l'obiettivo di conservare sia la descrizione triassiale di storie di carico complesse, sia gli elevati gradienti di tensione tipici degli intagli, pur rimanendo compatibile con le analisi agli elementi finiti lineari-elastiche. Il lavoro presenta gli aspetti pratici di modellazione, le esigenze di calibrazione e come l'approccio possa essere implementato per geometrie di intaglio acuto. L'obiettivo è, nel complesso, valutare e discutere le capacità dell'ECP come strumento ingegneristico affidabile per la valutazione della vita a fatica delle giunzioni saldate.

Fatica e Frattura / 259

Approccio non convenzionale della meccanica della frattura per la stima del limite a fatica di provini in materiale metallico indeboliti da intagli sottoposti a carichi multiassiali

Authors: Giovanni Meneghetti¹; Francesco Collini^{None}; Daniele Rigon²; Nicolò Belè^{None}; Simone Turani^{None}; Giuseppe De Marco^{None}

¹ *UNiversità di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale*

² *dipartimento di ingegneria industriale - Università di Padova*

Corresponding Authors: giovanni.meneghetti@unipd.it, danielle.rigon@unipd.it

Di recente è stato proposto un approccio unificato, basato sulla meccanica della frattura e dell'intaglio, per la stima delle soglie di fatica multiassiale di componenti metallici, in grado di tenere conto del diverso effetto di concentrazione delle tensioni dovuto a difetti, cricche e intagli acuti o blandi. Tale approccio deriva dalla ben nota teoria unificata di Atzori, Lazzarin e Meneghetti, formulata per lo stato di sollecitazione di apertura (Modo I) in presenza di intagli, cricche o difetti, ed è stata estesa a condizioni di carico multiassiale mediante il criterio della densità di energia di deformazione mediata su un volume strutturale posto all'apice della discontinuità geometrica. Sfruttando le definizioni dei fattori di intensificazione delle tensioni d'intaglio (NSIFs) per diversi modi di sollecitazione, è stato possibile calibrare un volume strutturale per ciascun modo e riformulare le equazioni del diagramma di Atzori, Lazzarin e Meneghetti per il Modo I, ottenendo così un modello unificato capace di descrivere stati di sollecitazione multiassiale in presenza di diversi concentratori di tensione. L'approccio è stato recentemente validato mediante dati tratti dalla letteratura scientifica, comprendenti 128 limiti di fatica relativi a diversi materiali metallici contenenti intagli acuti e difetti.

Nel presente lavoro sono stati ottenuti nuovi risultati sperimentali per estendere la validazione del modello a provini in lega di titanio con intagli acuti e superficie nello stato as-built, ottenuti mediante manifattura additiva. La campagna sperimentale ha incluso prove di fatica ad ampiezza di carico costante ($R = -1$ e $R = 0$) in puro Modo I, puro Modo III e in condizioni combinate I+III, sia in fase sia sfasate. Sono state considerate due geometrie di intaglio a V, caratterizzate da angoli di apertura pari a 90° e 135° . I limiti di fatica delle singole serie, determinati mediante sequenze staircase brevi, sono stati confrontati con le stime teoriche del modello proposto, evidenziando errori di previsione accettabili dal punto di vista ingegneristico.

Fatica e Frattura / 269

Implementazione del metodo della tensione di picco per la progettazione a fatica di strutture saldate complesse mediante modelli a elementi finiti shell

Authors: Alberto Campagnolo¹; Alberto Visentin²; Giovanni Meneghetti³; Vittorio Babini⁴

¹ *Università di Padova*

² *Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale*

³ *UNiversità di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale*

⁴ *Antonio Zamperla S.p.a., Via Monte Grappa 15/17, 36007, Altavilla Vicentina, Italia*

Corresponding Authors: alberto.campagnolo@unipd.it, giovanni.meneghetti@unipd.it, alberto.visentin@unipd.it

Il metodo della tensione di picco (PSM) è un approccio locale basato sull'analisi a elementi finiti lineare elastica, che si avvale delle tensioni di picco calcolate al piede e alla radice del cordone di saldatura e di curve di progettazione a fatica dedicate per prevedere la durabilità di strutture saldate in acciaio e leghe leggere soggette a carichi multiassiali ad ampiezza costante e variabile. Per promuovere l'adozione del PSM in ambito industriale, è stato inoltre sviluppato l'applicativo "PSM App" all'interno del software Ansys® Mechanical. È noto che l'adozione di modelli a elementi finiti *shell* permette di ridurre significativamente i tempi computazionali nell'analisi di strutture di grandi dimensioni, rispetto ai corrispettivi modelli solidi. In questo lavoro, è stata implementata in "PSM App" una nuova procedura che consente di applicare il PSM a partire dal modello a superfici medie

di una struttura generica. Non è richiesta alcuna modellazione geometrica dei cordoni di saldatura e le linee di intersezione tra le superfici del modello sono utilizzate per identificare automaticamente i cordoni di saldatura. All'analista è quindi richiesto di specificare solo la tipologia e le dimensioni dei cordoni reali rappresentati dalle linee identificate. A seguire, la procedura di analisi automatica si articola in tre fasi. Dapprima, viene generata una *mesh* di elementi finiti *shell* a otto nodi; poi, lo spessore degli elementi che originano dalle linee di saldatura viene incrementato per implementare il contributo di rigidità dei cordoni di saldatura reali. Conclusa la soluzione lineare elastica, PSM App mappa gli spostamenti del modello *shell* globale su modelli solidi locali che rappresentano la reale geometria dei cordoni e ricava le tensioni di picco agenti ai piedi e alle radici dei cordoni di saldatura. Ad analisi conclusa, le stime di vita a fatica ottenute mediante il PSM vengono plottate lungo le linee analizzate su una vista *wireframe* del modello in esame.

Fatica e Frattura / 294

Resistenza a fatica multiassiale di giunti dissimili perno-su-flangia saldati ad arco in ghisa GJS500-7 e acciaio S355 secondo il Peak Stress Method

Author: Simone Bolner^{None}

Co-authors: Alberto Visentin¹; Alberto Campagnolo²; Giovanni Meneghetti³

¹ *Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale*

² *Università di Padova*

³ *Università di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale*

Corresponding Authors: alberto.campagnolo@unipd.it, simone.bolner@phd.unipd.it, alberto.visentin@unipd.it, giovanni.meneghetti@unipd.it

La progettazione moderna di sistemi meccanici, in particolare nell'industria automotive, tende verso l'adozione di materiali differenti all'interno di una singola struttura, per ottimizzare costi, peso e affidabilità. Una soluzione di recente diffusione è l'impiego di giunti dissimili saldati ad arco, che devono spesso sopportare carichi ciclici multiassiali. Tuttavia, le attuali normative tecniche non includono classi di resistenza per questa tipologia di giunzioni. Nel presente studio è stata indagata la resistenza a fatica multiassiale di giunti saldati in ghisa sferoidale (EN-GJS-500-7C) e acciaio strutturale (S355). Inizialmente, sono state eseguite analisi metallografiche per valutare la microstruttura della zona termicamente alterata, seguite da misurazioni dei profili di microdurezza e delle tensioni residue mediante diffrazione a raggi X. In seguito, sono stati svolti test a fatica su (i) giunti saldati testa-a-testa rasati soggetti a carichi assiali e (ii) giunti perno-su-flangia soggetti a carichi di flessione, torsione pura e flessione-torsione, sia in fase che fuori fase, con rapporto di ciclo $R = 0.1$. L'innescò e la propagazione delle cricche sono stati monitorati tramite liquidi penetranti e analisi delle superfici di frattura. I risultati sperimentali sono stati utilizzati per determinare le classi di resistenza a fatica in termini di tensioni nominali, confrontandole con quelle previste dalle normative per giunti simili in acciaio. Infine, i dati sono stati rielaborati secondo il Peak Stress Method (PSM). La dimensione del volume strutturale R_0 è stata calibrata per giunzioni dissimili in ghisa sferoidale GJS-500 e acciaio strutturale S355 eguagliando la densità di energia di deformazione mediata (SED) ad alto numero di cicli dei giunti testa a testa rasati soggetti a carichi assiali e dei giunti perno-su-flangia soggetti a flessione. Tutti i risultati sperimentali sono stati sintetizzati in una unica banda di progettazione piuttosto ristretta basata sul PSM.

Fatica e Frattura / 457

Analisi delle tensioni all'interfaccia della giunzione osso-stelo in una protesi d'anca

Author: Bernardo Zuccarello¹

Co-author: R. Tomasello

¹ *Università di Palermo*

Corresponding Author: bernardo.zuccarello@unipa.it

La protesi d'anca è attualmente considerata, a livello mondiale, il «gold standard» per il trattamento di alcune patologie articolari, in special modo dell'artrosi severa dell'anca, la cui insorgenza determina il progressivo deterioramento della cartilagine articolare con conseguente dolore acuto per il soggetto e rilevanti limitazioni nella deambulazione. Il suo impianto consiste nella eliminazione della testa femorale malata e successivo fissaggio di un opportuno gambo o «stelo» in materiale metallico all'interno del canale midollare del femore, stelo che si accoppia col bacino mediante una testa sferica coniugata ad un inserto in polietilene posizionato nella fossa acetabolare attraverso una coppa metallica di fissaggio.

Questo sistema protesico, che sostituisce l'articolazione nativa, permette nella maggior parte dei casi il recupero della funzionalità biomeccanica dell'anca ed il miglioramento della qualità di vita del paziente, restituendo tassi di successo complessivamente alti.

Ciò nonostante, in alcuni casi la protesi può andare incontro nel tempo a fuori servizio per diverse cause. Una delle più importanti è quella legata alla progressiva regressione del tessuto osseo prossimale del femore, che nel tempo può portare alla perdita della stabilità, inducendo la cosiddetta mobilizzazione o allentamento asettico dello stelo, condizione questa che richiede quasi sempre la relativamente rischiosa revisione dell'intero impianto, aumentando significativamente, specie per un anziano, i rischi per la sicurezza del paziente.

Dal punto di vista clinico, non sono tuttora ben note le cause associate all'allentamento asettico, sebbene in letteratura l'ipotesi più accreditata è quella legata al cosiddetto stress-shielding, cioè alla schermatura degli sforzi meccanici sul femore operata dalla presenza di uno stelo metallico molto più rigido dell'osso; si ritiene in pratica che le basse sollecitazioni o l'assenza di sollecitazioni sul femore prossimale ne induca il riassorbimento progressivo nel tempo. L'ipotesi comunque non sembra molto attendibile in quanto stelo ed osso non sono posti in parallelo rispetto al carico e altresì, se si tiene conto che la coppia stelo-osso risulta molto simile ad una giunzione incollata a doppia sovrapposizione, la regione prossimale (zona di attacco dell'elemento interno del giunto) è quella soggetta a significative sovrasollecitazioni. Al fine di indagare quindi sulle effettive cause dell'allentamento asettico delle protesi d'anca, dopo essenziali richiami della teoria classica delle giunzioni incollate, è stata eseguita una sistematica analisi delle sollecitazioni presenti all'interfaccia stelo-osso spongioso, mediante accurate simulazioni numeriche FEM considerando le peculiari condizioni di adesione per attrito. I risultati FEM così ottenuti hanno mostrato come nella zona prossimale in cui si verifica la regressione ossea responsabile dell'allentamento asettico, contrariamente alla generica ipotesi dello stress-shielding, si verificano significative sovrasollecitazioni sia in termini di tensioni normali all'interfaccia che in termini di tensioni tangenziali e tali tensioni, contrariamente a quanto sostenuto in letteratura, diminuiscono all'aumentare della rigidità dello stelo per cui si raccomanda l'uso di materiali rigidi come per esempio materiali ceramici che permettono in pratica di ridurre le sollecitazioni al di sotto della resistenza di un osso spongioso sano. Tale soluzione è invece insoddisfacente nel caso di osso spongioso osteoporotico meno resistente, nel qual caso si propone l'introduzione di una stelo innovativo per pazienti con osteoporosi, dotato di un inserto prossimale mediale in materiale a basso modulo (materiale biocompatibile con modulo di Young inferiore a quello dell'osso spongioso).

Fatica e Frattura / 429

Monitoraggio strutturale di giunzioni adesive sotto fatica basato sul backface strain

Author: Luca Goglio¹

Co-authors: Mohammad Abbasi¹; Raffaele Ciardiello²

¹ *Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale*

² *Politecnico di Torino*

Corresponding Authors: raffaele.ciardiello@polito.it, mohammad.abbasi@polito.it, luca.goglio@polito.it

Obiettivo

Un aspetto importante relativo all'impiego strutturale di giunzioni adesive è la valutazione della loro integrità sotto carico, in particolare nel caso di fatica. Nel migliore scenario, ciò richiede l'uso di sensori facilmente integrabili nella giunzione e utilizzabili anche in servizio.

Misurare la deformazione, o un parametro equivalente, direttamente all'interno dello strato adesivo è complicato se non impossibile. Una valida alternativa è costituita dal misurare il cosiddetto "backface strain", cioè la deformazione sulla superficie esterna di un aderendo (eventualmente di entrambi) opposta a quella di incollaggio. Da questa distribuzione di deformazione superficiale si possono ricavare informazioni sullo stato di sollecitazione nel giunto e, nella fattispecie, scoprire l'insorgenza di un danno. A questo fine la letteratura tecnica riporta che sono state utilizzate diverse tecniche, precisamente estensimetria, Digital Image Correlation (DIC) e Fibre Optical Sensor (FOS).

Metodi

Fulcro del lavoro è lo "zero strain point" (ZSP), cioè la posizione in cui il backface strain si annulla a causa della sovrapposizione del contributo positivo di dilatazione dovuto alla trazione e di quello negativo dovuto alla flessione. Si è riscontrato che fino a prima dell'insorgere del danno tale posizione rimane inalterata anche per livelli di carico diversi; viceversa, la comparsa di deformazione non nulla in tale posizione indica la nascita di un danno nel giunto.

I provini sono stati realizzati come giunti fra lastre in composito (XPREG XC130) con spessore 1.76 mm, trattate con carte abrasive da 400 e 1000 grit e unite con uno strato di adesivo epossidico (Sikapower 1277) di spessore 0.3 mm, formando una lunghezza di sovrapposizione 20 mm. Essi sono stati sottoposti a fatica, a quattro livelli di carico compresi tra 65% e 20% del limite statico (UTS) – determinato con una serie di prove preliminari, qui non citate per brevità – e rapporto $R=0.1$, utilizzando una macchina servoidraulica (Instron 8801). Con due prove per livello l'insieme dei risultati, che ha portato a sette rotture e un runout, non costituisce una caratterizzazione completa ma permette una validazione del metodo. Le modalità di cedimento osservate sono state miste coesive-adesive. Nell'attività, a seguito di una precedente validazione in campo statico effettuata mediante confronto con la tecnica DIC, per il rilievo del backface strain si è utilizzata la tecnica FOS (strumentazione: LUNA Odisi6000 system, fibra Thorlab pitch 0.65 mm).

Il backface strain è stato rilevato in 30 punti lungo una faccia posteriore del giunto, con un rateo di campionamento 31.15 Sample/s, su provini caricati a fatica al 65%, 50% e 35% del limite statico in sequenze successive a 5 Hz e a 0.5 Hz, queste ultime per facilitare l'acquisizione dei dati.

Risultati

La distribuzione iniziale del backface strain ha mostrato sulla superficie esaminata la presenza, a causa della simmetria, di due ZSP, ciascuno vicino a un'estremità del giunto. Successivamente, al crescere del numero di cicli, si è notata nello ZSP vicino all'estremo caricato dell'aderendo la comparsa di una deformazione non nulla progressivamente crescente; viceversa, nello ZSP vicino all'estremo non caricato la deformazione ha mantenuto valori ridotti.

L'inizio del danno, evidenziato dalla comparsa di deformazione non nulla nello ZSP, e la durata complessiva sono stati rispettivamente di circa

- 100 e 14000 cicli a 65% UTS;
- 3500 e 51000 cicli a 50% UTS;
- 8500 e 144000 cicli a 35% UTS;

mentre si è ottenuto il runout a 20% UTS.

Si nota quindi come sotto sollecitazione a fatica maggiore la deformazione nello ZSP diventa non nulla più precocemente.

Conclusioni

L'uso dello ZSP si dimostra promettente come metodo per la scoperta della nascita di difetti in condizioni di fatica e quindi come strumento di monitoraggio. Il confronto con la tecnica DIC ha confermato la validità della FOS, con il vantaggio che quest'ultima è meno influenzata dalla condizione della superficie esposta (a causa della "texture" del composito e della risoluzione dello strumento, la misura ottenuta con la DIC è affetta da ondulazioni). Inoltre, la tecnica FOS non richiede ovviamente che la superficie in esame sia visibile alle telecamere e la fibra può essere facilmente applicata sull'esterno del giunto senza interagire direttamente con l'adesivo, fattori a vantaggio dell'uso pratico. A differenza di altri approcci, basati sul raggiungimento di certi livelli di deformazione sulla superficie per stabilire l'insorgere del danno, il passaggio da valore nullo a non nullo rappresenta un criterio di più facile applicazione.

La maggiore limitazione all'uso è rappresentata dai casi in cui, per effetto di rigidità elevata degli

aderendi e/o di corta sovrapposizione, la quota parte flessionale della deformazione è piccola e quindi la situazione di ZSP non si produce. Ma ciò non corrisponde alle proporzioni geometriche tipiche dei giunti adesivi.

Fatica e Frattura / 437

Legge di danneggiamento per la correlazione tra danno microstrutturale e degrado macroscopico in elettrodi per batterie al litio

Authors: Davide Clerici¹; Francesca Pistorio²; Salvatore Scalzo²; Salvatore Martelli³; FRANCESCO MOCERA⁴; Aurelio Soma²

¹ *politecnico di torino*

² *Politecnico di Torino*

³ *Politecnico di Torino*

⁴ *POLITECNICO DI TORINO*

Corresponding Authors: salvatore.scalzo@polito.it, salvatore.martelli@polito.it, aurelio.soma@polito.it, francesca.pistorio@polito.it, davide.clerici@polito.it, francesco.mocera@polito.it

La propagazione della frattura negli elettrodi delle batterie agli ioni di litio rappresenta uno dei meccanismi di degrado responsabili della perdita di performance delle celle, in combinazione con i fenomeni elettrochimici. Essa è causata dalle tensioni meccaniche alternate indotte dall'interazione degli ioni litio con il materiale attivo degli elettrodi, durante i cicli di carica e scarica della batteria. Tuttavia, la caratterizzazione sperimentale diretta della propagazione della frattura nell'elettrodo risulta particolarmente complessa, a causa dell'inaccessibilità dell'elettrodo stesso durante il funzionamento della batteria e l'impossibilità di controllare il fenomeno con setup sperimentali costruiti ad hoc, diversamente da come si opera con i provini convenzionali.

In questo lavoro viene presentata la legge di danneggiamento implementata nel software per la previsione del degrado di batterie al litio POLIDEMO, formulata in analogia alla legge di Paris impiegata nella meccanica della frattura classica. In luogo del tasso di crescita della cricca, difficilmente misurabile negli elettrodi delle batterie agli ioni di litio per i motivi illustrati in precedenza, il modello descrive l'evoluzione di un indicatore macroscopico di danneggiamento associato alla perdita di materiale attivo (Loss of Active Material, LAM). Il LAM è la causa diretta della propagazione della frattura, che ha l'effetto di isolare porzioni di materiale attivo non più disponibile a reagire con gli ioni litio. Tale approccio consente di correlare direttamente il danneggiamento microstrutturale indotto dagli stress meccanici con un indicatore facilmente calcolabile mediante metodi come la Differential Voltage Analysis (DV) e Differential Deformation Analysis (DD), sviluppata dagli autori, applicati a semplici cicli di carica o scarica. L'elemento innovativo del metodo risiede quindi nella possibilità di valutare un fenomeno microscopico non direttamente osservabile attraverso un indicatore macroscopico facilmente misurabile e quantitativamente correlato al danneggiamento microstrutturale.

La legge proposta è stata validata su differenti dataset di aging acquisiti a diverse correnti operative, mostrando un'elevata capacità di riprodurre l'evoluzione sperimentale del danneggiamento, che risulta funzione del numero di cicli di carica/scarica e direttamente proporzionale alla corrente impiegata. Infatti, i risultati evidenziano come il contributo della frattura risulti principalmente governato dallo stato tensionale indotto dalla corrente applicata, confermando la coerenza fisica dell'approccio proposto.

Il metodo sviluppato fornisce quindi uno strumento computazionalmente efficiente e sperimentalmente verificabile per integrare gli effetti della degradazione meccanica nei modelli elettrochimici di batteria, fondamentale per lo sviluppo di modelli di previsione del degrado robusti e affidabili.

Fatica e Frattura / 441

Fatigue and fracture mechanics analysis of dissimilar joints in ship structures via Thermoelasticity

Authors: Davide Palumbo¹; Ester D'Accardi¹; Fabio Di Stefano²; Francesca Di Carolo³; Gabriella Epasto²; Giuseppe Brando²; Giuseppe Dell'Avvocato⁴; Rosa de finis⁵; Umberto Galietti¹; Vincenzo Crupi⁶

¹ *Politecnico di Bari*

² *Università degli Studi di Messina*

³ *Università di Messina*

⁴ *Università degli studi dell'Aquila*

⁵ *Università del Salento*

⁶ *University of Messina*

Corresponding Authors: giuseppe.dellavvocato@univaq.it, umberto.galietti@poliba.it, crupi.vincenzo@unime.it, francesca.dicarolo@poliba.it, gabriella.epasto@unime.it, giuseppe.brando@studenti.unime.it, ester.daccardi@poliba.it, davide.palumbo@poliba.it, rosa.definis@unisalento.it

The use of hybrid joints composed of dissimilar materials presents a promising technological solution for combining the distinct advantages of different materials, enabling the design of components that meet diverse and often conflicting performance requirements. This challenge is particularly relevant in shipbuilding, where structures must be simultaneously strong, corrosion-resistant, and lightweight, while also aligning with sustainability goals across production, usage, and end-of-life phases.

Steel-aluminum joints produced via explosion welding offer an effective compromise, combining the mechanical strength of steel with the corrosion resistance and low density of aluminum. Despite their potential, these joints remain underutilized, largely due to limited understanding of their structural performance and damage mechanisms. Process-induced imperfections, such as interfacial defects and residual stresses, pose significant concerns especially in marine applications where high mechanical reliability is essential. Consequently, a thorough investigation into the fatigue behavior and fracture mechanics of these joints is critical.

Fatigue crack growth in general materials is governed by the driving force at the crack tip, which can be analyzed through various analytical and numerical models that describe the plastic work and energy dissipation mechanisms. From an experimental standpoint, advanced techniques such as infrared thermography and digital image correlation have proven effective in recent years for assessing fracture mechanics parameters.

This research focuses on the fatigue crack propagation behavior of Triclad joints, which are three-layer composite materials fabricated via explosion welding. These joints consist of an ASTM A516 Gr55 steel base plate and an AA5086 aluminum flyer plate, separated by an AA1050 aluminum interlayer. Through the application of multiple experimental techniques, this study aims to address key challenges such as early detection of crack initiation and growth, identification

Fatica e Frattura / 431

Considerazioni sulla propagazione della cricca al piede dente di ingranaggi a denti dritti

Authors: Carlo Gorla¹; Lorenzo Valsecchi²; Luca Bonaiti³

¹ *Politecnico di Milano*

² *Politecnico di Milano - DMEC*

³ *Dipartimento di Meccanica - Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: luca.bonaiti@polimi.it, carlo.gorla@polimi.it, lorenzo.valsecchi@polimi.it

Le ruote dentate sono organi di macchine usate per trasmettere potenza tra due alberi rotanti attraverso l'utilizzo di profili coniugati. Allo scopo di aumentare la densità di potenza degli ingranaggi vi è un continuo sviluppo di materiali, trattamenti termici e trattamenti superficiali. Questa continua evoluzione richiede il supporto di campagne sperimentali il cui scopo è quello di valutare l'impatto che ogni combinazione ha sulle prestazioni degli ingranaggi. Questo aspetto è cruciale per diversi settori industriali come l'energetico (in particolare l'eolico), l'automotive e l'aerospaziale in quanto i loro requisiti di densità di potenza richiedono una conoscenza approfondita delle performance delle

ruote.

La caratterizzazione della resistenza alla fatica flessionale a piede dente può essere effettuata attraverso due tipi di test: a ruote ingrananti o test al pulsatore. Il primo prevede l'ingranamento di due ruote, mentre il secondo prevede che i denti della ruota vengano caricati attraverso dei punzoni. Questo comporta delle differenze dal punto di vista nell'applicazione del carico, dal rapporto di ciclo e dal punto di vista statistico che producono delle curve SN diverse.

In questa presentazione ci focalizzeremo sugli effetti che la differenza nel carico applicato ha sulla vita finita delle ruote. In particolare, indagheremo l'effetto che l'ingranamento ha sulla propagazione della cricca nelle prove a ruote ingrananti. Una volta quantificato questo fenomeno viene proposto un metodo per compensare la vita finita delle prove al pulsatore al fine di ottenere una stima della vita finita che si sarebbe ottenuta con test a ruote ingrananti.

Lo studio iniziale si è basato su ruote, aventi diverse geometrie, di cui erano disponibili i risultati di prove al pulsatore e a ruote ingrananti. La geometria di queste ruote è stata usata per sviluppare modelli FEM in grado di studiare l'ingranamento con la presenza di una cricca al piede di un dente. Da questi modelli sono stati estratti diversi parametri: Forza normale di contatto tra i denti (F_n), stress al piede del dente dei denti sani e il fattore di intensità della tensione all'apice della cricca (K). Un modello simile è stato sviluppato per simulare le prove al pulsatore.

Elaborando i dati si è potuto constatare che durante l'ingranamento, a causa dei carichi elevati e dalla presenza della cricca, il dente danneggiato si deforma e si scarica ridistribuendo il carico sugli altri denti sani ingrananti. Questo fenomeno non è presente nelle prove al pulsatore in quanto l'ingranamento è assente.

Questa redistribuzione del carico durante l'ingranamento comporta un minore fattore K nelle ruote ingrananti rispetto che nelle prove al pulsatore. Questa differenza è marcata per cricche lunghe, mentre per quelle corte il valore di K è del tutto simile.

Utilizzando questo parametro all'interno della legge di Paris è stato possibile studiare la propagazione della cricca la quale risulta rallentata nelle prove a ruote ingrananti rispetto alle prove al pulsatore. Avendo osservato l'effetto della redistribuzione del carico ci siamo concentrati sul parametro che lo governa: il fattore di ricoprimento.

Questo è stato studiato utilizzando ruote prodotte con lo stesso utensile aventi lo stesso numero di denti e spostamento di profilo ($x=0$) ma presentando diametri di testa differenti. Utilizzando la stessa metodologia spiegata sopra è stato possibile osservare che maggiore è il fattore di ricoprimento maggiore è la redistribuzione del carico e dunque maggiore è il rallentamento della propagazione.

I due casi di studio di cui sopra sono basati su prove sperimentali documentate in letteratura. Ora che il fenomeno è osservato tramite un modello numerico sufficiente robusto, viene proposto un metodo per stimare la vita finita delle prove a ruote ingrananti partendo dai risultati delle prove al pulsatore.

Il caso applicativo sono ingranaggi in AISI9310 testate al pulsatore. Con la procedura FEM già descritta siamo in grado di stimare il numero finale di cicli per le due metodologie di prova, sottraendole l'una con l'altra otteniamo la differenza di numero di cicli nella propagazione della cricca. Questo valore sommato al numero di cicli ottenuto dalle prove sperimentali permette di stimare la vita finita di un test a ruote ingrananti.

Ricapitolando, abbiamo studiato investigato l'effetto che la diversa applicazione del carico nelle due metodologie di test comporta sulle curve SN ottenute. In particolare, è stato osservato ed approfondito l'effetto che il fattore di ricoprimento ha sulla ripartizione del carico e, conseguentemente sulla propagazione della cricca e sulla vita finita delle ruote. Una volta stimato il fenomeno viene proposto un metodo per la stima della curva SN di test a ruote ingrananti partendo dalle prove al pulsatore.

Fatica e Frattura / 444

Modelli surrogati per l'analisi strutturale di componenti impiantistici per applicazioni nucleari

Authors: Antonietta Lo Conte¹; Federico Perotti²; Matteo Galli¹

¹ Politecnico di Milano- Dipartimento di Meccanica

² Politecnico di Milano- Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

Corresponding Authors: antonietta.loconte@polimi.it, matteo15.galli@mail.polimi.it, federico.perotti@polimi.it

Questo articolo illustra lo sviluppo di un approccio metodologico innovativo per l'analisi strutturale

di componenti impiantistici in ambito nucleare, applicato nello specifico ad un sistema di tubazioni del reattore a fusione ITER. Attraverso una procedura automatizzata in codice Python è stata generata una solida banca dati con dettagliate analisi ad elementi finiti, impiegata per strutturare il Digital Twin, basato su modelli surrogati, di un componente di riferimento. La procedura automatizzata include l'estrazione e la categorizzazione dello stato tensionale, in piena conformità normativa, per molteplici categorie di carico, sia statiche sia dinamiche. L'architettura della procedura di verifica strutturale integra un'interpolazione analitica e un algoritmo di Explainable Machine Learning, in cui i parametri utilizzati incorporano esplicitamente il criterio di verifica, formulato per ciascuna combinazione di carico. L'impiego di tecniche di Explainable Artificial Intelligence ha permesso di verificare che il modello fondi le proprie predizioni su rigorosi principi meccanici. La validazione ha, infine, dimostrato l'affidabilità del modello nel predire lo stato tensionale in geometrie del componente caratterizzate da valori dei parametri differenti da quelli adottati nel training. Questo risultato apre nuove prospettive per procedure di progettazione mediante analisi significativamente più rapide e scalabili.

Fatica e Frattura / 262

Progettazione a fatica di giunzioni incollate tubolari fibra di carbonio-lega di alluminio sottoposte a fatica ad ampiezza costante e variabile

Author: Mauro Ricotta¹

Co-authors: Gianmaria Bettio²; Giovanni Meneghetti³

¹ *Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Padova*

² *Dipartimento di Ingegneria Industriale-Università di Padova*

³ *UNiversità di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale*

Corresponding Authors: giovanni.meneghetti@unipd.it, gianmaria.bettio@gmail.com, mauro.ricotta@unipd.it

Questo lavoro analizza il comportamento a fatica di giunzioni tubolari incollate fibra di carbonio-lega di alluminio, rappresentative del braccio di una sospensione di una vettura Formula SAE, sottoposte a carichi di fatica sia ad ampiezza costante sia variabile.

L'analisi delle tensioni, condotta in regime lineare elastico mediante modelli agli elementi finiti bidimensionali assialsimmetrici, ha permesso di determinare i parametri che caratterizzano il campo di tensione singolare - in particolare il fattore generalizzato di intensificazione delle tensioni (H_0) e l'esponente di singolarità (s) - nelle zone critiche dell'interfaccia tra aderendo e adesivo.

Sono state inoltre eseguite prove sperimentali quasi-statiche e di fatica, sia a ampiezza costante sia variabile. I dati di fatica a ampiezza costante sono stati rielaborati considerando sia la tensione di taglio massima nominale sia il parametro H_0 . I risultati evidenziano che l'impiego di H_0 come parametro di riferimento consente di ridurre la dispersione dei dati di fatica, migliorando la correlazione dei risultati sperimentali.

Le prove a ampiezza variabile sono state interpretate mediante la regola del danno cumulativo di Miner, confermando la validità dei modelli di previsione della vita a fatica basati su H_0 anche in condizioni di carico più realistiche.

I risultati mostrano che H_0 rappresenta un parametro efficace per descrivere il comportamento a fatica dei giunti tubolari incollati e ne evidenziano il potenziale impiego nella progettazione a fatica di strutture incollate fibra di carbonio-lega di alluminio.

Fatica e Frattura / 299

PREDICTING THE FATIGUE LIFE OF NOTCHED COMPONENTS BY LOCAL STRESS CONCEPT: A CLOSED-FORM MODEL BASED ON RELATIVE STRESS GRADIENT

Author: Giorgio Olmi¹

Co-authors: Dario Croccolo ²; Massimiliano De Agostinis ³; Stefano Fini ³; Mattia Mele ³

¹ *Dipartimento di Ingegneria Industriale (DIN), Università di Bologna*

² *DIN - Dipartimento di Ingegneria Industriale*

³ *University of Bologna*

Corresponding Authors: m.deagostinis@unibo.it, giorgio.olmi@unibo.it, mattia.mele@unibo.it, dario.croccolo@unibo.it, stefano.fini@unibo.it

As it is well known, notches involve stress concentration and a detrimental effect on fatigue. A locally higher fatigue strength can be observed at the notch root. This phenomenon is commonly regarded as the support effect and is confirmed by many experimental studies, mainly by German and Austrian scholars. From the quantitative point of view, this can be expressed as the ratio between the local fatigue limit and the fatigue limit of a smooth specimen (for an axial load). For beams, it is the K_t/K_f ratio (stress concentration factor over the fatigue notch factor). When fatigue involves non-beam structures, for which the aforementioned coefficients cannot be properly introduced, a local fatigue curve must be considered, which makes it possible to scale the material's nominal fatigue resistance (determined by lab testing on specimens) to the actual geometry of the component. This curve can be related to the actual stress distribution through the relative stress gradient (RSG) at the notch. Then, the peak stress at the root can be directly compared to the local fatigue strength to determine the safety coefficient or the expected lifespan.

Siebel and Niemann proposed some formulas based on the actual value of the RSG. However, the estimation of the support effect is generally quite coarse. Eichlseder has proposed a more refined model that makes it possible to interpolate and extrapolate the local fatigue strength through fatigue testing of two different specimen sets under axial and bending loads. Performing tests in these two loading conditions makes it possible to account for two different RSGs (in particular, 0 and 2 over the sample diameter). However, two different testing machines are needed. Furthermore, these values are very close and an extrapolation is often required, which entails inaccuracy. Moreover, the slope of the local fatigue curve is not easy to determine and can also be affected by inaccuracies. Another model has been recently put forward by Zhou et al.: it is essentially a follow-up of the Siebel model and is much more accurate. However, a set of numerical simulations is needed, and the expected lifespan must be iteratively determined, case by case, based on the actual stress level. Olmi et al. developed (in 2013) a modified model, where the local fatigue strength for a given material was interpolated through datasets under the same load type (rotary bending) for different notches and RSGs, over a sufficiently wide range. For this purpose, three sets of specimens with smooth, shallow-notched and sharply-notched geometries can be used. This formulation has been revisited and completed here. A closed-form analytical model makes it possible to work out the local fatigue curve for any value of RSG and for any number of cycles in the investigated range. Moreover, the model can be calibrated through three or just two datasets of specimens with different RSGs. The local fatigue limit for infinite life can be determined as well. Thus, it can be used for the fatigue assessment of whatever non-beam geometry of components made of the investigated material. This method has been applied to different metallic materials, including normalized C40, quenched and tempered 42CrMo4, an Al alloy, and Spheroidal Cast Iron. The model has been successfully validated by comparisons of the predicted lifespans to experimental ones based on own and literature experimental campaigns (errors in the logarithmic scale generally lower than 10%).

Fatica e Frattura / 315

Axial-Torsional Fatigue strength of bonded joints under non-proportional loading

Authors: Fabrizio Moroni¹; Francesco Musiari^{None}; ALESSANDRO Pironi²

¹ *Università degli Studi di Parma*

² *Università di Parma - Dipartimento di Ingegneria dei Sistemi e delle Tecnologie Industriali*

Corresponding Authors: francesco.musiari@unipr.it, alessandro.pironi@unipr.it

Adhesive bonding has gained in recent years an increased attention in industrial applications since they allow for a higher stiffness and strength with respect to mechanical connections. Concerning fatigue, adhesive bonding offers longer life than conventional joining techniques. However, in

real-world applications however, structures are generally subjected to multiaxial, non-proportional fatigue (MNPF) due multiple loading sources and geometrical features (notches), which requires the assessment through a uniaxial-equivalent fatigue parameter.

In adhesive joints, multiaxial fatigue has been approached under proportional (Multiaxial Proportional Fatigue, MPF) with a few exceptions. The objective of this work is therefore to analyse experimentally MNPF of adhesive joints. For this purpose a bonded butt joint was designed to be tested under simple axial, torsional and axial-torsional MPF and MNPF. A two-component, room temperature-curing epoxy adhesive was selected o bond S235 construction steel. Tests are run at room temperature. In a previous work of the authors, results were analysed according to several pressure-independent, pressure-dependent and critical plane criteria, identifying the Mataka critical plane as the one, among those considered, yielding a better correlation of the different loading conditions tested. However, all the criteria analysed are established for the fatigue limit of the adhesive, hence they extension to the finite life region is merely empirical.

In this work a criterion based on the Fatemi-Socie critical plane approach is introduced, where the finite life is explicitly considered, i.e. the criterion becomes effectively predictive for all the fatigue regimes. The results are then compared with the Mataka criterion regarding the predicted vs. effective cycles to failure. Although none of the two criteria gives a faithful prediction for all the conditions tested, the Fatemi-Socie one resulted conservative, differently form the Mataka one.

Fatica e Frattura / 317

Tools for the probabilistic fatigue assessment of additively manufactured aerospace components

Author: Lorenzo Rusnati¹

Co-authors: Guglielmo Landi ²; Stefano Beretta ¹; Mauro Ravaioli ²

¹ *Politecnico di Milano*

² *LEONARDO S.p.A.*

Corresponding Author: lorenzo.rusnati@polimi.it

The application of additive manufacturing in aerospace components is closely connected to the ability of assessing the process anomalies effect on fatigue performance. In this sense, using non-destructive inspections, process induced flaws can be characterized and employed in fatigue life estimates of parts considering their service lives. X-ray computed tomography proves particularly effective for metal powder bed fusion process, especially in recognizing gas porosity and lacks-of-fusion due to sub-optimal local printing parameters. Nonetheless, the accuracy of the inspection is strongly dependent on the achievable voxel size, which usually depends on the size of the analyzed part.

This study proposes a probabilistic fatigue assessment methodology to evaluate the fatigue life of additively manufactured components. This method discusses the reliability of the X-ray computed tomography in terms of probability of flaw detection and of sizing error. The methodology selects a suitable fatigue strength model and considers the various uncertainties to estimate the failure probability of a part depending on the applied stress and on the required life. The relationship between stress, defect and life is based on fracture mechanics concepts and on the characterization of material properties from experimental tests conducted on standard specimens.

The methodology is then applied to benchmark components, manufactured in laser powder bed fused Ti-6Al-4V. The components are brackets sustaining an optical payload for satellite applications. Once manufactured, the parts were inspected through X-ray computed tomography at two voxel sizes, 16 μm and 60 μm . The components were then tested in fatigue on a shaker in a setup that models the original configuration on the satellite; the fatigue load is applied as a sinusoidal excitation at constant frequency and acceleration. The experimental life is hence compared with the predicted, to evaluate the accuracy and bias of the estimates.

Fatica e Frattura / 260

Una nuova valutazione del danno per la stima di vita a fatica di giunti saldati in acciaio soggetti a carichi multiassiali ad ampiezza variabile secondo il Peak Stress Method

Authors: Alberto Campagnolo¹; Alberto Visentin²; Giovanni Meneghetti³

¹ *Università di Padova*

² *Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Ingegneria Industriale*

³ *UNiversità di Padova - Dipartimento di Ingegneria Industriale*

Corresponding Authors: alberto.campagnolo@unipd.it, alberto.visentin@unipd.it, giovanni.meneghetti@unipd.it

Il Peak Stress Method è un approccio per la stima della vita a fatica di strutture saldate, basato su analisi agli elementi finiti con mesh rade per la stima rapida dei 'Notch Stress Intensity Factors' (NSIFs). In lavori precedenti, il metodo è stato esteso dal caso di carichi ad ampiezza costante (CA) a casi ad ampiezza variabile (VA), combinandolo con la regola lineare di accumulo del danno di Palmgren-Miner. Tale formulazione si basa sui seguenti step per ogni modo I, II e III: (i) l'applicazione dell'algoritmo Rainflow alle storie temporali delle tensioni di picco; (ii) la definizione di spettri di tensione di picco; (iii) la definizione di un range di tensione equivalente di picco CA che generi lo stesso danno dello spettro VA in un numero di cicli N_0 . Infine, la procedura prevede la definizione di un range di tensione equivalente di picco multiassiale riferita al numero di cicli N_0 , da confrontare con curve di progetto selezionate in funzione del rapporto di biassialità locale. Sebbene la procedura proposta abbia mostrato un buon accordo con un ampio numero di dati sperimentali, da un lato il danno è risultato dipendere dalla scelta del numero di cicli N_0 , dall'altro la definizione di un valore limite del rapporto di biassialità locale per scegliere la curva di progetto si è dimostrato critico. In questo lavoro viene proposta una nuova valutazione del danno a fatica per superare tali limitazioni. La nuova procedura valuta separatamente i contributi di danno associati alle tensioni locali di modo I, II e III, facendo riferimento alle rispettive curve di progetto specifiche per ciascun modo. Il danno totale è quindi ottenuto come somma dei contributi di modo I, II e III, assumendo come soglia critica un valore unitario, corrispondente a una probabilità di sopravvivenza del 50%. La formulazione è stata validata mediante dati sperimentali tratti dalla letteratura, mostrando un ottimo accordo tra le vite a fatica sperimentali e stimate.

Fatica e Frattura / 321

Crack Opening Profile method for stress intensity factor estimation in notched and non-linear materials

Authors: Linda Maggi¹; Anis Allahdiniyan²; David A Hoey¹; David Taylor¹

¹ *Trinity College Dublin*

² *PhD student*

Corresponding Authors: maggil@tcd.ie, dahoe@tcd.ie, anis.allahdiniyan@polimi.it, dtaylor@tcd.ie

Introduction

The concepts of stress intensity factor (K) and a material's fracture toughness form the foundation of Linear Elastic Fracture Mechanics (LEFM): they provide a quantitative assessment of crack propagation risk. Most literature methods for calculating K rely on stress analysis or strain energy estimates [1], which, despite their accuracy, often demand complex calculations and detailed models. Displacement-based approaches [2] are more straightforward but limited to near-tip measurements, which are notoriously hard to obtain accurately in practice. Allahdiniyan and Taylor [3] introduced a simpler alternative: the Crack Opening Profile (COP) method, which estimates K directly from measurements of crack face displacements along the entire crack front. Grounded in the Westergaard equation [4] linking K to displacements, it has proven effective for sharp 2D cracks in linear elastic materials, though still constrained to those ideal cases. The aim of our work is to extend the COP

method to more realistic scenarios, incorporating notches with finite root radius and material non-linearity. This would enable practical K estimation from direct measurements on real-world cracks, with broad applications from structural health monitoring to biological materials like bone.

Materials and Methods

To account for notches and material non-linearity, we adopt a combined Finite Element Analysis (FEA) and experimental approach. From FEA simulations we extract COP shapes and displacement-based K values, validated against stress-based K from literature methods. The experimental works serve as a demonstration of the practical applicability of the methods and to validate the results of FEA. For the analysis of the notch effect on crack propagation, FEA simulations involved U-shaped and elliptical notches in various 2D configurations and the experiments consisted in tensile tests on notched PMMA plates. For the analysis of the material non-linearity, both FEA and experiments focused on tensile tests on notched metallic specimens, with different notch shapes and dimensions. The experiments were carried out on aluminium alloy 6082-T6. For both PMMA and aluminium samples, the COP was measured via 2D Digital Image Correlation (DIC) with a simple USB microscope to prove easy applicability.

Results

The notch study showed that crack-based equations [3] predict COP and estimate K reasonably well for small notches (relative to plate dimensions) regardless of radius and for larger notches only if sharp. For large blunt notches, we proposed corrected formulas. This allows modelling COP with errors <10% and COP-derived K closely matches J-integral K in most cases.

For metals, the same crack-based equations capture the linear K -displacement relationship in the initial test phase, where behaviour is linear elastic. At plastic deformation onset at the notch tip, linearity is lost: COP increases while K stays nearly constant and the COP profile changes with tip blunting. Knowing material properties, we can reasonably estimate plastic onset, K at that point and corresponding displacement trend. It is a simplified model, so there are some uncertainties in predictions, but they still give good indicators for K values.

Conclusion

Our work takes a step forward in developing a simple crack propagation risk estimation method based solely on crack opening measurements. This has potential for real-world applications, from structural monitoring and material characterization to fracture assessment where loading conditions are hard to predict and direct testing is complex.

Acknowledgements

The authors acknowledge the financial support from the European Union Horizon Europe research and innovation programme under the Marie Skłodowska-Curie (MSCA) grant agreement No 101120290 (GAP). The authors are grateful for the financial support and resources that have enabled the progress of this research.

References

- [1] Rice, Journal of Applied Mechanics 1968, 35:379-386
- [2] Lim et al., International Journal of Fracture 1992, 58(3):193-210
- [3] Allahdiniyan and Taylor, Theoretical and Applied Fracture Mechanics 2025, 138:104940
- [4] Westergaard, Journal of Applied Mechanics 1939, 6(2):A49-A52

Fatica e Frattura / 398

Un modello di previsione della vita nel regime VHCF derivato dalla cinetica di impilaggio delle dislocazioni

Author: Nicola Bonora¹

¹ Università di Cassino e del Lazio Meridionale

Corresponding Author: bonora@unicas.it

L'approccio più comunemente utilizzato per la previsione di vita a fatica ad alto ed altissimo numero di cicli è storicamente di tipo fenomenologico basato sulla semplice analisi dei dati a rottura o

sull'evoluzione dell'energia dissipata. Nel regime di fatica ad altissimo numero di cicli (VHCF, $N > 10^7$) i modelli energetici macroscopici perdono potere predittivo ed il cedimento avviene per nucleazione interna in corrispondenza di inclusioni non metalliche.

Il modello proposto collega tre livelli fisici successivi. Il criterio di nucleazione di Stroh (1954, 1955), fondato sull'analisi di equilibrio del pile-up di Eshelby, Frank e Nabarro (1951), stabilisce che una cricca nuclea quando il numero di dislocazioni in pile-up raggiunge una dimensione critica determinata dalla resistenza coesiva del materiale. La cinetica di accumulo ciclico è descritta attraverso il formalismo di Kocks, Argon e Ashby (1975), che fornisce una legge a potenza per la mobilità delle dislocazioni nel regime termicamente attivato. La combinazione di questi due elementi produce direttamente una relazione S-N a tre parametri, tutti con un'interpretazione fisica esplicita, anziché essere costanti empiriche di fitting.

Il modello proposto consente considerare gli effetti probabilistici sulla vita attesa indotti al volume di materiale sollecitato e alla distribuzione dimensionale dei difetti. In questo lavoro, viene presentata la derivazione teorica del modello e la sua verifica e validazione su diverse classi di materiali selezionati sulla base del meccanismo di innesco.

Fatica e Frattura / 329

Fracture Toughness Assessment of γ -TiAl Alloys: Challenges in Applying ASTM Standards

Author: Mauro Filippini¹

¹ *Politecnico di Milano - Dipartimento di Meccanica*

Corresponding Author: mauro.filippini@polimi.it

Lightweight titanium aluminide intermetallic alloys have become increasingly important to improve structural efficiency and reduce fuel consumption and carbon emissions in newly developed gas turbine engines. To enable reliable component design, consistent mechanical properties meeting stringent requirements are essential. In recent years, additive manufacturing has been successfully applied to produce γ -TiAl alloys for structural applications. However, their partially brittle fracture behavior complicates fracture toughness assessment under strict compliance with ASTM E399 and E1820 standards.

This work experimentally evaluates the fracture toughness of additively manufactured Ti 48Al-2Cr-2Nb γ -TiAl alloy at room and elevated temperature. Compact tension C(T) specimens were designed in accordance with ASTM E399 and E1820 recommendations.

For the investigated alloy, ASTM validity requirements are often only partially satisfied, and conventional post-processing procedures may lead to misleading results. To overcome these limitations, a dedicated critical load selection algorithm was developed, enabling the identification of meaningful fracture toughness values even in the presence of plateau-like load-displacement responses associated with progressive lamellar colony decohesion in predominantly lamellar microstructures. For high-temperature tests conducted according to ASTM E1820, a customized post-processing workflow was implemented to ensure consistency between calculated toughness values and experimental observations. Based on the obtained results, practical recommendations are proposed to support future fracture toughness testing campaigns on γ -TiAl alloys.

Fatica e Frattura / 343

Application of DCPD to monitor study fatigue crack growth of internal and surface cracks in additively manufactured Scalmalloy®

Author: Luca Mariotti¹

Co-authors: Andrea Zanon ¹; Luca Patriarca ¹; Stefano Beretta ¹

¹ *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: luca.patriarca@polimi.it, luca.mariotti@polimi.it, stefano.beretta@polimi.it, andrea.zanon@polimi.it

Powder bed fusion laser based (PBF-LB) manufacturing of aluminium alloys is increasingly adopted in aerospace and space applications due to its design flexibility, versatility and high mechanical performance. However, the presence of intrinsic manufacturing defects remains a critical issue for the fatigue behaviour and certification of safety-critical components. A different crack growth behaviour between embedded and surface defects has been observed in literature. These preliminary studies have shown that cracks initiated from volumetric defects, which are not exposed to the open environment, have a lower fatigue crack propagation rates and higher threshold stress intensity factors compare to surface fractures, resulting in significantly longer fatigue lives and higher fatigue strength. However, a robust experimental characterization for the propagation rate of internal cracks is still missing.

This work investigates the fatigue behaviour of internally-initiated failures in PBF-LB/Scalmalloy®. Traditionally used for surface crack monitoring, the direct current potential drop (DCPD) technique is proposed as an innovative method by being applied on specimens containing artificial CAD-seeded internal flaws, to measure growth rates of internal fatigue cracks. The evolution of the electrical potential drop across the crack plane is correlated to crack advancement by means of both finite elements analyses and experimental measurements. DCPD enables continuous and high-resolution monitoring of internal crack propagation during fatigue loading without the need for complex specimen geometries or advanced in-situ facilities (e.g. synchrotron X-ray tomography).

The experimental results demonstrate the capability of the DCPD technique to reliably track the growth of internal cracks in Scalmalloy®. The measurements show a clear reduction in crack growth rate for internally-initiated fractures in comparison with surface cracks. The identified trend is in agreement with previous literature studies on other alloys, confirming the existence of a distinct internal crack propagation behaviour which can be account in refined life prediction models. The proposed approach represents a practical and versatile tool for the experimental characterization of internal crack growth, providing a promising route towards the standardization of embedded crack propagation testing.

Fatica e Frattura / 351

In-Service Structural Health Monitoring in Presenza di Sotto-campionamenti o Misure Parziali per Valutazioni del Danneggiamento a Fatica

Author: Roberto Tovo¹

Co-author: Paolo Livieri²

¹ *Università di Ferrara*

² *Università degli studi di Ferrara*

Corresponding Authors: lvp@unife.it, roberto.tovo@unife.it

Obiettivi

Nelle applicazioni industriali, il monitoraggio continuo di mezzi e componenti in esercizio è a volte limitato da vincoli di trasferimento dati o da interruzioni temporanee delle acquisizioni, rendendo necessario operare con segnali di carico sottocampionati o incompleti. Questo lavoro propone un framework computazionale per la ricostruzione di storie di carico e la conseguente valutazione del danno a fatica in condizioni di misura parziale.

Metodo e risultati

Un primo approccio combina tecniche di ricostruzione nel dominio del tempo per recuperare le componenti ad alta frequenza perse, integrandole con una modellazione probabilistica degli estremi tramite processi stocastici e/o analisi nel dominio della frequenza. La validazione viene condotta confrontando il danno cumulativo stimato da segnali ricostruiti con quello ottenuto da dati ad alta risoluzione, sia per segnali simulati che misure reali.

Un secondo approccio valuta la possibilità di implementare on-board protocolli di Structural Health Monitoring capaci di ridurre significativamente volume di dati trasmessi.

Conclusioni

In caso di trasmissioni dati a bassa velocità o con intermissioni, ovviamente la possibilità di operare pre-processamenti on-board risolve i problemi di stima del danneggiamento a condizione che i punti potenzialmente critici della struttura da investigare siano precisamente individuati a priori.

In assenza di tale opportunità, l'elaborazione ex-post o in-time da remoto su serie temporali danneggiate o parziali può portare a valutazioni interessanti. Le ricostruzioni probabilistiche risultano molto efficaci in casi sostanzialmente stazionari. Sorprendentemente, alcuni algoritmi di ricostruzione deterministici nel dominio del tempo, forniscono risultati apprezzabili anche per frequenze di acquisizione ampiamente inferiori alla frequenza di Nyquist, applicando ipotesi di continuità e alcune verifiche sui possibili contenuti in PSD delle medie ed alte frequenza completamente ignorate da campionamenti radi o parzialmente interrotti.

Fatica e Frattura / 388

A SED-Based Mode-Dependent Limit Notch Radius for Multiaxial (I+III) Fatigue of Notched Components and its Effective Stress Formulation

Author: Pietro Foti¹

Co-authors: Michele Zappalorto²; Filippo Berto³

¹ *Department of Chemical, Material and Environmental Engineering, La Sapienza University of Rome*

² *Department of Management and Engineering, University of Padova*

³ *Department of Chemical, Material and Environmental Engineering (DICMA), La Sapienza University of Rome, Piazzale Aldo Moro 5, 00185 Rome (Italy)*

Corresponding Authors: filippo.berto@uniroma1.it, pietro.foti@uniroma1.it, michele.zappalorto@unipd.it

Geometrical discontinuities in mechanical components govern fatigue performance through stress concentrations and steep stress gradients. Classical point-based approaches are not fully consistent in capturing the full range of notch geometries, leading to the conventional distinction between blunt and sharp notches treated as separate cases. The averaged Strain Energy Density (SED) approach provides a consistent energy-based framework for notch fatigue assessment through the evaluation of the SED over a finite control volume defined by characteristic lengths associated with mode I+II and mode III loading. A key result of the present work is the emergence of a mode-dependent limit notch radius, derived within the averaged SED framework, which governs the transition between blunt and sharp notch behaviour. An analytical expression is derived for this limit radius as a function of mixed-mode loading conditions and notch opening angle. Furthermore, the limit radius under mixed-mode loading is shown to be bounded by the corresponding pure Mode I and Mode III limits, ensuring a continuous transition across loading regimes. The formulation is validated against a comprehensive experimental database of mixed-mode (I+III) fatigue results collected from the literature, comprising 142 curves for different materials. Within the derived framework, the Atzori-Lazzarin-Meneghetti diagram is extended to multiaxial loading conditions, enabling a reformulation of the averaged SED as an equivalent stress. This preserves the physical basis of the averaged SED while enabling a unified and practical fatigue assessment of notched components under multiaxial loading.

Fatica e Frattura / 408

A physics-guided neural network for predicting mode-I stress intensity factors in edge-cracked plates

Author: Atif Mehmood¹

Co-authors: Claudio Sbarufatti ¹; Marco Giglio ¹

¹ *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: marco.giglio@polimi.it, atif.mehmood@polimi.it, claudio.sbarufatti@polimi.it

In recent years, data-based models have been employed across various disciplines owing to their ability to reduce time and cost while maintaining high accuracy. However, fully capturing the intricacies of complex phenomena often requires large volumes of data. This limitation motivated the researchers to develop models that respect the physical laws while benefitting from the strengths of the data-based models. In fatigue and fracture mechanics, such models have been implemented to predict stress intensity factors (SIFs), crack propagation rates as well as the remaining useful life. In this study, a physics-guided neural network (PGNN) is proposed to predict the SIFs of edge cracks in 2D under mode-I loading conditions. The model is trained on the data from the finite element method (FEM) simulations, which were carried out to account for the variations in key geometric parameters including plate dimensions, normalized crack length (a/W) and normalized crack location. The proposed PGNN predicts the SIFs with significantly higher accuracy than its pure data-based counterparts. The enhanced performance stems from the incorporation of analytical relations within the model, which provide physics-based guidance and enable more effective modelling of the underlying behaviour of the problem. The present work serves as a preliminary step to establish the proposed methodology with future extensions aimed at more complex geometries, crack configurations and loading conditions.

Fatica e Frattura / 411

Linear Viscoelastic Fracture Mechanics: energetic theory, FE simulations and experiments

Authors: Guido Violano¹; Cosimo Mandriota¹; Nicola Menga¹; Giuseppe Carbone¹; Giuseppe Pompeo Demelio¹; Luciano Afferrante¹

¹ *Politecnico di Bari*

Corresponding Authors: luciano.afferrante@poliba.it, guido.violano@poliba.it

Delayed fracture represents a crucial aspect in the design of components made of viscoelastic materials. In such materials, a crack may appear stable under a given load and start propagating only after a finite time, commonly referred to as the ‘delay time’. This time is not an intrinsic material property, but depends on the entire loading history, the viscoelastic response, and the energy available at the crack tip. Its quantitative prediction is therefore essential for assessing the safety and reliability of polymers, elastomers, gels, and polymer-based composite materials.

In this work, we propose an energy-based theory for Mode I crack initiation in linear viscoelastic solids. The model, derived from the principle of virtual work, leads to a generalized Griffith criterion. In particular, the fracture energy release rate depends on the convolution between the time history of the stress intensity factor $K_I(t)$ and the creep function of the material. Crack initiation is therefore not determined by an instantaneous critical value of K_I , but by the attainment of a time- and history-dependent energy threshold.

The formulation allows the direct prediction of the delay time for different loading conditions, including step loading, loading ramps, and power-law loading histories. In all cases, the theory captures the reduction of the delay time with increasing applied load and describes the influence of the loading rate on fracture initiation.

The theoretical predictions are verified through finite element simulations, in which viscoelastic fracture is modeled using a cohesive zone modeling (CZM) approach. The numerical results confirm the proposed criterion and show that the delay time is accurately predicted when the process zone, where cohesive mechanisms are concentrated, remains small compared with the characteristic lengths of the problem.

Finally, the theory is validated against experiments performed on pre-notched PTFE specimens. The viscoelastic response of the material is reconstructed from DMA measurements and incorporated into the theory through a Prony-series representation. The comparison shows that the theory accurately reproduces the experimentally measured delay times while maintaining predictive capability over a loading-time interval spanning approximately two orders of magnitude.

The results therefore demonstrate that the delay time can be quantitatively predicted exclusively from the viscoelastic characterization of the material and the applied loading history. In particular, unlike many approaches based on cohesive zone models or phenomenological energetic formulations, the present framework does not require the introduction of a characteristic process-zone length calibrated as a fitting parameter. This aspect represents a significant advancement with respect to traditional approaches in viscoelastic fracture mechanics.

Fatica e Frattura / 450

Sicurezza per assi soggetti a caduta gravitazionale: dai requisiti normativi alla progettazione effettiva della sicurezza

Author: luca landi¹

Co-authors: Agnese Staffa²; Luca Burattini³; lorenzo landi⁴

¹ *dipartimento di ingegneria università degli studi di Perugia*

² *Università degli Studi di Perugia*

³ *Università di Perugia*

⁴ *to di ingegneria, università di perugia*

Corresponding Authors: luca.burattini@dottorandi.unipg.it, luca.landi@unipg.it, lorenzo.landi@collaboratori.unipg.it, agnese.staffa@dottorandi.unipg.it

La principale misura progettuale adottata per la riduzione del rischio dei macchinari è la disattivazione dei componenti mobili della macchina per garantire uno “stato di arresto sicuro”.

Per i componenti sottoposti a carico gravitazionale lungo l’asse di moto (Gravity Loaded Axis - GLA), deve essere considerata, nella valutazione del rischio, anche la possibile caduta libera in stato diseccitato.

In caso di interruzione di corrente, gli assi a carico gravitazionale sono trattenuti esclusivamente dai sistemi di frenatura o contrappeso installati nella macchina. In presenza di guasti non rilevati o per una manutenzione inadeguata è possibile il rilascio improvviso del sistema a causa dell’interruzione/rimozione di corrente/alimentazione. Inoltre, nelle macchine utensili multimodali (ad esempio, modalità automatica, di manutenzione, setup,) l’esposizione degli operatori ai GLA può variare a seconda della macchina e dell’utilizzo specifico, richiedendo quindi una diversa progettazione della risposta del sistema per ogni modo operativo. In questo articolo viene presentata in dettaglio la progettazione e l’ottimizzazione di un sistema di bloccaggio meccanico per l’arresto automatico dei GLA di un costruttore italiano. In primo luogo, viene individuato il metodo di misura del tempo di intervento del sistema di sicurezza dopo la rimozione dell’alimentazione: il bloccaggio meccanico deve essere attivo prima che il GLA inizi a muoversi. Successivamente, utilizzando il caso applicativo sovraesposto si presenterà un modello transiente dei componenti principali del GLA atto alla valutazione delle reali forze dinamiche da considerare per la progettazione del componente. Infine, verranno discussi alcuni aspetti critici relativi ai requisiti standardizzati per i GLA, sulla base della progettazione dei sistemi reali considerati.

Ferroviario / 298

Numerical Evaluation of Curving Resistance in Freight Wagons Equipped with Y25 Bogies

Authors: Nicola Bosso¹; Antonio Gugliotta¹; Matteo Magelli²; Nicolò Zampieri²

¹ *Politecnico di Torino*² *Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, Politecnico di Torino*

Corresponding Authors: nicolo.zampieri@polito.it, matteo.magelli@polito.it, antonio.gugliotta@polito.it, nicola.bosso@polito.it

1 Objective

The longitudinal forces that are generated in the coupling devices of freight wagons play a role of primary importance in the dynamic behavior of trains. The IRS 40421 [1] correlates, in fact, in a direct way, high values of longitudinal forces with the risk of derailment. The preliminary calculation of the longitudinal forces inside the composition is therefore of fundamental importance to evaluate its safety before the entry into service. The estimation of such forces is commonly made with the use of specific numerical codes, which consider the wagons as concentrated masses with the only longitudinal degree of freedom, while the coupling devices are modeled by means of force elements with non-linear characteristic and hysteresis. The resisting forces to motion are normally simulated by means of concentrated loads applied in the center of mass of each wagon and can be classified into ordinary resistances (friction forces resisting motion and aerodynamic forces) and accidental resistances (gradients and curves).

For the calculation of the curving resistances, simplified methods are commonly used which allow the estimation of the resistant force as a function of curve radius only. This simplified approach does not take into account several factors such as the unbalanced lateral acceleration, the gauge widening, the longitudinal stiffness of the primary suspensions, the bogie wheelbase, the presence of flange lubrication systems, etc.

The work describes a numerical analysis to evaluate the curving resistances of freight railway vehicles, equipped with Y25 bogies. In particular, the results of the numerical analysis allow the definition of a new law for the estimation of such force, able to evaluate the effects of the most influential parameters.

2 Method

The determination of the resistant force to motion during running in curve is carried out by means of the use of a multibody model, developed in the Simpack environment, of a freight vehicle equipped with Y25 bogies. The vehicle is modeled with a high level of detail, including the non-linear effects due to the main friction elements, such as Lenoir-link, pads, center pivot, etc. In the first phase of the analysis an isolated wagon is considered during curve negotiation in order to calculate the traction force necessary to maintain a constant speed, this force therefore represents the resisting force. The analysis is repeated considering different scenarios in terms of: curve radius, uncompensated acceleration, gauge widening, friction coefficient between wheel flange and inner side of the rail, mass of the vehicle and longitudinal stiffness of the primary suspension.

In the second phase of the work, instead, a set of three vehicles is considered in order to analyze if the composition has an effect on the resisting force in curve. The forces exchanged in the coupling devices can in fact influence the dynamic behavior of the vehicle in curve and the wheel-rail contact forces. The purpose of this analysis is to understand if the resisting force in curve increases linearly with the number of wagons considered or if it is, instead, necessary to consider the effect of the composition.

3 Results

The results of the different simulations are therefore used to define a new law for the evaluation of the resisting force to motion in curve as a function of the main parameters considered. A more precise knowledge of the curving resistances is important to have a more precise estimation of the coupling forces and of the energy consumption of the vehicle.

4 Conclusions

The work describes a numerical analysis for the determination of the curving resistances of a freight railway vehicle equipped with Y25 bogies. The results of the numerical simulations allow the definition of a simplified law for the estimation of the curving resistances as a function of the main parameters. The analysis is not limited to the analysis of an isolated wagon, but it includes an analysis for the evaluation of the effect of the composition and, therefore, of the coupling forces.

References

[1] IRS 40421:2021. Rules for the consist and braking of international freight trains: new IRS 40421.

Ferroviario / 304

Direct Reconstruction of Thermal Hotspots in Tread Braking Using Explicit Finite Difference Method

Authors: Eric Landström Voortman¹; Luciano Cantone²; Matheus De Lara Todt¹; Riccardo Siniscalchi³; Tore Verner-
ersson¹

¹ Chalmers University of Technology

² Dip.to Ingegneria Impresa Università Tor Vergata

³ Università degli Studi di Roma Tor Vergata

Corresponding Authors: ericlan@chalmers.se, tore.vernersson@chalmers.se, riccardo.siniscalchi@uniroma2.it,
luciano.cantone@uniroma2.it, todt@chalmers.se

Thermal hotspots frequently arise in systems involving sliding frictional contact, induced by spatially non-uniform heat generation, leading to severe thermal gradients, localized material degradation, and surface damage. Railway tread braking provides a representative example, where infrared thermography reveals strongly localized temperature patterns that are difficult to reproduce using conventional forward thermal models. Analytical solutions are generally not suitable for capturing such transient effects, as the localized heating breaks the symmetry assumptions typically required, highlighting the need for numerical approaches. Inverse heat conduction methods enable reconstruction of unknown thermal loads from temperature measurements, but classical approaches are typically ill-posed and rely on iterative optimization and regularization procedures, resulting in high computational cost and limited robustness in transient analyses. These hotspots are critical for predicting internal thermal stresses and understanding the mechanisms of material fatigue and damage, yet their direct measurement or accurate modelling remains challenging, primarily due to their stochastic nature, which limits deterministic prediction of their evolution. This work aims to develop a direct numerical approach capable of reconstructing the unknown heat inputs responsible for experimental hotspot formation, providing insight into internal temperature distributions and enabling more accurate assessment of stress and damage within the wheel.

A 3D finite difference discretization of the heat conduction equation combined with explicit Euler time integration is employed to solve the inverse thermal problem. The explicit formulation ensures that the temperature field at each step depends only on previously known states, allowing sequential reconstruction of the unknown thermal input directly from temperature measurements in the form of thermographic data. This non-iterative approach captures strong spatial gradients associated with hotspot formation while avoiding the high computational cost and potential instability of traditional iterative inverse methods. The method also enables exact reconstruction of the imposed temperature field at the boundaries, providing a rigorous match between the modelled and imposed thermal conditions, which is critical for accurate assessment of hotspot development. Spatial and temporal discretization parameters are carefully chosen to satisfy stability conditions and maintain numerical accuracy, ensuring that localized heating patterns are faithfully reproduced. The method naturally accommodates the sharp thermal gradients observed in hotspots, which are essential for subsequent stress analysis.

Temperature measurements were acquired using a broadband MWIR camera along a single fixed axial line on the wheel tread. As the camera records at regular time intervals during the braking sequence, wheel rotation enables reconstruction of the temperature evolution across the entire tread. These measurements were coupled with one or two sliding thermocouples used for calibration of the average emissivity, providing consistent input for the reconstruction of hotspots. The proposed approach is validated against these measurements and reference numerical solutions representative of tread braking conditions. Results demonstrate that, for the given cases, the method accurately reconstructs hotspot intensity and transient behaviour, reproducing both the spatial localization and temporal evolution observed experimentally. Detailed maps of internal temperature gradients enable more precise calculation of thermal stresses within the wheel, supporting evaluation of material fatigue and predictive maintenance. The approach also allows exploration of different experimentally studied braking scenarios and operating conditions, demonstrating robustness and scalability for parametric studies.

Overall, the study shows that explicit finite difference schemes provide a computationally efficient

and physically consistent framework for inverse thermal analysis of localized heating phenomena. By directly linking thermographic measurements to numerical reconstruction, the proposed method offers an accurate and practical tool for analysing hotspot formation in tread braking and other friction-driven systems. The approach facilitates improved assessment of internal thermal stresses and supports detailed damage prediction, providing a foundation for design optimization, reliability analysis, and enhanced maintenance strategies in systems where heat sources cannot be directly measured. The ability to reconstruct detailed temperature gradients across the tread enables a more precise evaluation of thermal stresses and their contribution to wheel damage, supporting both predictive maintenance and engineering design improvements.

Ferroviario / 313

Development of a railway component made by PBF-LB manufacturing

Author: Riccardo Pavel Traverso¹

Co-authors: Stefano Raiti²; Stefano Beretta¹

¹ *Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering*

² *Hitachi Rail, Head of Carbody Engineering*

Corresponding Authors: stefano.beretta@polimi.it, riccardopavel.traverso@polimi.it

Additive Manufacturing (AM) is commonly associated with lightweight components design thanks to the increased design freedom it offers, enabling flexibility and promoting a more effective material distribution in design space. Another advantage of AM, especially for machinery and transportation components, is a competitive technology for reducing the lead time of parts replacement.

The objective of this work is to show the successful application of AM to a railway component, i.e. the connecting arm transferring the forces from the train bogie to the coach anti-roll bar. The component is currently produced by forging, a technology well-suitable for high-volume production. Therefore, the conversion from forging to AM could represent a promising strategy to support the digital inventory of small-series parts.

We started with the selection of a material suitable for the AM process with powder bed fusion-laser beam (PBF-LB) technology and the following application, i.e. the austenitic stainless steel AISI 316L. Then, the process qualification was carried out in accordance with the ESA ECSS-Q-ST-70-80C standard. The testing campaign to define the material properties included: tensile tests, axial fatigue tests (at different stress ratios and surface finishing) and propagation tests.

The railway component was assessed in compliance with EN 17149, the European standard for the strength assessment of railway structures which is based on FKM-Guideline (for wrought alloys). The S-N curves at different stress ratios provided the experimental stresses referred to the target fatigue life. Defect criticality models were employed additional factors to be considered for AM: defect size and surface quality. Fracture-based models showed a dependence on stress ratio very different from the one of wrought austenitic steels.

After determining the material allowables under fatigue regime, the design of the forged component was slightly modified for PBF-LB technology. The manufacturing and testing of full-scale prototypes confirmed that the fatigue performance of the component meets the operational requirements.

Ferroviario / 325

Prove d'urto e validazione del progetto di un paraurti assorbitore di energia

Authors: Gianluca Megna¹; Andrea Bracciali²

¹ *Università di Pisa*

² *Università degli Studi di Firenze*

Corresponding Authors: gianluca.megna@unifi.it, andrea.bracciali@unifi.it

Nelle stazioni ferroviarie di testa i binari sono caratterizzati dalla presenza di un paraurti per tentare di limitare, per quanto possibile, le conseguenze di un'errata applicazione dei freni all'arrivo di un convoglio o di errate manovre necessarie per la movimentazione di servizio dei veicoli in tali impianti.

In particolare, negli ultimi anni si è estesa l'applicazione di "paraurti assorbitori di energia", indicati in letteratura con il termine anglosassone EABS –Energy Absorbing Buffer Stop, il cui scopo è quello di evitare danni permanenti al materiale rotabile ed all'infrastruttura attraverso meccanismi di dissipazione dell'energia per attrito o oleodinamici.

Al convegno AIAS 2023 è stata presentata una memoria che descriveva il concetto di un nuovo EABS ad attrito, successivamente pubblicata da IOP. In particolare, il modello FEM risultava assai complesso dovendo gestire vincoli elastici monolateri (binario appoggiato sul ballast) e contatti con strisciamento (ganascce di frenatura). In seguito, alcuni degli autori hanno pubblicato su Dynamics un articolo nel quale viene descritta la dinamica longitudinale di treni di varia composizione per comprendere le accelerazioni longitudinali presenti dato che le specifiche esistenti per gli EABS sono particolarmente fumose su questo punto.

L'EABS è stato quindi costruito e, come ovvio, deve essere in grado di superare le prove di omologazione per il cliente finale, che in questo caso è Rete Ferroviaria Italiana (RFI). Sebbene le richieste siano esclusivamente prestazionali (il paraurti deve fermare 650 t a 15 km/h in meno di 10 m con un'accelerazione massima di -2m/s^2), la validazione del modello FEM resta fondamentale per osservare le tensioni massime riscontrate negli elementi strutturali principali dell'EABS e, specificatamente, per verificare che il sollevamento del binario sotto il pancone di testa del paraurti, ossia dove si verifica l'urto, sia compatibile. Uno dei principali vantaggi dell'architettura sviluppata è, infatti, la non necessità di rinforzare il binario obbligandone in pratica la demolizione e la ricostruzione ex novo.

L'articolo descrive l'intera attività sperimentale effettuata, comprendente misure accelerometriche, estensimetriche e DIP (Digital Image Processing) per rilevare gli spostamenti globali mediante telecamere ad alta velocità.

Di particolare rilevanza è la misura delle tensioni e delle deformazioni con elevata frequenza di campionamento, atteso che nella struttura dell'EABS è presente un puntone di elevata lunghezza, incernierato alle estremità, e si intende pertanto valutare il coefficiente di sicurezza nei confronti dell'instabilità elastica a pressoflessione.

L'articolo quindi si conclude con la valutazione critica dell'attendibilità del modello agli elementi finiti utilizzando opportuni indicatori di confronto.

Ferroviario / 296

Thermal Analysis of Tread Braking Using Scaled TwinDisc Testing and Experimentally Validated Numerical Models

Authors: Nicola Bosso¹; Antonio Gugliotta¹; Matteo Magelli²; Rosario Pagano¹; Nicolò Zampieri²

¹ *Politecnico di Torino*

² *Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale, Politecnico di Torino*

Corresponding Authors: matteo.magelli@polito.it, rosario.pagano@polito.it, nicola.bosso@polito.it, nicolo.zampieri@polito.it, antonio.gugliotta@polito.it

1 Objective

Tread braking is the traditional braking system installed on railway freight wagons, due to its advantages related to small costs, simple design and simple replacement. Traditional shoes were made of phosphorus cast iron (P10 shoes), which however were known for producing high levels of rolling noise because of the high tread surface roughness generated by thermoelastic instability (TEI) phenomena. Therefore, to reduce the noise pollution related to railway freight traffic, and to comply with the EU limits on rolling noise [1], traditional P10 cast iron shoes are being replaced with shoes made of composite materials.

Composite shoes tend to have values of thermal conductivity which are more than one order of magnitude lower than those of P10 shoes. This causes a higher amount of the total friction heat flux to flow into the wheel, hence causing higher thermal stress and possible undesired microstructural changes.

The prediction and estimation of the temperature field in the wheel and shoes is hence essential to ensure a reliable and safe operation of freight wagons. Combining the results of numerical models and experimental tests is the key to gain a deeper understanding of the thermo-mechanical phenomena at the wheel-shoe contact interface for a wide range of brake shoe materials.

To this purpose, in past activities, the Politecnico di Torino (PoliTo) railway research group designed and built a scaled twin-disc test bench for the experimental investigation of wheel-rail wear and wheel-shoe interaction [2,3]. At the same time, the research team implemented several numerical models for the calculation of the temperature field in wheels [4,5] and shoes [6,7].

The present work shows the upgrades made to the original twin-disc configuration to include a system with pyrometers for the evaluation of the temperature of wheel and shoes during braking operations. The collected values are used to tune and validate previously developed numerical models. The results of the activity can lead to a better understanding of the thermal interaction between tread braked wheels and shoes, hence leading the path towards the development and implementation of reliable on-board monitoring systems.

2 Method

To achieve the objectives of the work, the PoliTo twin-disc bench was upgraded with a specifically designed system for the installation of several commercial pyrometer sensors for the measurement of temperature in different locations of interest. These include: i) the wheel tread close to the contact with the shoes, ii) the shoes and iii) the rail roller close to the contact with the wheel roller. Sensors are fixed to plates mounted to the main bench stationary components.

Different tests under drag braking conditions are run measuring the temperature field with the selected pyrometers. The bench allows to test different shoe materials for two configurations of the tread braking system, namely with one (1Bg) or two (2Bg) brake shoes acting on the wheel tread surface. The greatest advantage of the scaled tread braking system is that it was designed following a specifically conceived thermal similitude model [3]. This ensures that the temperature field recorded in the scaled laboratory device has unitary scaling with respect to the full-scale system.

The temperature values recorded on the experimental tests are used to tune and then validate simplified numerical models for the wheel and shoe. Precisely, the tuning activity allows to optimize the main model parameters, including the heat flux partitioning factor, that determines the amount of the total friction heat flux flowing towards the wheel and shoes. The model parameters are identified with trial and error as well as with numerical optimization routines, that aim at minimizing the difference between simulated and experimentally recorded temperature values.

3 Results

The results of the activity enable an overall comparison of different types of shoe materials on the thermal behavior of the wheel. The tuning and validation of the thermal models makes it possible to perform predictions of the temperature field over a wide range of operating conditions, in terms of dissipated power and energy, for different speed values.

4 Conclusions

The newly built system with pyrometers for the measurement of temperature on the scaled twin-disc bench allows to test different types of shoes in laboratory conditions. The validated numerical models can be adopted to evaluate the temperature evolution during specific braking operations. The models could be further simplified in future activities for implementation within on-board monitoring systems.

References

[1] 2006/66/EC: European Commission, Commission Decision of 23 December 2005 Concerning the Technical Specification for Interoperability Relating to the Subsystem 'Rolling Stock Noise' of the Trans-European Conventional Rail System; European Commission: Brussels, Belgium, 2006.

- [2] Magelli, M.; Pagano, R.; Zampieri, N. Design of an Innovative Twin-Disc Device for the Evaluation of Wheel and Rail Profile Wear. *Designs* 2024, 8, 73. doi: 10.3390/designs8040073.
- [3] Magelli, M.; Pagano, R.; Zampieri, N. Adapting a scaled twin-disc device for tread braking investigations based on an ad-hoc thermal similitude model. *Wear* 2025, 574-575, 206105, doi: 10.1016/j.wear.2025.206105.
- [4] Bosso, N.; Cantone, L.; Falcitelli, G.; Gjini, R.; Magelli, M.; Nigro, F.M.; Ossola, E.; Zampieri, N. Simulation of the thermo-mechanical behaviour of tread braked railway wheels by means of a 2D finite element model. *Tribology International* 2023, 178, 108074, doi: 10.1016/j.triboint.2022.108074.
- [5] Magelli, M.; Zampieri, N. A new finite element axisymmetric model with non-axisymmetric thermal loads for thermal analyses of tread braked wheels. *Tribology International* 2025, 209, 110675, doi: 10.1016/j.triboint.2025.110675.
- [6] Wu, Q.; Magelli, M.; Zampieri, N.; Bernal, E. Adding a brake shoe temperature model into freight train longitudinal braking dynamics simulations. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 2022, 237, 631-641, doi: 10.1177/09544097221126274.
- [7] Magelli, M.; Zampieri, N.; Wu, Q. Integration of brake block thermal equations within a railway vehicle multibody model: a multiphysics approach. *International Journal of Rail Transportation* 2025, 13, 69-84, doi: 10.1080/23248378.2023.2301618.

Ferroviario / 401

Ottimizzazione dei treni merci: approccio combinatorio e statistico secondo la UIC IRS 40421

Authors: Luciano Cantone¹; Nedka Dechkova Nikiforova²; Rossella Berni²

¹ *Dip.to Ingegneria Impresa Università Tor Vergata*

² *Dipartimento di Statistica, Informatica, Applicazioni "Giuseppe Parenti", Università di Firenze*

Corresponding Authors: rossella.berni@unifi.it, n.nikiforova@unifi.it, luciano.cantone@uniroma2.it

Il presente studio propone un approccio integrato e multidisciplinare per l'ottimizzazione della sicurezza e dell'efficienza operativa dei treni merci, operando nel quadro metodologico dell'approccio relativo definito dalla normativa UIC IRS 40421. Superando i limiti standard di composizione, il lavoro si pone l'obiettivo primario di minimizzare le forze longitudinali di compressione (LCF) e di trazione (LTF), critiche rispettivamente per la prevenzione dei deragliamenti per instabilità e degli spezzamenti del convoglio. La validazione delle metodologie è condotta su un caso di studio reale: un treno merci da 700 metri, configurazione di riferimento utilizzata per la validazione del software certificato TrainDy.

Il lavoro articola la trattazione attraverso due percorsi metodologici distinti ma complementari. Il primo è un approccio combinatorio basato sul Global Neighborhood Algorithm (GNA), un algoritmo meta-euristico progettato per risolvere problemi di ottimizzazione complessi bilanciando esplorazione globale e sfruttamento locale. Il GNA opera generando, a ogni iterazione, il 50% delle soluzioni tramite ricerca casuale nello spazio globale e il restante 50% nell'intorno (neighborhood) della migliore soluzione corrente. Applicato alla sequenza dei vagoni, identificata dal loro posizionamento univoco, l'algoritmo utilizza operatori di permutazione (two-opt swap) per identificare l'ordine ottimale. I risultati dimostrano che il GNA è in grado di individuare configurazioni sicure con un risparmio di risorse computazionali del 90% rispetto alle tecniche di randomizzazione standard, superando in efficienza anche gli algoritmi genetici.

Il secondo è un approccio che impiega metodi statistici innovativi, basati su: i) la pianificazione e la costruzione di un opportuno disegno sperimentale per i computer experiments che utilizza un numero relativamente basso di prove sperimentali, ii) l'applicazione di opportuni modelli statistici con effetti fissi e casuali, anche in un'ottica di modellizzazione Kriging. Tali metodi statistici avanzati permetteranno, dato uno specifico treno merce, di individuare l'ordine dei veicoli che lo compongono al fine di ridurre le forze di compressione e di trazione scambiate tra di essi.

L'integrazione di queste tecniche offre alle Imprese Ferroviarie uno strumento decisionale potente e a basso costo per massimizzare la capacità di carico e la massa trasportata. Agendo esclusivamente sulla logica di composizione e sulla distribuzione del payload, l'approccio consente di incre-

mentare l'efficienza del trasporto merci senza richiedere investimenti infrastrutturali, garantendo al contempo standard di sicurezza superiori ai convogli tradizionali.

Ferroviano / 327

Svii in deposito: analisi fenomenologica e progettazione di una "guard rail"

Authors: Andrea Bracciali¹; Gianluca Megna²

¹ Università di Firenze - Dipartimento di Ingegneria Industriali

² Università degli Studi di Firenze

Corresponding Authors: andrea.bracciali@unifi.it, gianluca.megna@unifi.it

La movimentazione dei treni delle metropolitane nei depositi avviene in condizioni di tracciato assai diverse da quelle in linea. Spesso si usa un armamento più leggero, traverse più distanziate, curve di raggio molto stretto, notevoli allargamenti di scartamento. La presenza di sghebbi è frequente, e considerando la bassa velocità, il basso carico assiale (fino a 4 t/ruota) e le condizioni di lubrificazione del bordinio spesso non ottimali è facile incorrere nel fenomeno degli "svii a bassa velocità".

Questi svii sono deleteri nei sistemi eserciti con veicoli a guida automatica, in cui anche in deposito non è prevista la guida manuale. Uno svio infatti genera notevole rumore ma un limitato aumento della resistenza all'avanzamento, con la conseguenza che il sistema a guida automatica aumenterà la trazione anziché frenare, facendo procedere il convoglio con l'asse (o gli assi) sviati distruggendo una lunga estesa di binario e danneggiando notevolmente il veicolo fino, a volte, alla pratica distruzione del carrello.

In molti casi la fenomenologia degli svii a bassa velocità può risultare poco prevedibile e i classici metodi per contrastarli possono non essere totalmente efficaci. Nel caso mostrato in questo articolo si discute di un impianto in servizio da circa 15 anni che ha visto una incidenza di svii praticamente annuale occorsi in diversi punti del deposito senza una ricorrenza precisa. Questa frequenza è sì molto bassa ma non trascurabile: se i danneggiamenti al binario possono essere riparati relativamente facilmente, i danneggiamenti agli apparecchi del binario (scambi) ed ai rotabili impongono costi e tempi di fermo assolutamente indesiderabili.

Il caso discusso in questo articolo è caratterizzato da un veicolo con telaio carrello articolato. Questa architettura risulta essere estremamente valida in quanto il carrello risulta essere, come suol dirsi, "insensibile allo sghebbio", il che è una qualità assai positiva. Per contro, come si mostrerà nell'articolo, questa caratteristica risulta essere assai negativa nei confronti degli svii. In caso di incipiente sormonto del bordinio, infatti, non si ha trasferimento di carico fra le quattro ruote del carrello e quindi non vi sono azioni che si oppongano efficacemente al fenomeno del "flange climbing".

Non potendo intervenire sui veicoli, e non potendo radicalmente mutare la topologia del deposito nel quale avvengono gli svii, è necessario prevedere meccanismi che intercettino gli svii limitandone le conseguenze. Se essi sono noti come "guard rail" (secondo la norma EN 13232-3), nel caso presente si è riscontrata sulla curva più stretta ($R=78$ m) la presenza di una "check rail" (quindi sempre in contatto con la faccia interna delle ruote) montata su traverse in legno mentre altre porzioni delle curve (con raggi più grandi ma su cui si sono verificati gli svii) sono armate con traverse in c.a.p. e non hanno alcuna controrotaia.

Le controrotaie tradizionali vengono ancorate alle traverse senza andare ad interessare le rotaie ed i loro attacchi. Nel caso oggetto di studio non sarebbe, evidentemente, possibile applicare la "guard rail" alle traverse in c.a.p. senza prevedere una loro sostituzione, che risulterebbe essere particolarmente onerosa in quanto sarebbe necessario sviluppare una nuova traversa che alloggiasse anche gli attacchi per i supporti della "guard rail".

Si è pertanto stati costretti a ricorrere ad un nuovo tipo di supporto per controrotaia che può essere applicato come retrofit a qualunque binario, armato con qualunque tipo di traversa, e ne vengono discusse le metodologie di progettazione, costruzione e verifica strutturale sotto carichi eccezionali. Dato che la controrotaia è fissata direttamente alle rotaie, le azioni ad essa applicate da un veicolo in condizione di svio si scaricano sulla rotaia stessa. Questo ha obbligato ad effettuare delle verifiche relativamente inusuali (forti carichi torsionali sulle rotaie, carichi di trazione sugli attacchi) che hanno richiesto modelli non normalmente utilizzati per questi componenti di armamento.

Keynote speech / 456

Leonardo: la sfida dell'innovazione e il valore delle competenze

Author: Francesco Macri¹

¹ *Leonardo*

Keynote speech / 455

When Materials Science and Rocket Science Unite: Rethinking Manufacturing Paradigms for Sustainability Through Cold Spray Additive Manufacturing

Author: Bertrand Jodoin¹

¹ *University Ottawa*

Corresponding Author: bjodoin@uottawa.ca

Cold Spray Additive Manufacturing (CSAM) is a solid-state process poised to redefine how we build and repair critical components. This presentation will take the audience on the remarkable journey of CSAM, from its early development at the intersection of materials science and rocket science to its emergence as a disruptive manufacturing technology. Attendees will gain a clear understanding of the process fundamentals and its unique capabilities. Beyond the hype, the session will explore why CSAM has the potential to become a true manufacturing paradigm shift: enabling rapid production, high-value repair and life extension, processing of difficult-to-manufacture alloys, multi-material design, and more sustainable industrial practices. Discover how this technology could challenge centuries of melt-based manufacturing and help shape the future of advanced production.

Keynote speech / 459

L'ingegnere meccanico: guida strategica per l'evoluzione resiliente nell'era dell'Intelligenza Artificiale

Corresponding Author: stefano.donnarumma@rfi.it

Keynote speech / 458

Plasmare il futuro del volo: prospettive e sfide per l'analisi strutturale e la caratterizzazione dei materiali in Avio Aero

Corresponding Author: marco.allara@avioaero.com

Meccanica dei Materiali / 240

Caratterizzazione di reti a maglia tramite modelli iperelastici anisotropi

Authors: CHRISTIAN IANDIORIO¹; Emanuele Marotta¹; Marco Attilio Poggi¹; Pietro Salvini²

¹ *Università di Roma Tor Vergata*

² *Univ. Roma Tor Vergata*

Corresponding Authors: christian.iandiorio@uniroma2.it, salvini@uniroma2.it, emanuele.marotta@uniroma2.it

Le antenne dispiegabili di grandi dimensioni rappresentano una soluzione tecnologica d'avanguardia per missioni spaziali che richiedono ampie superfici, leggerezza e precisione geometrica. In questo scenario, le reti intrecciate costituiscono l'elemento strutturale portante, grazie alla loro capacità di passare da una configurazione compatta pre-lancio ad una estesa in orbita. Il comportamento meccanico di tali sistemi è tuttavia estremamente complesso, essendo caratterizzato da una marcata anisotropia e da una non linearità irrigidente dettata dalla tessitura dell'intreccio e dalle interazioni di contatto tra i fili che costituiscono la maglia. Risulta quindi di interesse sviluppare modelli costitutivi capaci di descrivere accuratamente la risposta di tali reti su ampi intervalli di deformazione senza ricorrere ad una modellazione alla meso-scala.

Il presente lavoro si focalizza sulla validazione di una procedura sperimentale e numerica finalizzata alla caratterizzazione di queste strutture mediante modelli iperelastici anisotropi. In questa fase preliminare l'indagine è stata condotta su una rete in fibra sintetica; una scelta questa che permette di isolare la non linearità puramente geometrica derivante dalla variazione delle celle romboidali, escludendo temporaneamente gli effetti di plasticità, contatto ed attrito che coinvolgono le maglie metalliche. La robustezza della procedura è stata testata attraverso prove di trazione biassiale eseguite con diversi rapporti di carico lungo le direzioni principali dell'orditura.

Per l'estrazione dei dati è stato impiegato un algoritmo di analisi d'immagine basato sulla FFT bidimensionale, che permette di calcolare le deformazioni medie analizzando la variazione delle periodicità spaziali della trama. I parametri del modello iperelastico sono stati successivamente identificati tramite un algoritmo di ottimizzazione, minimizzando lo scarto tra i risultati sperimentali e le previsioni numeriche sull'intero set di prove. I risultati confermano che tale approccio è in grado di catturare l'anisotropia e la non linearità materiale, rendendo computazionalmente sostenibili le FEA su larga scala necessarie per simulare il dispiegamento di tali antenne.

Meccanica dei Materiali / 416

Recent Advances in Ultra-High Vacuum Shape Memory Alloy Connectors for Particle Accelerators

Authors: Fabrizio Niccoli¹; Emanuele Sgambitterra²; Pietro Magaro²; Carmine Maletta²

¹ *UNICAL*

² *Università della Calabria*

Corresponding Authors: pietro.magaro@unical.it, fabrizio.niccoli@unical.it, carmine.maletta@unical.it, emanuele.sgambitterra@unical.it

Shape memory alloy (SMA)-based pipe coupling systems for ultra-high vacuum (UHV) applications in particle accelerators have been developed at CERN in collaboration with University of Calabria. These SMA couplers are designed for room-temperature UHV systems and offer a compact, rapid, and cost-effective alternative to conventional joining technologies. Owing to their bolt-free configuration, the couplers can be remotely installed and removed through controlled temperature variations, significantly reducing radiation exposure for technical personnel.

The functional performance of SMA joints with different geometries and dimensions has been experimentally assessed in terms of leak tightness, mounting, and dismounting behavior. In parallel, dedicated investigations were conducted at CERN to evaluate the evolution of the mechanical and functional properties of SMAs under particle irradiation.

SMA-based connections enable the realization of highly compact joints that can be assembled and disassembled with minimal or no operator intervention. These unique characteristics distinguish the proposed technology from currently available permanent and removable pipe coupling solutions, such as welded joints and bolted flanges. As a result, SMA couplers offer significant advantages for

several high-technology fields, including high-energy physics, nuclear fusion, aerospace, and oil and gas applications.

Recently, SMA couplers were installed for the first time in an operating accelerator, specifically as bi-metallic titanium/stainless steel transition joints for the vacuum dump windows of the Large Hadron Collider at CERN. Furthermore, a new generation of SMA-based connectors for beam position monitors (BPMs) has been developed, tested, and validated for Elettra Sincrotrone Trieste and Brookhaven National Laboratory, and is currently being further developed for future CERN accelerator facilities involving copper/stainless steel bi-material connections.

Meccanica dei Materiali / 293

Coupled mechanical–diffusion models to understand the role of shot peening in mitigating hydrogen embrittlement

Authors: Chiara Colombo¹; Andrea Tagliaferri¹; Stefano Miccoli¹; Inés Fernandez-Pariente²; Luis Borja Peral²

¹ *Politecnico di Milano*

² *University of Oviedo*

Corresponding Authors: andrea3.tagliaferri@mail.polimi.it, stefano.miccoli@polimi.it, chiara.colombo@polimi.it, inesfp@uniovi.es, luisborja@uniovi.es

Hydrogen embrittlement (HE) represents a major concern for steels, as hydrogen-assisted degradation significantly accelerates crack initiation and propagation. The mechanisms governing HE are multifactorial and remain challenging to fully understand due to the complex interactions between hydrogen and material microstructures. Several strategies are available to mitigate HE, including the use of protective polymeric or metallic coatings such as chromium or copper. However, coating adhesion and mechanical integrity often limit their applicability to load-bearing structures. Within this context, the present work investigates the ability of shot peening (SP) to mitigate HE, as an alternative to coatings. The focus is on the X60 steel, using an experimental approach supported by numerical modelling.

The experimental campaign includes permeation tests, thermal desorption analysis, X-ray diffraction, EBSD characterisation, and Slow Strain Rate Tensile (SSRT) tests performed under continuous hydrogen charging. These tests provide the mechanical, microstructural and trapping parameters needed for modelling, including yield and ultimate strengths, residual stress distribution, diffusion coefficients, trap types, densities and binding energies. Analysis of the load–time curves from SSRTs on unpeened and peened specimens shows that the compressive residual stresses and increased trap density introduced by SP can effectively delay hydrogen-assisted fracture.

In parallel, a fully coupled mechanical–diffusion numerical model was developed in Abaqus, complemented by dedicated routines to simulate hydrogen uptake, stress-assisted diffusion, trapping mechanisms and crack propagation via a cohesive zone layer. The model aims to clarify the evolution of local hydrogen concentration fields, e.g., in the lattice and in the traps, and their accumulation in the fracture region, thereby shedding light on the beneficial mechanisms introduced by SP. Model parameters are calibrated using hydrogen-free mechanical tests and validated against SSRTs performed on unpeened specimens under hydrogen charging. The numerical approach successfully reproduces the mechanical behaviour and crack evolution of these specimens, capturing the progressive hydrogen accumulation at the crack tip and the associated transition to brittle fracture. A subsequent sensitivity analysis is conducted by varying the diffusion coefficient, the imposed surface concentration and trap density.

The SP condition is then simulated by introducing residual stresses, modified boundary concentrations, and a trap distribution consistent with the experimentally observed SP layer. However, this direct implementation did not lead to delayed fracture; instead, the increased trap density and higher imposed concentration resulted in elevated local hydrogen content and premature crack propagation. It was found that only a significant reduction in the lattice diffusivity within the SP layer can realistically capture the decreased hydrogen mobility and produce a delayed fracture behaviour consistent with experimental observations. These results indicate that the beneficial effect of SP is governed primarily by the reduced hydrogen diffusion rate in the peened layer, whereas residual stresses provide only limited protection due to their early relaxation.

In conclusion, the study provides a validated numerical framework for analysing HE mitigation and

identifies key parameters—particularly diffusivity modifications in the SP layer—that control the beneficial impact of shot peening.

Meccanica dei Materiali / 316

Approccio semplificato per l'identificazione della legge di incrudimento post-necking di materiali anisotropi a diverse temperature

Authors: Marta Beltramo¹; Martina Scapin²; Lorenzo Peroni¹

¹ *Politecnico di Torino*

² *Politecnico*

Corresponding Authors: marta.beltramo@polito.it, martina.scapin@polito.it, lorenzo.peroni@polito.it

L'affidabilità delle analisi strutturali agli elementi finiti dipende fortemente dalla disponibilità di modelli di materiale in grado di rappresentare adeguatamente la risposta di interesse nelle condizioni considerate. A questo scopo, i modelli di materiale opportuni vengono calibrati a partire da dati sperimentali, solitamente ottenuti mediante prove di trazione su provini cilindrici. Quando il materiale esibisce un comportamento anisotropo, la caratterizzazione elasto-plastica diventa particolarmente complessa poiché, deformandosi, il provino non mantiene l'iniziale assialsimmetria, ma evolve verso configurazioni non assialsimmetriche con sezioni di forma generalmente incognita a priori.

Il presente studio propone un metodo semplificato per identificare la legge di incrudimento di materiali anisotropi. Esso è stato sviluppato specificatamente per campagne sperimentali per le quali siano disponibili solo provini cilindrici con un unico orientamento e in cui le condizioni di prova consentano un limitato accesso ottico al provino. L'approccio proposto prevede di monitorare la deformazione del provino da due angolazioni diverse e di eseguire una scansione post-mortem su 360°. Ipotizzando che le sezioni trasversali siano ellittiche, i dati forniti dalle due riprese e dalla scansione post-mortem consentono di ricostruire l'evoluzione della forma tridimensionale del provino per l'intera durata della prova. Grazie a questa ricostruzione, è possibile stimare la curva tensione - deformazione true che, come ben noto, rappresenta la legge di flusso plastico del materiale fin tanto che il provino si deforma uniformemente all'interno del tratto utile. In fase post-necking, a causa della triassialità che si sviluppa, la curva true non è più direttamente rappresentativa della legge di incrudimento. Una prima stima della legge post-necking si può ottenere applicando una correzione analitica alla tensione true, basandosi sulla geometria in un intorno della sezione minima per tenere conto della triassialità. Si propone poi di affinare la legge di flusso plastico così ottenuta mediante una procedura ibrida numerico-sperimentale con un'unica iterazione di correzione. Essa si basa sull'assunzione di incrudimento isotropico e su ipotesi semplificative relativamente allo snervamento anisotropo.

La metodologia proposta, viste le ipotesi semplificative su cui si basa, fornisce una prima approssimazione della legge di incrudimento, ma è specialmente indicata per campagne sperimentali in cui non è possibile eseguire prove in diverse direzioni di carico. Inoltre, tale strategia ha il vantaggio di non essere particolarmente onerosa né dal punto di vista sperimentale né da quello computazionale. L'approccio sviluppato viene quindi applicato a una campagna sperimentale su una lega rame-cromo-zirconio, finalizzata alla caratterizzazione dell'incrudimento su un ampio intervallo di temperature, fino a 580 °C. Le alte temperature in questione richiedono, per evitare l'ossidazione, di eseguire le prove in una camera ad ambiente controllato, che limita l'accesso ottico al provino. Tale limite sperimentale, unitamente al fatto che i provini utilizzati nella campagna sperimentale siano ricavati in un'unica direzione della piastra, rende questo caso pratico particolarmente indicato per dimostrare l'applicabilità del metodo.

Meccanica dei Materiali / 328

Thickness Sensitivity Analysis of Nakazima Forming Limit Curves in Aluminum Alloys

Authors: Giacomo Zandri¹; Marco Rossi²; Matteo Anedda²; Maria Caterina Fioretti²; Gianluca Chiappini¹

¹ *Università eCampus*

² *Università Politecnica delle Marche*

Corresponding Authors: m.rossi@univpm.it, giacomo.zandri@studenti.uniecampus.it, gianluca.chiappini@uniecampus.it

An experimental campaign was carried out on an AA5754 aluminum alloy with the aim of evaluating the influence of sheet thickness on the material's formability curve. The acquisition and processing of the strain fields were performed using stereo Digital Image Correlation, employing two synchronized cameras for the three dimensional reconstruction of the displacement field. Data post processing was conducted in accordance with the UNI EN ISO 12004 standard, applying both the position dependent method and the time dependent method for the determination of the forming limit. Based on the experimental results, the constitutive curve of the material was derived and FEM models used for process simulation were subsequently calibrated.

Meccanica dei Materiali / 334

Un modello energetico per descrivere le tensioni di creep all'apice di solidi intagliati

Author: Giulio Lutterotti¹

Co-author: Michele Zappalorto²

¹ *Università degli Studi di Padova*

² *Università degli Studi di Padova- Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali*

Corresponding Authors: giulio.lutterotti@phd.unipd.it, michele.zappalorto@unipd.it

Il presente lavoro propone un approccio innovativo per l'analisi del creep in presenza di variazioni geometriche, che tiene esplicitamente in considerazione la ridistribuzione delle tensioni e della transizione da uno stato di creep localizzato ad uno stato di creep diffuso. La formulazione è sviluppata sulla base del fattore di concentrazione del lavoro specifico e permette di descrivere l'intera evoluzione temporale delle tensioni in corrispondenza dell'intaglio: dalla risposta elastica iniziale, attraverso la fase di creep transitorio, fino al regime stazionario.

L'accuratezza e la robustezza del modello sono validate in modo sistematico mediante numerose analisi agli elementi finiti, considerando un ampio spettro di materiali, geometrie e condizioni di carico.

Questo approccio fornisce agli ingegneri un metodo affidabile per stimare le tensioni massime non lineari senza ricorrere a onerose simulazioni numeriche, anche in presenza di condizioni di carico complesse.

Meccanica dei Materiali / 336

Campi di tensione in prossimità di intagli in condizioni di creep

Author: Giulio Lutterotti¹

Co-author: Michele Zappalorto²

¹ *Università degli Studi di Padova*

² *Università degli Studi di Padova- Dipartimento di Tecnica e Gestione dei sistemi industriali*

Corresponding Authors: michele.zappalorto@unipd.it, giulio.lutterotti@phd.unipd.it

Sebbene l'effetto di intaglio sia stato ampiamente studiato per materiali caratterizzati da comportamento lineare elastico o elasto-plastico, risultano relativamente limitati i contributi dedicati all'analisi dei campi di tensione indotti da variazioni geometriche in corpi intagliati soggetti a creep. In letteratura, infatti, le soluzioni disponibili riguardano prevalentemente solidi con intagli a V a raggio nullo, descritti mediante leggi di creep di tipo power-law (legge di Norton). Per quanto concerne invece gli intagli raccordati, sia a U sia a V, sono disponibili ad oggi solamente pochi approcci che consentono esclusivamente di stimare lo stato tensionale e deformativo all'apice dell'intaglio.

L'obiettivo principale del presente lavoro è colmare tale lacuna proponendo una formulazione semi-analitica, approssimata ma accurata, per la determinazione del campo tensionale in indotto da intagli raccordati in solidi soggetti a creep. In particolare, la soluzione consente di valutare, lungo la bisettrice dell'intaglio, la distribuzione della tensione equivalente e la tensione idrostatica, parametri che governano sia l'accumulo di deformazione viscoplastica sia la riduzione della duttilità del materiale in presenza di uno stato tensionale multiassiale.

La formulazione si basa sulla tecnica di Asymptotic Matching e assume come punto di partenza la soluzione per il campo tensionale elastico sviluppata da Lazzarin e Tovo. Il modello considera esplicitamente un comportamento di materiale di tipo elasto-viscoplastico, risultando quindi adatto alla descrizione dei fenomeni di creep in un'ampia gamma di condizioni.

I parametri fondamentali della soluzione vengono determinati attraverso una procedura analitica, proposta per la prima volta nel presente lavoro. L'accuratezza degli strumenti sviluppati è stata verificata mediante un ampio insieme di simulazioni numeriche condotte tramite il codice agli elementi finiti Ansys, evidenziando un eccellente accordo tra risultati teorici e numerici.

Meccanica dei Materiali / 352

Effetti tridimensionali nell'identificazione della legge coesiva in modo I da prove DCB

Authors: America Califano¹; Gabriele Cricri²; Francesco Penta³; Michele Perrella¹

¹ *Università degli Studi di Napoli Federico II*

² *Università di Napoli Federico II*

³ *Dip. Ingegneria Industriale - Università degli Studi di Napoli Federico II*

Corresponding Authors: michele.perrella@unina.it, penta@unina.it, america.califano@gmail.com

In questo lavoro si presenta una metodologia innovativa per l'identificazione della legge coesiva in modo I di un adesivo strutturale mediante provini Double Cantilever Beam (DCB). L'approccio utilizza misure di spostamento in corrispondenza del fronte di cricca iniziale per una identificazione robusta della relazione trazione-separazione che governa il processo di decoesione (legge coesiva). Con riferimento alla tecnica di identificazione tradizionale mediante derivazione del J integral introdotta da Li e Ward nel 1989 e fino ad oggi utilizzata per l'identificazione della legge coesiva da test DCB, in questo lavoro è proposta una nuova formulazione che tiene esplicitamente conto degli effetti tridimensionali. La tecnica è stata applicata su test virtuali dai quali risulta una identificazione molto più accurata di quella tradizionale.

Meccanica dei Materiali / 354

Danno da impatto in leghe leggere: analisi FEM e prove sperimentali

Authors: Emanuele Vincenzo Arcieri¹; Sergio Baragetti¹

¹ *Università degli Studi di Bergamo - Dipartimento DIGIP*

Corresponding Authors: emanuelevincenzo.arcieri@unibg.it, sergio.baragetti@unibg.it

Il danno da impatto rappresenta un aspetto critico per la sicurezza dei componenti strutturali, poiché genera concentrazioni di tensione, tensioni residue e microdanneggiamenti in grado di ridurre significativamente la vita a fatica. Questo contributo presenta un approccio integrato che combina modellazione agli elementi finiti e prove sperimentali di impatto e fatica, con l'obiettivo di caratterizzare i meccanismi di danneggiamento e la conseguente degradazione delle prestazioni meccaniche in componenti realizzati in lega leggera. I modelli FEM permettono di analizzare la formazione del danno e la distribuzione delle tensioni residue, oltre all'evoluzione temporale dello stato di sforzo sotto carichi ciclici. La campagna sperimentale consente di validare le simulazioni e quantificare l'effettiva perdita di resistenza. L'integrazione tra analisi numerica e sperimentazione fornisce un quadro completo dell'evoluzione del danno, contribuendo allo sviluppo di metodologie predittive più affidabili per la progettazione di componenti resistenti agli impatti.

Meccanica dei Materiali / 357

Investigation of the damage sensing abilities of additively manufactured conductive polymer composites

Author: Flavia Caronna¹

Co-authors: Ludovico Musenich¹; Flavia Libonati¹

¹ *University of Genoa*

Corresponding Authors: flavia.libonati@unige.it, flavia.caronna@edu.unige.it, ludovico.musenich@edu.unige.it

Self-sensing is a functionality of great interest for the development of smart materials. Mechanical self-sensing is intended as both in situ strain monitoring and damage sensing: the first refers to the material's ability to monitor small and/or reversible deformation; instead, damage sensing is the material's intrinsic ability to monitor its mechanical integrity through the detection of damage. Among damage sensing techniques, resistance based measurements enable real time in situ health monitoring by detecting variation in the electrical current flow caused by disruptions in conductive pathways. Conductive polymer composites have been widely studied focusing on strain sensing applications; instead damage sensing, has been less explored for this material class. In this work, the mechanical and electromechanical properties of a piezoresistive 3D printed composite material are characterised to investigate its potential for damage sensing applications. Specifically, polylactic acid (PLA)/carbon black (CB) composite constructs are characterised using electromechanical tests to failure, measuring samples' electrical resistance change during loading. Due to the viscoelastic nature of the material, strain recovery tests are performed to identify the onset of permanent deformation. Cyclic electromechanical tests are also carried out to further investigate the correlation between mechanical damage and electrical resistance evolution, and assess the stability of the electrical network. The results show a strong link between the onset of permanent deformation and transition points observed in the measured electrical signal. Additionally, results of cyclic tests showed no resistance stabilization, and are in agreement with the yield hypothesis. Cyclic tests results also reveal a high sensitivity of the conductive network which is capable to detect and distinguish previously occurred deformation (both reversible and irreversible). Overall, this work demonstrates the damage sensing capabilities of additively manufactured PLA/CB samples. It also presents a novel and readily reproducible characterization framework, with the potential to be extended to a multitude of polymeric materials and types of damage.

Meccanica dei Materiali / 264

Sul comportamento meccanico di strutture cellulari ad architettura esagonale

Author: Andrea Sorrentino¹

Co-authors: Giovanni Bianchi ²; Enrico Radi ¹; Davide Castagnetti ¹

¹ Università di Modena e Reggio Emilia

² Università di Parma

Corresponding Authors: enrico.radi@unimore.it, davide.castagnetti@unimore.it, giovanni.bianchi@unipr.it, andrea.sorrentino@unimore.it

Con il termine strutture cellulari si identifica una famiglia di materiali caratterizzati da una ridotta densità, le cui proprietà meccaniche dipendono non tanto dai materiali costituenti, quanto dalla loro specifica architettura. Dalle geometrie a nido d'ape degli alveari ("*honeycomb*") all'osso trabecolare umano, le strutture cellulari rappresentano uno dei modelli architettonici più efficienti del mondo naturale. Grazie alle loro peculiari proprietà meccaniche, le strutture cellulari trovano ampio impiego, ad esempio, nel campo dell'ingegneria medica per la realizzazione di biomateriali in stampa 3D per la sostituzione ossea.

Questo lavoro investiga il comportamento meccanico di una nuova struttura cellulare a sviluppo planare (2D). La soluzione proposta comprende una cella esagonale con simmetria rotazionale di ordine 2, la quale, attraverso una specifica ripetizione periodica nel piano, genera la macro-struttura. Mediante un modello analitico basato sulla teoria della trave di Eulero-Bernoulli, viene indagata l'influenza dei parametri geometrici sulle proprietà elastiche del reticolo cellulare. Nello specifico, il modello analitico proposto permette di prevedere le proprietà macroscopiche della struttura - per sollecitazioni di trazione e taglio - partendo dall'analisi degli spostamenti nodali dell'unità elementare. I risultati analitici evidenziano la natura anisotropa della struttura la quale, in corrispondenza di specifiche configurazioni geometriche, presenta un valore dei coefficienti di Poisson negativo (i.e., un comportamento auxetico). Le analisi agli Elementi Finiti della struttura, condotte modellando la geometria con elementi trave, hanno confermato le previsioni analitiche sia in termini di coefficienti di Poisson che di caratteristiche meccaniche.

Infine, allo scopo di validare questi risultati, sono stati realizzati in stampa 3D, in materiale polimerico, i prototipi delle configurazioni geometriche più rilevanti. Le prove di trazione *quasi-statica* svolte sui provini hanno mostrato un'ottima corrispondenza tra i risultati sperimentali, il modello analitico e i risultati numerici.

Meccanica dei Materiali / 427

Analisi Metodologica su Modellazione e Caratterizzazione Sperimentale di Materiali a Simmetria Ortotropia Cubica mediante Crystal Plasticity

Authors: Bernardo Disma Monelli¹; Marco Beghini¹; Tommaso Grossi²

¹ Università di Pisa

² Scuola Superiore S. Anna

Corresponding Authors: tommaso.grossi@santannapisa.it, bernardo.disma.monelli@unipi.it, marco.beghini@unipi.it

Obiettivo

L'obiettivo dello studio è proporre un'analisi metodologica su come modellare il comportamento meccanico dei materiali con simmetria ortotropia cubica e identificare le prove necessarie per la loro caratterizzazione. La ricerca si concentra in particolar modo sui modelli di Crystal Plasticity per esplorarne le dirette conseguenze sulla forma delle superfici di snervamento. Viene inoltre valutata l'efficacia delle strategie utilizzate per approssimare le superfici di snervamento mediante l'impiego di modelli fenomenologici macroscopici.

Metodi

La metodologia computazionale si fonda sull'applicazione della legge di Schmid per descrivere la insorgenza dello snervamento nei reticoli cubici a facce centrate (FCC) e cubici a corpo centrato (BCC). Lo snervamento si verifica infatti quando la tensione tangenziale risolta su un sistema di scorrimento, dipendente dal tensore di tensione applicato e dall'orientazione cristallografica, eguaglia la tensione critica (CRSS). L'effettivo politopo di snervamento viene ricostruito tramite un involucro convesso di campionamenti stocastici del dominio tensionale. Per analizzare l'approssimabilità della

superficie di snervamento, i dati del politopo cristallografico vengono utilizzati per effettuare un'interpolazione tramite del criterio fenomenologico quadratico di Hill (1948). La dipendenza direzionale della tensione di snervamento viene confrontata con quella del modulo di Young.

Risultati

Le proiezioni in 3D del politopo esadimensionale all'interno di specifici sottospazi tensionali (es. stato di tensione piano, spazio delle tensioni principali) rivelano una marcata anisotropia e la presenza di spigoli vivi derivanti dall'intersezione di multipli sistemi di scorrimento attivi. L'interpolazione con il criterio di Hill evidenzia discrepanze significative tra l'assunzione di una superficie di snervamento liscia e la reale natura poliedrica della risposta plastica cristallina.

Conclusioni

I modelli di Crystal Plasticity dimostrano che i materiali a simmetria cubica generano superfici di snervamento di elevata complessità geometrica, non catturabili interamente da formulazioni quadratiche standard. Nel caso in cui nel reticolo cristallino vi sia una famiglia predominante di sistemi di scorrimento, si verifica che una sola prova di trazione è sufficiente a determinare la superficie di snervamento.

Meccanica Sperimentale / 241

Caratterizzazione sperimentale e modello parametrico per la valutazione dell'attrito tra fili sottili

Authors: CHRISTIAN IANDIORIO¹; Emanuele Marotta¹; Pietro Salvini²; Valerio Giovannone¹

¹ Università di Roma Tor Vergata

² Univ. Roma Tor Vergata

Corresponding Authors: valerio.giovannone@students.uniroma2.eu, christian.iandiorio@uniroma2.it, emanuele.marotta@uniroma2.it, salvini@uniroma2.it

Le Large Deployable Structures rappresentano una tecnologia chiave per le moderne applicazioni spaziali. In tali sistemi, le reti metalliche intrecciate giocano un ruolo strutturale primario, ma il loro comportamento globale è profondamente influenzato dalle interazioni tra i singoli fili. In particolare, l'attrito e il contatto tra fili sottili determinano la rigidità e la dissipazione energetica durante il dispiegamento, condizionando i carichi trasmessi all'intera struttura.

La caratterizzazione di tale fenomeno risulta complessa a causa delle ridotte dimensioni dei fili, dell'ordine di pochi decimi di micron, e dell'elevato numero di contatti presenti nelle reti metalliche, che raggiunge l'ordine dei milioni per metro quadrato.

Questo lavoro è dedicato alla caratterizzazione sperimentale dell'attrito efficace tra fili sottili mediante una campagna di prove concepita per isolare l'influenza dei principali parametri meccanici e geometrici. È stato sviluppato un dispositivo sperimentale che consente di variare in modo controllato il carico applicato ai fili e l'angolo di abbraccio tra gli stessi.

Le prove sono state condotte su fili di diverso materiale, sia metallici sia polimerici, con diametri dell'ordine del decimo di millimetro. Per ogni configurazione di prova sono stati eseguiti numerosi test di ripetibilità al fine di ottenere stime statisticamente significative del coefficiente di attrito efficace. L'innescò dello scorrimento relativo è stato individuato mediante un sensore accelerometrico, consentendo una rilevazione automatizzata e ripetibile.

I risultati evidenziano che il coefficiente di attrito presenta una dipendenza quasi lineare dal carico applicato e una dipendenza non lineare dall'angolo di abbraccio tra i fili. Ciò suggerisce che l'attrito tra fili sottili non possa essere descritto mediante un coefficiente costante, ma debba essere interpretato come una grandezza dipendente dalla configurazione geometrica del contatto. I risultati ottenuti forniscono una base sperimentale per lo sviluppo di modelli meccanici più realistici dell'attrito tra fili sottili, utili nella modellazione delle reti metalliche intrecciate impiegate nelle antenne spaziali.

Meccanica Sperimentale / 261

Analisi sperimentale delle proprietà meccaniche in magneti legati

a base di FeCoPSi

Authors: Caterina Casavola¹; Gilda Diaferia¹; Vincenzo Moramarco¹; Giovanni Pappaletta¹

¹ *Politecnico di Bari*

Corresponding Authors: giovanni.pappaletta@poliba.it, caterina.casavola@poliba.it, g.diaferia1@phd.poliba.it, vincenzo.moramarco@poliba.it

I magneti permanenti ed i magneti legati rivestono un ruolo centrale nelle applicazioni automotive, laddove siano richieste elevate prestazioni sia magnetiche che meccaniche. Tali magneti sono attualmente costituiti da materiali contenenti terre rare. Appare di enorme interesse, quindi, lo sviluppo di materiali magnetici innovativi privi di terre rare, in grado di sostituire queste ultime in applicazioni automobilistiche.

In questo filone di ricerca si inserisce il presente studio, volto all'analisi delle prestazioni meccaniche di magneti legati costituiti da una polvere magnetica innovativa a base di FeCoPSi, emersa come promettente candidata, in termini di prestazioni magnetiche, ad inserirsi in una fascia di caratteristiche intermedie fra quelle espresse dalle ferriti e quelle del NdFeB.

L'obiettivo del lavoro è quello di analizzare le proprietà meccaniche di magneti legati con due tipi di elastomeri, ovvero la gomma nitrile-butadiene (NBR) ed il polietilene clorurato (CPE). Nello specifico, è stato analizzato il comportamento a trazione consentendo un confronto sia tra i due elastomeri (NBR e CPE) che tra le due polveri (FeCoPSi e ferrite) analizzate. Nel caso dell'analisi dei materiali a base di FeCoPSi sono state altresì analizzate due diverse granulometrie, al fine di trarre informazioni circa l'influenza della dimensione delle particelle sul comportamento meccanico dei magneti legati. I risultati evidenziano come la risposta meccanica dipenda fortemente dalla combinazione legante-filler. Dal raffronto fra i due leganti emerge come i sistemi a base CPE presentino maggiore rigidità e resistenza a trazione rispetto a quelli a base NBR. Inoltre, la riduzione della dimensione delle particelle della polvere FeCoPSi comporta un miglioramento complessivo delle prestazioni meccaniche, in particolare nei sistemi a base CPE, nei quali l'aumento di rigidità e resistenza a trazione è accompagnato da un maggiore allungamento a rottura rispetto ai sistemi a base NBR.

Dal confronto tra le due polveri si evince inoltre un maggiore allungamento a rottura nei materiali a base FeCoPSi rispetto alla ferrite, indicativo di una maggiore duttilità.

Nel complesso, i risultati mettono in evidenza le caratteristiche meccaniche del legante elastomerico, sottolineando il potenziale dei sistemi a base CPE ed evidenziando il ruolo della granulometria della polvere FeCoPSi sulla risposta meccanica.

Meccanica Sperimentale / 311

Valutazione Multi-modale delle Tensioni Residue Indotte da Cold Spray Additive Manufacturing in Provine Multi-materiale Cu-Al₂O₃

Author: Alessandro Tognan¹

Co-authors: Amir Ardeshiri Lordejani²; Vladimir Luzin³; Sara Bagherifard⁴; Enrico Salvati⁵

¹ *Università degli Studi di Udine*

² *POLITECNICO MILANO*

³ *Australian Centre for Neutron Scattering (ACNS) – The Australian Nuclear Science and Technology Organisation (ANSTO)*

⁴ *Politecnico di Milano*

⁵ *University of Udine*

Corresponding Authors: amir.ardeshiri@polimi.it, enrico.salvati@uniud.it, alessandro.tognan@uniud.it, sara.bagherifard@polimi.it, vll@ansto.gov.au

La tecnica *Cold Spray Additive Manufacturing* (CSAM) è un innovativo processo manifatturiero che sfrutta la tecnologia *Cold Spray* (CS), tradizionalmente impiegata per rivestimenti e trattamenti superficiali, per la produzione additiva di componenti strutturali. La CSAM utilizza un gas inerte ad alta pressione per accelerare fino a velocità supersonica le particelle di polveri, che successivamente

impattano e aderiscono a un substrato designato, creando un deposito di materiale. Poiché la deposizione avviene allo stato solido, la CSAM permette di realizzare prodotti con limitate alterazioni termiche, riducendo fenomeni di ossidazione e preservando le proprietà meccaniche dei materiali coinvolti.

Tuttavia, nella CSAM intervengono fenomeni di *peening* causati dall'impatto delle particelle con il materiale progressivamente depositato, che, combinati alla stratificazione del materiale stesso, inducono tensioni residue (TR) nel prodotto finale. Attualmente, la letteratura riporta numerosi studi riguardanti la valutazione delle TR nel processo CS, ma tale aspetto risulta ancora scarsamente studiato nel contesto della CSAM, soprattutto per i sistemi multi-materiale metallo-ceramico.

Per tale ragione, gli autori del presente lavoro caratterizzano le TR in 3 campioni CSAM inizialmente depositati su un substrato in Cu puro, in tre diverse configurazioni: i) deposito in Cu puro; ii) deposito in Cu-Al₂O₃; iii) deposito Cu-Al₂O₃ con successiva rimozione del substrato. La ricostruzione delle TR segue un protocollo multi-modale che impiega due metodi di caratterizzazione indipendenti: la tecnica non distruttiva basata sulla diffrazione neutronica e la tecnica distruttiva *Contour Method*. I risultati sono criticamente discussi in relazione all'origine e alla distribuzione delle TR osservate, evidenziandone il loro impatto sull'integrità strutturale e le implicazioni sull'ottimizzazione del processo CSAM.

Meccanica Sperimentale / 366

Validazione sperimentale di un modello costitutivo a sub-loop per fili sottili in NiTi destinati a strumentazione astronomica di precisione.

Author: Giuseppe De Luca¹

Co-authors: Adelaide Nespoli²; Chiara Colombo³; Edoardo Maria Alberto Redaelli⁴

¹ Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica - Istituto Nazionale di Astrofisica, Osservatorio Astronomico di Brera

² National Research Council (CNR) - Institute of Condensed Matter Chemistry and Technologies for Energy (ICMATE)

³ Politecnico di Milano

⁴ Istituto Nazionale di Astrofisica - Osservatorio Astronomico di Brera

Corresponding Authors: chiara.colombo@polimi.it, giuseppe.deluca@polimi.it, adelaide.nespoli@cnr.it, edoardo.redaelli@inaf.it

L'impiego di attuatori in lega a memoria di forma (SMA), specificamente in Nitinol (NiTi), offre vantaggi unici per la strumentazione astronomica di prossima generazione, grazie all'elevata densità energetica, all'assenza di vibrazioni e alla capacità di operare in condizioni di microgravità ed ambienti estremi. Tuttavia, la natura non lineare e l'isteresi intrinseca del materiale rendono complesso il raggiungimento della massima precisione richiesta per il puntamento e l'allineamento di componenti ottici. Questo studio presenta la caratterizzazione sperimentale di un filo di NiTi da 0,2 mm, finalizzata allo sviluppo di un attuttore lineare ad alta risoluzione.

L'apparato sperimentale è stato configurato per monitorare la risposta meccanica indotta da riscaldamento per effetto Joule. Per studiare l'accuratezza micrometrica, lo spostamento è stato acquisito tramite sensori laser a triangolazione, eliminando contatti meccanici parassiti. Temperatura e resistenza elettrica sono state monitorate in tempo reale per correlare la trasformazione di fase alla deformazione, fornendo la base per futuri algoritmi di controllo self-sensing basati sulla variazione dell'impedenza elettrica.

Un aspetto centrale della ricerca riguarda la ripetibilità ciclica e l'accuratezza nel mantenimento della posizione desiderata. Per ovviare all'allungamento irreversibile (Δl_p) tipico dei primi cicli, il filo è stato sottoposto a un protocollo di condizionamento termomeccanico (training), stabilizzando la microstruttura e minimizzando la deriva del posizionamento sotto carico. Tale processo è indispensabile per garantire l'affidabilità decennale richiesta dalle missioni astronomiche prive di manutenzione.

I dati sperimentali sono stati confrontati con un modello costitutivo unidimensionale (quadro di Paiva et al.), implementato per descrivere accuratamente i sotto-cicli interni (sub-loops) dell'isteresi generati da trasformazioni di fase parziali. La capacità del modello di prevedere la risposta del materiale in funzione della storia termomeccanica è essenziale per implementare strategie di controllo precise con errori di tracking ridotti.

In conclusione, lo studio dimostra che l'integrazione tra un corretto condizionamento del materiale e modelli predittivi avanzati consente un'attuazione micrometrica precisa e ripetibile. Questa metodologia pone le basi per l'impiego di configurazioni antagoniste attive, capaci di movimenti bidirezionali controllati, ideali per le sfide di micro-posizionamento nella strumentazione astronomica d'avanguardia.

Meccanica Sperimentale / 367

Studio numerico-sperimentale del riscaldamento laser localizzato di lamiere in Ti-6Al-4V per il controllo dello stato tensionale residuo

Authors: Angela Cusanno¹; Antonio Piccininni¹; Caterina Casavola¹; Michele Angelo Attolico¹; Vincenzo Moramarco¹

¹ *Politecnico di Bari*

Corresponding Authors: vincenzo.moramarco@poliba.it, caterina.casavola@poliba.it, antonio.piccininni@poliba.it, micheleangelo.attolico@poliba.it, angela.cusanno@poliba.it

Obiettivo. Il riscaldamento laser localizzato costituisce una possibile strategia per indurre, in modo non a contatto e spazialmente controllato, una modifica dello stato tensionale residuo in componenti metallici. Se per le leghe di alluminio tale approccio è già stato ampiamente investigato, per il Ti-6Al-4V le conoscenze disponibili risultano ancora limitate, soprattutto in relazione alla correlazione tra ciclo termico imposto e tensioni residue generate. Il presente lavoro è volto a studiare il comportamento di lamiere in Ti-6Al-4V (grado 5) sottoposte a riscaldamento laser localizzato, con particolare attenzione alla ricostruzione del campo termico transitorio e all'analisi dei campi tensionali residui superficiali indotti dal trattamento.

Metodi. L'attività è stata sviluppata mediante una procedura numerico-sperimentale. Le prove sperimentali sono state condotte su lamiere piane in lega di titanio mediante irraggiamento laser localizzato, acquisendo sperimentalmente l'evoluzione termica superficiale. In parallelo, è stato implementato un modello agli elementi finiti in regime termico transitorio, nel quale la sorgente laser è stata schematizzata come flusso termico superficiale a distribuzione uniforme. Il modello è stato calibrato tenendo conto dei principali parametri che governano la risposta del sistema, tra cui assorbimento efficace della radiazione, condizioni convettive al contorno e presenza di un rivestimento superficiale ad alta emissività. I campi termici così ottenuti sono stati successivamente trasferiti a un'analisi meccanica sequenziale per valutare la distribuzione delle tensioni residue superficiali al termine del ciclo termico.

Risultati. L'analisi ha evidenziato che la risposta termica del materiale è fortemente influenzata dalla corretta definizione delle condizioni di scambio e delle proprietà superficiali, con effetti rilevanti sia sulla temperatura massima raggiunta sia sui gradienti termici locali. In particolare, l'assorbimento efficace e la presenza del rivestimento superficiale sono risultati parametri determinanti nella riproduzione del profilo termico sperimentale. Una volta calibrato, il modello ha consentito di descrivere con coerenza l'evoluzione del campo termico e di ricostruire i corrispondenti campi tensionali residui superficiali, mostrando una stretta dipendenza tra distribuzione di temperatura, severità del gradiente termico e stato tensionale finale. I risultati ottenuti hanno inoltre permesso di individuare le condizioni di processo maggiormente significative ai fini della modulazione dello stato tensionale superficiale.

Conclusioni. Il lavoro conferma l'efficacia di una procedura numerico-sperimentale per lo studio del riscaldamento laser localizzato di lamiere in Ti-6Al-4V e per la successiva analisi delle tensioni residue superficiali indotte. L'impostazione proposta fornisce una base metodologica utile per la definizione di trattamenti laser finalizzati all'ingegnerizzazione dello stato tensionale superficiale delle leghe di titanio e alla futura valutazione del loro impatto sul comportamento a fatica.

Meccanica Sperimentale / 377

Validazione della misura delle tensioni residue, su campioni di

alluminio pallinato, ottenuta con il metodo del foro in combinazione con la tecnica DIC e regolarizzazione L-curve

Authors: ¹ Ciro Santus¹; ¹ Paolo Neri¹; ² Tommaso Grossi²; ³ Alessio Benincasa³; ³ Enrico Boccini³; ³ Simone Gulisano³; Michele Bandini⁴

¹ *DICI - Università di Pisa*

² *TeCIP Institute - SSSA Pisa*

³ *SINT Technology Srl, Firenze*

⁴ *Peen Service Srl, Bologna*

Corresponding Authors: m.bandini@peenservice.it, simone.gulisano@sinttechnology.com, paolo.neri@unipi.it, tommaso.grossi@santannapisa.it, alessio.benincasa@sinttechnology.com, ciro.santus@unipi.it, enrico.boccini@sinttechnology.com

Obiettivi

Il principale obiettivo del presente lavoro è la validazione del risultato di tensioni residue mediante il metodo del foro incrementale (Hole-Drilling Method, HDM) in combinazione con la Digital Image Correlation (DIC), con particolare attenzione allo stato di tensione in superficie e nella prima profondità. Al fine di ottenere questa validazione, la distribuzione di tensione ottenuta è stata confrontata con due misure indipendenti: una misura con il metodo HDM utilizzando la classica rosetta estensimetrica a tre griglie, e con la tecnica dei raggi X che è particolarmente attendibile in superficie.

Metodi

Il risultato di misura mediante la tecnica HDM-DIC è stato ottenuto implementando la procedura del foro incrementale su un centro di lavoro CNC in grado di garantire un controllo micrometrico, e quindi una sufficiente ripetibilità di posizionamento. La procedura incrementale è stata impostata prevedendo passi di 0.1 mm, e per ciascun passo è stato successivamente rimosso l'asse del mandrino della fresa ed è stata posizionata la videocamera DIC con asse coincidente con il foro. La struttura della videocamera è stata ancorata alla parte statorica del mandrino, e quindi è stato possibile sfruttare gli assi controllati della macchina utensile per movimentare sia la fresa stessa, sia la videocamera DIC. Le immagini acquisite sono state successivamente elaborate mediante la tecnica Global Eulerian DIC, che a differenza di un'implementazione classica del DIC, mediante piccoli subset, prevede di utilizzare l'intera immagine come un unico subset e lasciando le tensioni come parametri liberi, avendo noto il problema "diretto" acquisito mediante funzioni di influenza precedentemente calibrate con un modello EF molto accurato. In questo lavoro si presenta un approccio innovativo che parte dalla selezione di un sottoinsieme dei punti che stanno in una zona anulare intorno al foro. Dato che il foro è relativamente piccolo (diametro 2 mm), le zone chiare e scure del pattern DIC tendono ad essere relativamente grandi, in ciascuna foto. Per questo motivo, si propone di considerare solo le zone di pixel con un elevato gradiente di luminosità acquisita, ovvero in pratica i bordi delle macchie, escludendo invece le parti interne delle macchie stesse ed anche le zone bianche. In questo modo, il numero di pixel analizzati si riduce drasticamente pur conservando la parte informativa dell'acquisizione. Un altro aspetto degno di nota è l'applicazione di una procedura per la determinazione del migliore parametro di regolarizzazione, basato sul criterio della L-curve. Secondo questo metodo, si riporta in ascissa la norma dei residui e in ordinate il modulo della curvatura complessiva. Al variare del parametro di regolarizzazione, si ricava una curva ad L ottenendo dei punti asintotici agli estremi. La scelta ottimale del parametro di regolarizzazione si considera come il punto in cui si ha la massima distanza dalla diagonale individuata dai punti alle due estremità della L. Applicando questo criterio, basato sulla L-curve, si è ottenuta una scelta del parametro molto in linea con quello ottenuto semplicemente cercando la minimizzazione della differenza di ricostruzione delle tensioni con il metodo del foro classico, ovvero con la rosetta estensimetrica, avvallando e confermando quindi la scelta di tale parametro con la L-curve. Infine, per quanto riguarda il metodo del foro con rosetta, oltre alla consueta regolarizzazione, nel presente lavoro si applica la correzione numerica dello zero, precedentemente mostrata per altri lavori. Questa correzione consiste nell'introduzione di un piccolo offset alla misura delle profondità di foratura incrementale, andando a minimizzare di nuovo la curvatura complessiva. In questo modo la determinazione dello stato di tensione è sicuramente più stabile e, in linea di principio, tendenzialmente più corretta.

Risultati e Conclusioni

Nel lavoro si mostrano e discutono i risultati di confronto fra queste tre tecniche, con particolare

attenzione alla posizione di profondità nulla e alla prima profondità. Un interessante risultato di confronto è stato ottenuto fra HDM-DIC e HDM con rosetta, in particolare per quest'ultima dopo aver applicato la correzione dello zero della profondità. Inoltre, la misura con i raggi X ha permesso di verificare lo stato di tensione in superficie e la prima derivata. È interessante sottolineare che lo stato di tensione per l'alluminio pallinato considerato nel presente lavoro, ha una profondità efficace di 0.4 - 0.5 mm e il picco di tensione si trova all'incirca a 0.1 mm. Nonostante la distribuzione di tensione sia efficace in profondità relativamente basse (come spesso si osserva per la pallinatura), il metodo HDM-DIC ha permesso di ottenere una buona ricostruzione delle tensioni nonostante il passo di foratura di 0.1 mm relativamente grande.

Metodi Energetici / 288

Metodi termografici rapidi di analisi del comportamento a fatica di provini in AISI 316L prodotti mediante processo L-PBF: i risultati del progetto MADFORLIFE.

Author: Giuseppe Pitarresi¹

Co-authors: Davide D'Andrea ; Francesco Willem Panella ; Giacomo Risitano ²; Mattia Tornabene ¹; Maurizio Calabrese ³; Santi Marchetta ²

¹ *Università degli Studi di Palermo*

² *Università degli Studi di Messina*

³ *Università del Salento*

Corresponding Authors: mattia.tornabene@unipa.it, grisitano@unime.it, francesco.panella@unisalento.it, giuseppe.pitarresi@unipa.it

Il presente lavoro mostra i risultati finali di una campagna sperimentale condotta nell'ambito del progetto di ricerca MADFORLIFE, finanziato dal bando PRIN 2022. In particolare, sono presentati i risultati di test di fatica di tipo step-wise condotti su provini dog-bone prodotti mediante la tecnica di Laser-Powder Bed Fusion, utilizzando l'acciaio AISI 316L. I suddetti test sono stati condotti monitorando la temperatura mediante termocamere ad infrarossi a sensore raffreddato, ed implementando diverse metodologie di analisi che hanno condotto alla valutazione di diverse metriche termografiche, analizzate con l'obiettivo di valutare l'insorgere di una significativa dissipazione di energia meccanica in calore, utilizzabile come indicatore dell'inizio del processo irreversibile di danneggiamento a fatica.

Lo studio ha permesso di raccogliere dati su diverse condizioni di materiale, diversi rapporti di carico, diversi lotti di produzione, diverse metodologie di analisi termomeccanica, e da ultimo consentendo in alcuni casi un confronto inter-laboratorio dei risultati ottenuti, che ha fornito indicazioni sulla riproducibilità di parte dei risultati.

Per quanto riguarda le metodologie di analisi implementate, queste sono di seguito elencate: metodo statico (associato a prove di trazione quasi-statiche), metodo della temperatura di stabilizzazione (anche detto Metodo-Risitano), metodo Q (analisi dell'energia specifica dissipata per ciclo, ottenuta dai gradienti di raffreddamento seguenti lo stop del carico ciclico), e metodi armonici (comprendenti l'analisi dell'ampiezza e della fase della prima e seconda armonica del segnale di temperatura, relative alla frequenza ω di carico ed alla frequenza 2ω).

I suddetti metodi sono stati applicati su due lotti di provini prodotti da diverse aziende. Per il lotto 1 in particolare, sono state testate due condizioni: una ove la build-orientation (BO) è allineata con l'asse del provino di trazione, ed una ove la stessa BO è in direzione trasversale all'asse del provino.

La campagna sperimentale nelle prove di fatica è stata condotta impiegando due rapporti di carico: $R=-1$ ed $R=0.1$.

Il lavoro ha raccolto un numero notevole di indicazioni, e di seguito se ne riassumono alcune tra le più significative:

I provini con build-orientation in direzione trasversale all'asse di carico hanno mostrato una propensione alla rottura fragile per frattura che generalmente ha anticipato l'insorgere di dissipazione. Nei casi in cui si è riusciti a raggiungere l'insorgenza di dissipazione, il valore di ampiezza di carico corrispondente è paragonabile al valore che si è generalmente trovato nei provini con build orientation parallela all'asse di carico. Ciò fa ritenere che tale valore di soglia dell'ampiezza di carico possa rappresentare un bulk fatigue limit del materiale, associabile al limite superiore del dominio di sicurezza fornito dal diagramma di Kitagawa-Takahashi.

Le metodologie che hanno messo meglio in evidenza il valore di soglia di cambio di rateo di dissipazione sono risultati nell'ordine: Metodo Q, Metodo Risitano, Ampiezza della prima armonica. Relativamente agli altri parametri armonici, la Seconda Armonica non ha fornito risultati consistenti, probabilmente a causa del basso aumento di temperatura attivato dalla dissipazione su questo materiale.

Acknowledgements: The present research has received funding from the European Union's Framework Program for Research and Innovation - Mission 4 - Component C2 Investment 1.1 (PRIN - 2022) -project title MADforLIFE, code: 2022JE3LRA_001, CUP: B53D23006070006.

Metodi Energetici / 330

Analisi tramite infrarosso termico della temperatura limite in prove di fatica: dalla proposta del 1986 agli approcci energetici avanzati

Author: Giacomo Risitano¹

¹ *Università degli Studi di Messina*

Corresponding Author: grisitano@unime.it

Nel settembre 1986, al XIV Convegno AIAS di Catania, Curti, La Rosa, Orlando e Risitano introdussero per la prima volta in Italia l'impiego della termografia infrarossa per l'identificazione della temperatura limite in prove di fatica, aprendo la strada a una lettura termo-energetica del danneggiamento a fatica. A quasi quarant'anni da quella intuizione, e nuovamente in ambito AIAS, questo lavoro ne raccoglie l'eredità scientifica con uno sguardo critico e consapevole.

Viene proposta una revisione ragionata delle metodologie termografiche ed energetiche per la valutazione della resistenza a fatica, dai primi approcci centrati sulla temperatura limite fino ai metodi energetici e termografici più recenti. L'attenzione è rivolta in particolare al legame tra dissipazione energetica, evoluzione del danneggiamento e capacità predittiva in termini di vita a fatica e identificazione del limite di fatica.

Un focus specifico è dedicato alle metodologie rapide di prova, che consentono di ottenere curve di Wöhler e parametri caratteristici del materiale in tempi drasticamente ridotti rispetto alle procedure convenzionali, mettendone in luce potenzialità e limiti applicativi.

L'obiettivo del lavoro è fornire un quadro organico dello stato dell'arte, evidenziando continuità, sviluppi e prospettive future di un approccio oggi maturo che, a partire dalla proposta originaria del 1986, si configura oggi come uno degli strumenti particolarmente promettenti per la caratterizzazione a fatica in ambito industriale e di ricerca.

Metodi Energetici / 355

Stima della vita a fatica di provini in PA12 ottenuti per Fused Deposition Modeling: un confronto tra diversi approcci energetici

Authors: Davide D'Andrea^{None}; Santi Marchetta¹; Danilo D'Andrea²; Giacomo Risitano¹; Dario Santonocito³

¹ *Università degli Studi di Messina*

² *Università di Messina - Dipartimento di Ingegneria*

³ *Università di Messina*

Corresponding Authors: dsantonocito@unime.it, santi.marchetta@studenti.unime.it, danilo.dandrea@unime.it, grisitano@unime.it, davide.dandrea@studenti.unime.it

Il presente lavoro si configura come la fase conclusiva del processo di caratterizzazione del PA12 ottenuto mediante diverse tecniche produttive, con l'obiettivo di valutare l'influenza del processo manifatturiero sulle proprietà meccaniche e a fatica del materiale.

A tal fine, è stata condotta una campagna sperimentale comprendente prove uniassiali quasi-statiche, prove a fatica a gradini e ad ampiezza costante. La temperatura superficiale dei provini è stata monitorata tramite una termocamera microbolometrica e successivamente analizzata, al fine di applicare diverse metodologie di indagine sia nel dominio del tempo sia in quello delle frequenze.

Il Metodo Termografico Statico e il Metodo Risitano sono stati precedentemente utilizzati per la caratterizzazione dello stesso materiale ottenuto per processi di stampa da polvere (HP Multijet Fusion, Selective Laser Sintering) e i loro risultati hanno dimostrato congruenza con quanto ottenuto mediante metodi di caratterizzazione standard.

Infine, si propone la stima del parametro Fatigue Fracture Entropy (FFE) calcolato a partire dalla pendenza del tratto iniziale del trend di temperatura, dalla temperatura di stabilizzazione e dal numero di cicli a rottura.

Metodi Energetici / 360

Confronto tra tecniche lock-in e self-referenced nell'analisi della fase del segnale termoelastico in prove di fatica

Author: Giuseppe Pitarresi¹

Co-author: Chiara Colombo²

¹ *Università degli Studi di Palermo*

² *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: chiara.colombo@polimi.it, giuseppe.pitarresi@unipa.it

L'analisi a campo intero del segnale di temperatura mediante termocamere ad infrarossi si è rivelata un approccio molto potente e versatile per il monitoraggio del comportamento termomeccanico di provini sollecitati sia staticamente che a fatica. Una delle principali applicazioni di interesse riguarda le prove di fatica condotte secondo l'approccio stepwise, ove la valutazione di metriche ricavate dal monitoraggio termografico permette di individuare rapidamente i livelli di tensione associati ad un incremento di dissipazione di energia meccanica in calore. Ciò è tipicamente correlato all'incipiente sviluppo di forme di danno irreversibile, sia localizzato che diffuso, che in prospettiva determineranno la rottura a fatica del materiale.

In tale scenario, l'analisi del contenuto armonico del segnale di temperatura, campionato durante l'applicazione ciclica sinusoidale del carico, fornisce l'accesso ad ulteriori informazioni sulla risposta meccanica del provino, depurate dall'influenza di componenti a bassa ed alta frequenza che possono essere legate a fattori ambientali.

In particolare, la prima e la seconda armonica sono le componenti di temperatura estratte rispettivamente alla frequenza w e $2w$, essendo w la frequenza del carico ciclico applicato. Tali armoniche sono in primis correlate all'effetto termoelastico, ma possono essere influenzate dal progressivo insorgere di fenomeni dissipativi, che appunto alterano la risposta termoelastica. Quindi esse hanno il potenziale di fungere da indicatori di un'evoluzione del comportamento termomeccanico del materiale.

Il presente lavoro propone un approfondimento dell'analisi del contenuto armonico con un focus specifico sulla fase della prima e seconda armonica. Innanzi tutto, si propone una panoramica delle tecniche con cui questa può essere misurata. Si metteranno a confronto da un lato le tecniche lock-in, ove la fase è estratta rispetto ad un segnale fisico di riferimento che è campionato in sincrono con la temperatura, e dall'altro le tecniche cosiddette self-referenced, ove il riferimento di fase cambia in base al tipo di filtraggio (ad esempio di tipo DFT) e/o al modello analitico usato per il fitting dei dati. Nel caso di self-referenced analysis, il lavoro valuterà l'abilità di ricostruire un surrogato del segnale di carico sfruttando zone di contorno del provino (edge effects), e metterà a confronto questa soluzione con il segnale di carico acquisito sul canale di ingresso lock-in della termocamera.

Un altro aspetto dell'analisi proposta riguarderà l'analisi del contenuto in frequenza del segnale di riferimento associato al carico, per valutare l'impatto di eventuali seconde armoniche di carico sulla

risposta della seconda armonica di temperatura, andando a confrontare la fase teorica associata alla seconda armonica termoelastica e dissipativa. Infine, sfruttando l'accesso ai metadata dei file termografici tramite i file FLIR-SDK per Matlab, il lavoro propone una procedura di lock-in correlation implementata direttamente in Matlab, con accesso diretto al segnale di carico acquisito fisicamente dall'ingresso lock-in della termocamera. I risultati di tale analisi sono confrontati con quelli forniti dai software FLIR ALTAIR LI e FLIR THESA.

Metodi Energetici / 379

Pulsed Thermography for Quality Control of Internal Channels in Metal Additive Manufactured Fuel Cell Bipolar Plates

Author: Nicola Montinaro¹

Co-authors: Carmelo Mineo²; Ignazio Infantino²; Giuseppe Pitarresi³; Giosuè Giacoppo¹; Orazio Barbera¹; Marco Ferraro¹

¹ *Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia "Nicola Giordano" - Consiglio Nazionale delle Ricerche (ITAE-CNR)*

² *Istituto di Calcolo e Reti ad Alte Prestazioni - Consiglio Nazionale delle Ricerche (ICAR-CNR)*

³ *Università degli Studi di Palermo*

Corresponding Authors: ignazio.infantino@icar.cnr.it, giuseppe.pitarresi@unipa.it, nicola.montinaro@unipa.it, marco.ferraro@cnr.it, carmello.mineo@icar.cnr.it, orazio.barbera@cnr.it, giosue.giacoppo@cnr.it

Metal Additive Manufacturing (MAM) is emerging as a promising technology to produce fuel cell bipolar plates. Unlike traditional multi-layered plates, where ion-exchange pathways and cooling channels need to be assembled from multiple parts, MAM allows the creation of monolithic structures that integrate the H₂ flow fields, structural features and thermal management channels into a single unit. This integration can significantly improve fuel cell performance by enhancing thermal homogenization, lowering ohmic resistance, while also decreasing manufacturing complexity, assembly time, and overall stack height for a given power output. However, the shift toward increasingly complex internal geometries introduces new quality-control challenges, particularly the risk of powder entrapment and partial or complete occlusions inside narrow cooling channels.

To ensure functional reliability and achieve industrial scalability, there is a strong need for robust non-destructive testing (NDT) methods capable of evaluating the internal integrity of thin Selective Laser Sintering-produced bipolar plates. In this context, pulsed active thermography has emerged as a promising technique due to its sensitivity to subsurface thermal discontinuities and its potential for high-throughput inspection.

This study investigates the capability of pulsed thermography to inspect internal channels with transversal section of 1–3 mm located at different depths in SLS-manufactured 4 mm thick bipolar plate. A systematic experimental design explores the effects of channel geometry, occlusion level, and thermographic parameters, as well as multiple post-processing algorithms. Custom-designed benchmark samples with controlled occlusions enable a quantitative evaluation of detection limits in terms of thermal contrast, signal-to-noise ratio (SNR), and spatial resolution.

The results aim to determine the minimum detectable channel size, the maximum depth at which features remain identifiable, and the ability of thermography to discriminate between clean and fully blocked channels. Ultimately, this work contributes to defining an optimized, industrially viable NDT workflow tailored for MAM bipolar plates. By enabling reliable inspection of integrated channel architectures, the proposed method supports the broader adoption of 3D-printed components for next-generation, high-efficiency fuel cell systems.

Metodi Energetici / 390

Mappatura e caratterizzazione vibrotermografica di difetti ingegnerizzati in pannelli compositi termoplastici in CFRP/LM-PAEK

Author: Mattia Tornabene¹

Co-authors: Ettore La Fauci²; Giuseppe Pitarresi¹; Massimiliano Russello³

¹ *Università degli Studi di Palermo*

² *Università degli studi di Palermo*

³ *Aimen*

Corresponding Authors: etttore.lafauci@community.unipa.it, mrussello@aimen.es, mattia.tornabene@unipa.it, giuseppe.pitarresi@unipa.it

La crescente adozione di compositi termoplastici rinforzati con fibra di carbonio in applicazioni strutturali avanzate richiede metodologie di controllo non distruttivo rapide, affidabili e sensibili alla presenza di difetti interni. In tale contesto, il presente lavoro propone l'impiego della vibrotermografia ultrasonica per la rilevazione e la caratterizzazione di difetti artificiali in laminati CFRP con matrice LM-PAEK. Il materiale oggetto di studio è ottenuto a partire da un pannello realizzato in pressa di dimensioni nominali pari a 500 × 500 mm, nel quale sono stati inseriti difetti di diversa geometria, dimensione e profondità durante la fase di laminazione. Il pannello è stato progettato in modo da ricavare 14 provini di dimensioni nominali 230 × 60 × 3 mm, organizzati in due serie speculari da sette elementi ciascuna. In una serie, i difetti sono stati realizzati mediante inserti in tape di Kapton®, mentre nell'altra mediante inserti in tessuto woven in fibra di vetro impregnato con LM-PAEK, così da simulare differenti tipologie di discontinuità interne e differenti risposte termomeccaniche.

Il set-up sperimentale è basato su una sorgente di vibrazione ultrasonica ad alta potenza che, rispetto ai sistemi vibrotermografici convenzionali, consente tempi di eccitazione molto ridotti e livelli elevati di contrasto termico. I parametri investigati includono la pressione, il vertical stroke, il tempo di vibrazione e la distanza tra la zona di applicazione dell'eccitazione e la posizione del difetto. La risposta termica sarà acquisita sia mediante una termocamera raffreddata FLIR SC7000, sia mediante una termocamera bolometrica FLIR A70, con l'obiettivo di confrontarne prestazioni, sensibilità e potenziale applicativo in un contesto di ispezione avanzata. Le prove sperimentali saranno orientate sia alla mappatura dello stato interno del materiale, sia all'identificazione dei parametri di eccitazione più efficaci per incrementare il contrasto tra materiale sano e zone difettose, migliorando al contempo la riconoscibilità univoca della forma, della dimensione e della profondità del difetto.

Oltre all'analisi diretta dei termogrammi, saranno applicate tecniche di post-processing del segnale termico, tra cui Principal Component Analysis (PCA) e Thermal Signal Reconstruction (TSR), al fine di migliorare la qualità delle mappe termiche, ridurre il rumore e incrementare la rilevabilità dei difetti più critici. Per validare i risultati sperimentali ottenuti mediante vibrotermografia, le evidenze emerse saranno confrontate con quelle fornite da tecniche di controllo non distruttivo consolidate, quali le analisi ultrasoniche phased array scan (A B C-scan), nonché mediante pulsed thermography. Il lavoro mira, pertanto, a definire una metodologia sperimentale e di elaborazione dati robusta per la caratterizzazione di difetti artificiali in compositi termoplastici avanzati, fornendo indicazioni utili per lo sviluppo di procedure vibrotermografiche più affidabili, sensibili e supportate da un confronto multimodale.

Metodi Energetici / 397

Termografia a effetto Joule per il controllo di materiali compositi innovativi: un ponte tra SHM e NDT per la caratterizzazione del danneggiamento da impatto

Authors: Ester D'Accardi¹; Tommaso Maria Brugo²; Nicola Dell'Erba¹; Francesco Mongioi²; Tommaso Ternelli²; Umberto Galiotti¹; Andrea Zucchelli²; Davide Palumbo¹

¹ *Politecnico di Bari*

² *Università di Bologna*

Corresponding Authors: francesco.mongioi2@unibo.it, ester.daccardi@poliba.it, a.zucchelli@unibo.it, n.dellerba1@studenti.poliba.it, davide.palumbo@poliba.it, umberto.galiotti@poliba.it, tommaso.ternelli@unibo.it, tommasomaria.brugo@unibo.it

La rilevazione del danno nei compositi in fibra di carbonio (CFRP) è un tema chiave nell'ambito sia dello Structural Health Monitoring (SHM) che delle tecniche di Non-Destructive Testing (NDT). In questo lavoro viene proposto un approccio ibrido basato su termografia attiva con riscaldamento interno per effetto Joule, che consente di superare alcune limitazioni dei metodi tradizionali. Sono stati realizzati cinque provini CFRP e strip in nichel integrate nel laminato [90/0/N/90/0/N/0/90/N/0/90] e uno modificato mediante interlayer di nanofibre di Nylon. In particolare, per una prima analisi preliminare, la configurazione multi-strato modificata ([90/0/N/90/NyNf/0/N/0/ NyNf /90/N/0/90]) è stata progettata per disaccoppiare elettricamente gli strati e favorire, in presenza di danno, percorsi locali di corrente e quindi anomalie termiche localizzate. Ogni provino presenta quattro danneggiamenti da impatto a diversa energia (0.75, 1.5, 3 e 6 J), utilizzati come danneggiamenti reali per la validazione dell'approccio integrato proposto.

Il riscaldamento per effetto Joule e le strip in nichel integrate generano un campo termico "dall'interno", rendendo la tecnica particolarmente adatta a integrazione in ottica SHM. L'acquisizione è stata effettuata con una termocamera microbolometrica Boson, compatta e low-cost, evidenziando la possibilità di sistemi a basso ingombro rispetto alla termografia convenzionale impulsiva con lampade flash e sensori raffreddati, che richiede sorgenti esterne più ingombranti e meno integrabili.

I risultati termografici sono analizzati quantitativamente tramite algoritmi post-processing e indici di contrasto e confrontati con tecniche ultrasonore standard (C-Scan Phased Array), mostrando una buona correlazione nella localizzazione e caratterizzazione dei difetti da impatto.

Il confronto con una tecnica NDT di riferimento e un'ulteriore analisi condotta mediante termografia impulsiva con lampade flash come convenzionale fonte di eccitazione hanno permesso di validare l'approccio proposto, evidenziandone vantaggi e limiti. Il riscaldamento per effetto Joule mostra elevata sensibilità ai difetti legati a variazioni di conducibilità e una buona integrabilità in ottica SHM, con possibilità di stima dei danni da impatto identificati in termini quantitativi. I risultati ottenuti, supportati dal confronto con tecniche ultrasonore, confermano il potenziale dell'approccio Joule come ponte tra SHM e NDT.

Metodi Energetici / 445

Verso una valutazione non distruttiva delle proprietà meccaniche di Ti6Al4V-ELI poroso mediante misure di diffusività termica

Author: Giuseppe Dell'Avvocato¹

Co-authors: Angela Cusanno²; Paolo Bison³; Stefano Rossi³; Pasquale Guglielmi⁴; Anastasia Ciccarella¹; Edoardo Mancini⁵; Giovanni Ferrarini³

¹ Università degli studi dell'Aquila

² Politecnico di Bari

³ Institute of Construction Technologies (CNR-ITC), National Research Council of Italy – 35127, Padua, Italy

⁴ Università degli studi della Basilicata, Engineering Department, Campus di Macchia Romana Via dell'Ateneo Lucano, 10 – 85100, Potenza, Italy

⁵ Università degli Studi dell'Aquila

Corresponding Authors: anastasia.ciccarella@graduate.univaq.it, angela.cusanno@poliba.it, giuseppe.dellavvocato@univaq.it, pasquale.guglielmi@unibas.it, ferrarini@itc.cnr.it, edoardo.mancini@univaq.it, rossi@itc.cnr.it, bison@itc.cnr.it

La presenza di porosità diffusa nelle leghe di titanio può essere sfruttata per ridurre la densità e modulare la rigidità del materiale, ma comporta inevitabilmente una degradazione delle proprietà meccaniche, quali modulo elastico, tensione di snervamento e resistenza ultima a trazione. La quantificazione di tale degrado è generalmente affidata a prove distruttive o ad analisi microstrutturali locali, che risultano difficilmente applicabili come strumenti rapidi di controllo su componenti o semilavorati. In questo lavoro si propone l'impiego della termografia laser pulsata in configurazione a riflessione come tecnica non distruttiva per valutare il degrado meccanico indotto da porosità diffusa in campioni di Ti6Al4V-ELI prodotti mediante percorsi di lavorazione allo stato solido.

L'obiettivo dello studio è verificare se la diffusività termica misurata sperimentalmente possa essere utilizzata come indicatore indiretto, mediato sul volume investigato, della presenza di porosità e

della conseguente riduzione delle proprietà meccaniche. A tale scopo sono stati analizzati campioni di Ti6Al4V-ELI ottenuti mediante Hot Isostatic Pressing e successivamente sottoposti a trattamento di solid-state foaming, in modo da introdurre livelli controllati di porosità diffusa. Le misure termografiche sono state eseguite mediante eccitazione laser localizzata e acquisizione della risposta termica superficiale con una termocamera a infrarossi ad alta frequenza. La diffusività termica nella direzione dello spessore è stata stimata attraverso l'analisi del transitorio termico mediato spazialmente nella regione riscaldata. Successivamente, le stesse aree ispezionate mediante termografia sono state caratterizzate metallograficamente, al fine di determinare il livello medio di porosità e verificare la distribuzione dei pori.

I risultati mostrano che, nella condizione iniziale a bassa porosità, i valori di diffusività termica dei campioni risultano sostanzialmente confrontabili, indicando che livelli sub-percentuali di porosità non producono variazioni apprezzabili con la procedura adottata. Dopo il trattamento di solid-state foaming, invece, si osserva una riduzione chiara e sistematica della diffusività termica, coerente con l'aumento della porosità media misurata mediante analisi metallografica. In particolare, i campioni con maggiore contenuto di porosità mostrano valori inferiori di diffusività, confermando la sensibilità della risposta termofisica alla discontinuità della matrice metallica e alla riduzione dei percorsi efficaci di conduzione termica.

Sulla base dei dati sperimentali è stata proposta una correlazione empirica tra diffusività termica normalizzata e porosità media. Tale relazione è stata poi combinata con correlazioni disponibili in letteratura tra porosità e proprietà meccaniche per la stessa lega e per processi produttivi analoghi, ottenendo un quadro interpretativo che consente di stimare indirettamente modulo elastico, tensione di snervamento e resistenza ultima a partire da misure termografiche non distruttive. L'approccio proposto non sostituisce le prove meccaniche di calibrazione, ma suggerisce la possibilità di utilizzare la diffusività termica come parametro rappresentativo del degrado meccanico medio associato alla porosità diffusa.

In conclusione, la termografia laser pulsata si dimostra una metodologia promettente per la caratterizzazione non distruttiva di leghe di titanio porose, fornendo un'informazione quantitativa legata non solo allo stato termofisico del materiale, ma anche alle sue prestazioni meccaniche attese. Il metodo appare particolarmente interessante per applicazioni di controllo qualità, ottimizzazione di processo e verifica dell'uniformità spaziale delle proprietà su componenti prodotti mediante tecniche basate su polveri o trattamenti allo stato solido. Ulteriori sviluppi saranno orientati all'estensione della calibrazione su un numero maggiore di livelli di porosità e alla validazione mediante prove meccaniche dirette sugli stessi stati del materiale.

Modellazione / 257

Modellazione micromeccanica dello snervamento di una ghisa sferoidale EN-GJS-600-3 in condizioni di carico multiassiale

Authors: Lorenzo Festi¹; Matteo Benedetti¹

Co-authors: Danilo Lusuardi²; Matteo Pedranz²; Michele Dallago¹; vigilio fontanari¹

¹ Università di Trento

² Fonderie Ariotti

Corresponding Authors: michele.dallago@hotmail.it, matteo.benedetti@unitn.it, danilo.lusuardi@fonderieariotti.com, lorenzo.festi@unitn.it, matteo.pedranz@fonderieariotti.com, vigilio.fontanari@unitn.it

1. Obiettivo

L'oggetto del lavoro è lo studio del comportamento a snervamento della ghisa sferoidale EN-GJS-600-3 in condizioni di multiassialità degli sforzi. Il comportamento meccanico del materiale è influenzato dalla microstruttura, specialmente dalle proprietà della matrice e dalla presenza dei noduli di grafite. Benedetti et al. [1] hanno condotto prove statiche biassiali in condizioni di sollecitazione assiale e torsionale combinata, rilevando un'asimmetria nella resistenza allo snervamento in trazione e compressione. Inoltre, hanno dimostrato come il criterio di Von Mises non sia adatto per questo materiale, il cui snervamento è meglio descritto da criteri per materiali compositi.

In quest'ottica, le simulazioni micromeccaniche sono un potente strumento per studiare l'influenza della microstruttura sul comportamento macroscopico. Questo lavoro ha quindi come

obiettivo lo sviluppo di un modello FEM micromeccanico adatto a spiegare il comportamento a snervamento in regimi di carico multiassiale, confrontando i risultati numerici con i valori sperimentali riportati in Benedetti et al. [1].

2. Metodi

Il modello FEM realizzato consiste in una cella cubica contenente 5 noduli di grafite disposti casualmente. L'omogenizzazione è stata condotta applicando condizioni al contorno periodiche e i carichi concentrati sono stati applicati ai relativi nodi fittizi. La matrice perlitica al 90% è stata modellata con un modello elasto-plastico di Chaboche. La correttezza dei parametri è stata verificata simulando una prova di microdurezza Vickers, confrontando i valori e la forma dell'indentazione con una prova sperimentale. Ai noduli di grafite è stato assegnato un modello elastico lineare, investigando diverse proprietà elastiche, sia isotrope che anisotrope. L'interfaccia grafite-metallo è stata modellata con una coppia di contatto unilaterale con attrito infinito. Prima dell'applicazione del carico, è stato simulato uno step di raffreddamento, in modo da riprodurre lo stato di tensioni residue che si sviluppa attorno ai noduli a causa dei diversi coefficienti di dilatazione termica di metallo e grafite. Dalle simulazioni sono state ottenute le curve sforzo-deformazione in diverse condizioni biassiali, e i risultati sono stati confrontati con gli esperimenti riportati in Benedetti et al. [1]. Dalle simulazioni sono state estratte le curve sforzo-deformazione e lo snervamento è stato valutato con il metodo dell'offset sulla deformazione plastica equivalente di Von Mises.

3. Risultati

Dalle diverse simulazioni biassiali è emerso che il contatto unilaterale è in grado di captare accuratamente l'asimmetria trazione-compressione nella resistenza snervamento del materiale. Infatti, l'interfaccia tra nodulo e matrice viene aperta sotto carichi di trazione e quindi la rigidità del nodulo diventa trascurabile. Al contrario, aumentando l'intensità dello sforzo principale di compressione, il contatto viene chiuso e, grazie alla impossibilità di compenetrazione tra i corpi, il nodulo riesce a reggere una frazione del carico applicato, scaricando la matrice e aumentando lo snervamento macroscopico.

L'influenza delle proprietà della grafite sul dominio di snervamento cresce aumentando l'intensità dello sforzo principale di compressione, marcando come i noduli sono responsabili dell'asimmetria. La minore differenza con i risultati sperimentali viene rilevata modellando la grafite come un solido elastico anisotropo, simulando la struttura a "cipolla" del nodulo. Inoltre, le tensioni residue derivate dal raffreddamento hanno l'effetto di ritardare il distacco dei noduli dalla matrice, ritardando leggermente lo snervamento e migliorando l'accuratezza del modello.

4. Conclusioni

Lo studio fornisce un modello FEM micromeccanico adatto a rappresentare il comportamento di una ghisa sferoidale sotto carichi multiassiali. I principali risultati sono riportati di seguito:

- La deviazione dal criterio di Von Mises risiede nella natura eterogenea della microstruttura della ghisa sferoidale.
- I noduli di grafite e il comportamento dell'interfaccia sono responsabili dell'asimmetria nella resistenza allo snervamento.
- Il modello di grafite anisotropa, in combinazione con le tensioni residue, fornisce la migliore accuratezza con i risultati sperimentali.

Riferimenti

[1] M. Benedetti, T. Curtolo, M. Dallago, V. Fontanari, D. Lusuadi, Yield and fracture loci for a ductile cast iron EN-GJS-600-3 under biaxial stresses, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 45 (2022) 783–800. <https://doi.org/10.1111/ffe.13633>.

Modellazione / 278

Numerical Assessment of OFHC Cu Creep in the Demonstration Fusion Power Reactor (DEMO) Divertor Monoblock

Author: Matteo Bruno¹

Co-authors: Gabriele Crici¹; Jeong Ha You²; Nicolas Mantel³; Roberto Citarella⁴

¹ *Università di Napoli Federico II*

² *Max Planck Institute for Plasma Physics*

³ *United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA)*

⁴ *Università degli Studi di Salerno*

Corresponding Author: matteo.bruno@unina.it

One of the technological challenges associated with a power plant-scale fusion reactor is heat exhaust, namely, removal of large amount of heat generated by particle bombardment (and nuclear heating). It is divertor targets that are in charge of heat exhaust. The targets must withstand high heat fluxes, neutron irradiation and cyclic variation of thermal stresses. Such combined loads can lead to inelastic deformation, damage and eventually failure after long-term operations. Interaction of plastic fatigue, creep and nuclear swelling is thought to be a driving mechanism of damage. Present contribution presents a FEM-based computational study to investigate creep/swelling behaviour of a typical divertor target component, namely ITER-like tungsten monoblock, under reactor-relevant operation conditions. The aim is to assess the impact of creep on the stress states and the structural integrity of the monoblock-type target. To this end, an experimentally calibrated time-hardening model was adopted to simulate the primary and secondary creep in the Cu interlayer. Swelling was considered for the tungsten armor blocks. The main results indicate that creep in the copper interlayer is primarily activated during transient plasma phases. However, the accumulated strain remains limited and stabilizes over successive cycles. Consequently, its effect on stress distribution and pipe fracture behavior is negligible.

Modellazione / 281

Rate-Dependent Spherical and Conical Indentation of soft materials with application to biomechanics

Authors: Aleligne Yohannes Shiferaw¹; Michele Tricarico¹; Luciano Afferrante¹; Antonio Papangelo¹

¹ *Politecnico di Bari*

Corresponding Authors: luciano.afferrante@poliba.it, antonio.papangelo@poliba.it, michele.tricarico@poliba.it, a.shiferaw@phd.poliba.it

Indentation testing is widely used for characterizing the mechanical behavior of soft solids, including elastomers, polymers, hydrogels, and biological tissues. In these materials, the response is strongly time-dependent, with the measured force depending on both the imposed displacement and the complete deformation history. Constitutive interpretation of indentation data becomes particularly challenging when relaxation processes span many decades of time. In such cases, conventional rheological models with only a limited number of discrete relaxation times, such as SLS (Standard linear solid), often fail to capture the broad relaxation spectrum adequately.

The present work adopts a Modified Power-Law (MPL) relaxation kernel, which offers a compact yet highly flexible description of broad-spectrum viscoelasticity while remaining analytically tractable in hereditary integral formulations. This constitutive model supports a unified viscoelastic contact-mechanics framework for rigid spherical and conical indentation of a linear viscoelastic half-space. For monotonic ramp loading, both spherical and conical problems are solved analytically via the Lee–Radok viscoelastic correspondence principle, employing the classical Hertz and Sneddon elastic solutions as reference kernels. The resulting hereditary integrals provide closed-form force–displacement–time expressions involving Gauss hypergeometric functions for both geometries. A normalized apparent indentation modulus is defined by inverting the elastic contact relations, serving as a compact descriptor of the evolving viscoelastic modulus. The governing equations are recast in dimensionless form, highlighting the essential competition between imposed loading rate and intrinsic relaxation dynamics. A dimensionless loading-rate parameter controls the balance between instantaneous elastic response and viscoelastic dissipation, while the MPL decay exponent governs the breadth and persistence of the relaxation spectrum. Smaller exponent values slow kernel decay, sustaining higher forces and apparent moduli over longer loading durations.

Analytical predictions are validated against axisymmetric finite-element simulations using PLANE183 elements and surface-to-surface contact pairs, reproducing the expected physical trends for both

spherical and conical indentation under ramp loading. Higher loading rates shift the response toward the glassy limit with elevated forces and moduli, while slower rates allow greater relaxation toward the rubbery limit. The material exponent modulates relaxation behavior, with lower values preserving elevated response across a wider range of rates.

The analysis is further extended to triangular loading–unloading cycles with identical loading and unloading rates for both indenter geometries. In both cases, the loading stage follows directly from the Lee–Radok formulation, whereas the unloading stage is computed through an approximate Lee–Radok-type split-history treatment of the viscoelastic relaxation integral after the instant of maximum indentation depth. The resulting formulation captures hysteresis, unloading-force relaxation, and detachment trends for both spherical and conical indentation within a common hereditary framework.

Hence, this work address the most common loading conditions in indentation tests of soft materials, commonly adopted for mechanical characterization of biological tissues. It provides a unified viscoelastic contact-mechanics framework that brings together spherical and conical indentation, ramp and triangular histories, closed-form analytical solutions, and finite-element verification under one constitutive description based on the modified power-law model, which has been proved to be an excellent approximation of the material response spectrum over wide range of excitation frequencies. The framework captures the coupled influence of loading rate, unloading rate, and relaxation spectrum on the force response, apparent indentation modulus, and hysteresis. This MPL-based approach provides a robust platform for the mechanical characterization of soft materials and biological tissues, enabling reliable inverse identification of constitutive parameters from rate-dependent indentation experiments.

Modellazione / 284

Modello di adesione reversibile per materiali viscoelastici

Authors: America Califano¹; Gabriele Cricri²

¹ *University of Salerno*

² *Università di Napoli Federico II*

Corresponding Author: america.califano@gmail.com

La presente attività propone un modello semi-analitico per lo studio dell'adesione reversibile tra un indentatore sferico rigido e un insieme di fibrille viscoelastiche, una configurazione di interesse sia per i sistemi di adesione biologica sia per superfici ingegnerizzate bio-ispirate. Il comportamento meccanico delle fibrille è descritto mediante un modello di solido viscoelastico standard (SVS), che consente di catturare in modo accoppiato la risposta elastica e gli effetti dipendenti dal tempo. Il problema di contatto è formulato considerando l'avvicinamento della sfera rigida al substrato fibrillare e assumendo condizioni di contatto adesivo reversibile. Il modello permette di derivare espressioni in forma chiusa per la forza di distacco (pull-off) in funzione della frequenza e dell'ampiezza delle vibrazioni, evidenziando il ruolo delle proprietà viscoelastiche del materiale e dei parametri di carico dinamico nel controllo dei processi di distacco. La validazione del modello è effettuata mediante simulazioni agli elementi finiti (FEM), che mostrano un buon accordo con le previsioni analitiche, confermando l'efficacia dell'approccio proposto nel descrivere i meccanismi di adesione e distacco assistiti da vibrazioni senza ricorrere a ipotesi eccessivamente restrittive.

Modellazione / 292

Modellazione viscoplastica per materiali in alta temperatura in condizione di test di tipo termo-meccanico e service-like

Author: Alessandro Guazzini¹

Co-authors: Bernardo Disma Monelli¹; Federico Bucciarelli²

¹ *Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale, Università di Pisa*

² *Nuovo Pignone Tecnologie s.r.l.*

Corresponding Authors: alessandro.guazzini@phd.unipi.it, bernardo.disma.monelli@unipi.it, federico.bucciarelli@bakerhughes.com

A seguito dell'incremento della richiesta di energia, i componenti operanti negli impianti sono soggetti a cicli di temperatura e stress sempre più severi. Le moderne tecniche per la simulazione agli elementi finiti di questi componenti, geometricamente complessi, spesso si affidano a modelli datati e conservativi. Scopo dell'attività di ricerca è quindi quello di definire un modello viscoplastico in grado di riprodurre il comportamento meccanico di un acciaio da alta temperatura in casi di creep-fatica ed in condizioni sia isoterme che non. In particolare, verrà mostrata la capacità del modello nel riprodurre il comportamento del materiale in caso di fatica termomeccanica (prove in-phase ed out-of-phase) ed anche di prove di tipo service-like, quest'ultime mirate a riprodurre i picchi di stress derivanti dai transitori termici. Infine, verrà proposto un modello di danno per l'interazione creep-fatica e la sua implementazione con il modello costitutivo precedentemente esposto.

Modellazione / 300

Investigation of the mechanical behaviour of additively manufactured lattice structures using Smart Design algorithms

Author: Santi Marchetta¹

Co-authors: Davide D'Andrea²; Dario Santonocito²; Giacomo Risitano¹; Danilo D'Andrea³

¹ *Università degli Studi di Messina*

² *Università di Messina*

³ *Università di Messina - Dipartimento di Ingegneria*

Corresponding Authors: santi.marchetta@studenti.unime.it, davide.dandrea@studenti.unime.it, dsantonocito@unime.it, danilo.dandrea@unime.it, grisitano@unime.it

Lattice structures are a class of geometries with highly customizable mechanical properties. The resulting products are characterized by low weight and high mechanical performance, finding increasing applications in several fields such as automotive and biomedical engineering. Furthermore, their complex geometries make them ideal for advanced additive manufacturing. This work aims to investigate the behavior of lattice structures fabricated via Fused Deposition Modeling (FDM). The study is carried out using a custom Smart Design algorithm that integrates finite element analysis, machine learning techniques, and optimization strategies. This framework allows for the rapid exploration of various geometric parameter combinations, quantifying the influence of each input on an objective function, which accounts for both mechanical and energy parameters, to identify the optimal solution. Finally, the results are validated through experimental tests on lattice specimens.

Modellazione / 413

Valutazione numerica dei carichi di sloshing in un serbatoio criogenico per LH₂ mediante approccio FEM-SPH

Authors: Alessandro De Luca¹; Giuseppe Lamanna²; Donato Perfetto³; Francesco Caputo⁴

¹ *Università della Campania Luigi Vanvitelli, Dipartimento di Ingegneria*

² *Università degli Studi della Campania "Luigi Vanvitelli"*

³ *Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli*

⁴ *Università della Campania Luigi Vanvitelli*

Corresponding Authors: alessandro.deluca@unicampania.it, giuseppe.lamanna@unicampania.it, francesco.caputo@unicampania.it, donato.perfetto@unicampania.it

Il presente lavoro descrive un'attività di simulazione numerica finalizzata alla valutazione dei carichi dinamici indotti da fenomeni di sloshing in un serbatoio criogenico per idrogeno liquido, LH₂, soggetto a condizioni di carico rappresentative di scenari di crash secondo CS-25. L'obiettivo dello studio è analizzare l'effetto dell'interazione fluido-struttura sulla risposta dinamica del serbatoio, con particolare riferimento alla distribuzione delle pressioni idrodinamiche sulle pareti, all'evoluzione temporale dei carichi locali e globali e allo stato tensionale della struttura. Le simulazioni sono state eseguite in ambiente Abaqus Explicit mediante un approccio numerico accoppiato FEM-SPH. La struttura del serbatoio è stata discretizzata mediante elementi finiti, mentre il dominio fluido è stato modellato attraverso la formulazione Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH. L'attività prevede il confronto tra due configurazioni numeriche: serbatoio pressurizzato privo di liquido interno e serbatoio contenente LH₂ rappresentato mediante particelle SPH. Il confronto consente di quantificare il contributo specifico del fluido alla risposta strutturale e di distinguere gli effetti associati alla sola pressurizzazione interna da quelli indotti dallo sloshing in condizioni di crash. I risultati ottenuti permettono di identificare le aree maggiormente sollecitate, valutare l'incremento dei carichi dinamici dovuto alla presenza del liquido e fornire una base metodologica per la definizione dei carichi di progetto e per le successive verifiche strutturali di serbatoi criogenici per applicazioni aeronautiche.

Modellazione / 414

Structural Integrity Assessment of Flexible Aerospace Baffles Comparing Quasi-Static and 2-Way FSI Methods

Authors: Francesco Serraino¹; cristiano biagioli²

Co-authors: Luca Cerniglia¹; Valerio G. Belardi¹; Francesco Vivio¹

¹ Università degli Studi di Roma Tor Vergata

² Università Degli Studi di Roma Tor Vergata

Corresponding Authors: vivio@uniroma2.it, biagioli@ing.uniroma2.it, francesco.serraino@uniroma2.it, valerio.belardi@uniroma2.it, luca.cerniglia@uniroma2.it

The management of liquid sloshing remains a critical challenge in aerospace engineering, where fuel oscillations can significantly impair the stability and structural integrity of space vehicles. While rigid baffles are traditionally employed to mitigate these effects, flexible Anti-Sloshing Devices (ASDs) offer a promising alternative. They can potentially enhance energy dissipation through fluid-structure interaction (FSI) while granting substantial mass reductions.

However, these performance and weight benefits come with a trade-off: a highly non-linear dynamic response that complicates the design process. Because the baffles deform under fluid forces, predicting flow-induced deformations and internal stresses is paramount to ensure the structural integrity and optimal performance of flexible ASDs. This work outlines a comprehensive design workflow for flexible ASDs in cylindrical tanks.

Leveraging the classic axisymmetric Kirchhoff-Love plate theory for the structural modeling and linear potential flow theory for the fluid domain, the primary objective is to propose a simplified, reliable structural model for the preliminary design phase of both the baffle device and its connection system to the LOX/LH₂ tank walls.

To conduct a conservative structural assessment, the fluid-structure interaction is initially decoupled using a quasi-static approach. The maximum hydrodynamic pressure generated by the sloshing fluid, calculated based on classical rigid-baffle theories, is applied statically to the undeformed structure. This fail-safe approximation assumes a worst-case loading scenario, intentionally neglecting the mitigating structural inertial effects and the potential load-relief provided by the baffle's flexibility.

Therefore, a core objective of this study is to systematically investigate whether these established rigid-baffle pressure distributions can be reliably extended to the preliminary structural sizing of flex-

ible ASDs. Consequently, the proposed simplified approach is benchmarked against high-fidelity, 2-way FSI numerical simulations of free-decay sloshing problems, which serve as a robust comparison baseline. A parametric study is conducted by varying the material properties, specifically Young's modulus (E) to cover a wide spectrum of flexibility levels, and the baffle immersion depth relative to the free surface.

Crucially, the investigation encompasses and compares both fully submerged and non-submerged baffle configurations. For the non-submerged cases, the study explicitly investigates the structural integrity of the component under wave impact loads occurring beneath the baffle. Indeed, when the liquid free surface is close to the ASD, wave amplitudes exceeding the clearance result in direct liquid splashing against the structure. As demonstrated by the CFD results, this impact produces a highly localized pressure pulse with an amplitude significantly exceeding the standard maximum slosh pressure, characterized by a time scale much shorter than the primary slosh period. While slosh loads periodically excite the baffles at low frequencies, splash-loads impose abrupt, severe stresses that must be rigorously accounted for to prevent localized structural failure.

Modellazione / 417

Modellazione equivalente di flessibili metallici multistrato mediante omogeneizzazione numerica

Author: Andrew Ruggiero¹

Co-authors: Fabio Calacci²; Gabriel Testa³; Gianluca Iannitti⁴; Liuzzi Daniele²; Simone Dichiaro²

¹ *Università di Cassino e del Lazio Meridionale*

² *AVIO SpA*

³ *Università degli Studi di Cassino*

⁴ *Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale*

Corresponding Authors: simone.dichiaro@avio.com, g.iannitti@unicas.it, gabriel.testa@unicas.it, a.ruggiero@unicas.it, fabio.calacci@avio.com, daniele.liuzzi@avio.com

Nei sistemi aerospaziali, le linee flessibili metalliche sono ampiamente utilizzate per il trasporto di fluidi in condizioni operative severe, caratterizzate da pressione interna, vibrazioni e vincoli geometrici complessi. La modellazione strutturale di tali componenti risulta particolarmente sfidante, poiché il comportamento meccanico deriva dall'interazione tra un'anima corrugata sottile e una treccia metallica esterna, con fenomeni accoppiati tra deformazioni assiali, flessionali e torsionali, nonché dalla presenza di contatti distribuiti tra gli strati.

Il presente lavoro propone una metodologia per la determinazione di proprietà equivalenti di rigidità da impiegare in modelli strutturali semplificati di tipo monodimensionale, idonei alle analisi globali di sistema. L'approccio si basa su una modellazione numerica locale non lineare, in cui una cella rappresentativa del flessibile viene analizzata includendo gli effetti di contatto, attrito e pressione interna. Le proprietà equivalenti vengono ottenute mediante tecniche di omogeneizzazione basate sull'applicazione di condizioni al contorno macroscopiche sulla cella, tali da riprodurre stati di deformazione elementari (trazione, torsione, flessione e taglio), consentendo la ricostruzione della matrice di rigidità generalizzata del sistema. Particolare attenzione è rivolta agli accoppiamenti tra i diversi modi deformativi e all'influenza della pressione interna sul comportamento del flessibile.

Le proprietà così ottenute sono destinate all'implementazione in modelli FEM industriali mediante elementi beam o bushing equivalenti. La metodologia prevede, infine, una fase di validazione sperimentale su componenti reali, finalizzata alla calibrazione e alla verifica dei modelli numerici.

Modellazione / 419

An entropy-driven approach to thermo-mechanical degradation in metallic structures

Author: Marcello Antonio Lepore¹

¹ *Università degli Studi di Trieste*

Corresponding Author: marcello.lepore@dia.units.it

Metallic structures subjected to severe thermal transients experience irreversible thermo-mechanical effects driven by localized plastic deformation and transient heat transfer. Conventional strain-based damage models are effective in describing ductile degradation driven by plastic flow, although they do not explicitly account for the thermodynamic nature of irreversible dissipation. In the present work, an entropy-based framework for thermo-mechanical degradation assessment is proposed and implemented within a finite element environment through a user-defined subroutine. The formulation combines entropy generation associated with plastic dissipation and conductive heat transfer, allowing both mechanical and thermal irreversible processes to be considered within a unified non-linear framework. Temperature-dependent constitutive parameters and toughness-related quantities are included to describe the progressive degradation of the material during transient thermo-mechanical loading. The methodology is applied to a radiation-cooled metallic thruster subjected to severe thermal shock. The comparison with a conventional strain-based damage model shows a close agreement in regions dominated by plastic deformation, whereas the entropy-based formulation remains sensitive to irreversible effects associated with thermal gradients in regions with limited plasticity. The proposed formulation provides a physically consistent and computationally efficient tool for thermo-mechanical degradation assessment in high-temperature metallic structures.

Modellazione / 425

GNSS: A Graph Neural Network Surrogate for Guided Wave Propagation in Beams

Author: Alessandro Lucchetti¹

Co-authors: Francesco Cadini²; Luca Lomazzi¹; Marco Giglio¹

¹ *Politecnico di Milano*

² *Politecnico di Milano; Department of Mechanical engineering*

Corresponding Authors: marco.giglio@polimi.it, luca.lomazzi@polimi.it, alessandro.lucchetti@polimi.it, francesco.cadini@polimi.it

The simulation of high-frequency wave propagation in structural components is computationally demanding due to the need for fine spatial and temporal discretizations. Traditional numerical methods such as Finite Element Analysis (FEA) are accurate but prohibitively slow for applications requiring real-time response or extensive parametric studies, such as Structural Health Monitoring (SHM). Graph Neural Networks (GNNs) have emerged as promising surrogate models for physical simulations.

In this work, we present the Graph Network-based Structural Simulator (GNSS), a locality-preserving GNN framework designed as a fast surrogate model for structural dynamics. GNSS leverages the encode-process-decode paradigm and combines three technical innovations tailored to wave-dominated problems: (i) a local-coordinate formulation for node kinematics, which avoids catastrophic cancellation in finite-difference velocities; (ii) a sign-aware acceleration loss, which reduces phase errors in long rollouts; and (iii) a wavelength-informed connectivity radius, which aligns the message-passing neighborhood with physically meaningful interaction scales.

The proposed model is validated on a case study involving guided wave propagation in a beam excited by a 50 kHz Hanning-modulated pulse. We evaluate on a reflection-free interior region of the beam, isolating wave kinematics from boundary effects. Results show that GNSS accurately predicts the transient response over hundreds of timesteps, preserving both the carrier frequency and the wave-packet group velocity, and generalizes to unseen excitation locations along the beam. Compared with an explicit finite element baseline, GNSS achieves substantial inference speedups while maintaining high spatial and temporal fidelity. These findings highlight GNSS as a competitive alternative for the efficient simulation of wave-dominated structural problems.

Modellazione / 451

Semi-Analytical Modelling of Non-Conformal Fretting Contacts Using an Elastic Half-Plane Approach

Authors: Stefano Zanchi¹; Mario Lavella¹

¹ *Università degli Studi di Bergamo, Dipartimento di Ingegneria Gestionale, dell'Informazione e della Produzione (DIGIP)*

Corresponding Author: mario.lavella@unibg.it

Friction-based joints are widely employed in mechanical systems and may experience fretting damage when subjected to dynamic loading conditions. Fretting occurs when two contacting bodies undergo oscillatory relative motion with an amplitude small compared to the contact size along the sliding direction. Depending on the contact conditions, fretting damage may evolve in partial-slip or gross-slip regimes, typically associated with different dominant damage mechanisms, such as fretting fatigue, wear, and oxidation. The severity of the damage is governed by process parameters, including displacement amplitude, normal load, and temperature, whose combined effects are commonly correlated with the energy dissipated during the loading cycle.

This work presents a semi-analytical elastic half-plane model for the analysis of non-conformal contacts under combined normal and tangential loading. Both contacting bodies are locally modeled as isotropic linear-elastic half-planes, while the coupling between the normal and tangential problems is described through Coulomb friction. The proposed approach enables the computation of normal pressures, tangential tractions, and fretting hysteresis loops associated with partial-slip and gross-slip conditions.

Compared to fully numerical approaches, the semi-analytical formulation provides an efficient framework for the simulation of fretting contact problems, representing a suitable basis for the development of more comprehensive fretting damage models, including wear, fretting fatigue, and oxidation phenomena. In the reference sphere-on-plane configuration, the predicted contact stresses and hysteresis cycles are compared with the classical Hertz and Mindlin–Deresiewicz analytical solutions. The comparison demonstrates that the proposed model accurately reproduces the analytical distributions of normal pressure, tangential traction, and hysteresis response, confirming its effectiveness for the simulation of fretting contact problems.

Keywords 1: Fretting contact
Keywords 2: Semi-analytical model
Keywords 3: Elastic half-plane
Keywords 4: Contact stresses
Keywords 5: Hysteresis loops

Modellazione / 303

Sviluppo di un framework per prevedere e ottimizzare la riparazione di difetti mediante Cold Spray

Authors: Alessandro Mariani¹; Roberta Falco¹; Sara Bagherifard¹

¹ *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: roberta.falco@polimi.it, alessandro3.mariani@polimi.it, sara.bagherifard@polimi.it

In un contesto industriale caratterizzato da macchinari sempre più complessi e catene di approvvigionamento spesso incerte, garantire la continuità operativa è diventato un imperativo strategico. In questo scenario, il Cold Spray si sta affermando come una tecnologia chiave per il ripristino dimensionale e strutturale di componenti critici. A differenza delle tecniche di riparazione convenzionali,

il Cold Spray risolve alla radice il problema delle distorsioni termiche usando un approccio di deposizione allo stato solido. Sebbene la natura stessa della tecnologia ponga sfide rilevanti in termini di precisione geometrica e automazione, questo lavoro delinea un percorso verso la sua piena maturità operativa. Integrando simulazioni con reti neurali e metodi di ottimizzazione, questo studio definisce un framework di riparazione che introduce per la prima volta la digitalizzazione sistematica e la previsione accurata della forma dei depositi. Inoltre, per garantire la flessibilità necessaria alle diverse condizioni dei difetti, è stata implementata un'innovativa strategia di controllo del percorso basata su meccanismi di navigazione bio-ispirati. Il modello, validato sperimentalmente su difetti rappresentativi, ha dimostrato un'elevata ripetibilità e precisione geometrica. I risultati raggiunti aprono la strada della riparazione tramite Cold Spray a un utilizzo industriale su larga scala.

Modellazione / 368

An Integrated Multiphysical Framework for the Design, Optimization and Experimental Assessment of Aerospace Metamaterials

Authors: Andrea Ciula^{None}; Emanuele Vincenzo Arcieri¹; Pierluigi Fanelli²; Francesco Desana³; Valerio G. Belardi⁴; Sergio Baragetti¹; Francesco Vivio⁴

¹ *Università degli Studi di Bergamo - Dipartimento DIGIP*

² *Tuscia University*

³ *University of Tuscia, Italy*

⁴ *Università degli Studi di Roma Tor Vergata*

Corresponding Authors: valerio.belardi@uniroma2.it, emanuelevincenzo.arcieri@unibg.it, sergio.baragetti@unibg.it, pierluigi.fanelli@unitus.it, francesco.desana@unitus.it, andrea.ciula@unitus.it, vivio@uniroma2.it

The growing demand for lightweight, efficient and functionally integrated aerospace structures is driving increasing interest in architected metamaterials. In this context, the present work summarizes the outcomes of a completed research project aimed at developing a multiphysical approach to the design of aerospace-oriented lattice metamaterials. The proposed framework combines theoretical modelling, parametric numerical simulation, multi-objective optimization, additive manufacturing and experimental assessment within a unified research workflow. The project addressed the interaction between structural, thermal, electromagnetic and fluid-structure-related aspects, with the goal of supporting the design of metamaterial solutions characterized by tailored performance and enhanced application potential. Different lattice concepts and geometrical parameterizations were investigated through computational tools specifically developed or adapted for the project, enabling systematic exploration of morphology, response relationships and supporting the identification of promising design strategies under different performance requirements. The numerical activity was complemented by the fabrication of representative prototypes and by experimental testing campaigns aimed at assessing the mechanical response of selected configurations and at comparing experimental evidence with simulation results. This integrated approach made it possible to progress from the definition of reference analytical and numerical models to the consolidation of a design-oriented methodology, thus providing a coherent basis for future application-driven developments. Overall, the project highlights the potential of multiphysical and optimization-based methodologies for the development of advanced metamaterial structures for aerospace applications. The results provide a scalable framework for bridging conceptual design, numerical assessment and experimental investigation, and open the way to further developments focused on robust design criteria, multifunctionality and industrial implementation.

Modellazione / 331

Sviluppo di metodi per la manutenzione predittiva di polverizzatori agricoli trainati soggetti a carichi in esercizio

Authors: Andrea Ruffin¹; Filippo Coppola²; Giovanni Meneghetti²

¹ *Maschio Gaspardo S.p.A.*

² *Università degli Studi di Padova*

Corresponding Authors: filippo.coppola@phd.unipd.it, aruffin@maschiogaspardo.com, giovanni.meneghetti@unipd.it

In questo lavoro sono stati sviluppati metodi per l'applicazione di strategie di manutenzione predittiva su barre irroratrici di polverizzatori agricoli trainati soggette a carichi di esercizio. Un'analisi dei modi e degli effetti di guasto (FMEA) ha evidenziato che il cedimento strutturale rappresenta la modalità di guasto predominante; di conseguenza, particolare attenzione è stata rivolta alla stima in tempo reale della vita a fatica residua delle giunzioni saldate della barra. A tale scopo, una semi-barra in versione da 12 metri di lunghezza è stata strumentata con opportuni sensori accelerometrici ed estensimetrici. Tale sensorizzazione ha consentito di registrare, durante manovre eseguite sia su tracciato normato secondo ISO22763 sia su campo agricolo, le accelerazioni lineari e angolari al punto di interfaccia con la macchina trainata e le tensioni nominali e strutturali in prossimità delle giunzioni saldate di interesse. Successivamente, un modello transiente agli elementi finiti sviluppato in ambiente Ansys Mechanical 2025R2, composto da un modello principale 2D con elementi BEAM188 cubici a 2 nodi e da un sottomodello 3D con elementi tetraedrici a 10 nodi, è risultato in grado di stimare con sufficiente precisione le deformazioni strutturali acquisite quando alimentato con le sole accelerazioni lineari e angolari registrate, con tempi di calcolo inferiori ai tempi di misura. La validazione del modello è stata condotta in termini di danneggiamento, ricavando gli spettri di carico numerici e sperimentali tramite algoritmo di conteggio cicli tipo Rainflow (ASTM E1049-85) e confrontando gli indici di danneggiamento secondo Palmgren-Miner per ciascuna acquisizione. Questo lavoro consentirà di implementare strategie di manutenzione predittiva attraverso il monitoraggio del danneggiamento accumulato dalle saldature della barra mediante l'impiego di soli due accelerometri triassiali commerciali installati su ciascuna macchina.

Modellazione / 370

An Iterative Meshless Method for 2D Contact Problems Based on Radial Basis Functions

Authors: Andrea Chiappa¹; Corrado Groth¹

¹ *Università di Roma Tor Vergata*

Corresponding Authors: corrado.groth@uniroma2.it, andrea.chiappa@uniroma2.it

Collocation-based meshless methods, and in particular the Kansa method, are increasingly adopted for the numerical solution of problems arising in physics and engineering. Their main advantage lies in the absence of a predefined mesh, allowing the solution to be constructed over a scattered set of nodes. This feature simplifies preprocessing, enhances flexibility in handling complex geometries, and enables straightforward evaluation of the solution at arbitrary locations within the domain. Moreover, meshless approaches are naturally suited for adaptive refinement and scalable implementations.

In this work, we propose an iterative computational framework for the solution of two-dimensional contact problems based on a meshless collocation scheme employing radial basis functions within the Kansa formulation. Contact phenomena are characterized by strong nonlinearities and inequality constraints, which pose significant challenges to conventional discretization techniques. The proposed approach addresses these issues through an iterative strategy designed to enforce contact conditions while preserving the flexibility and accuracy of the underlying meshless approximation. The mathematical formulation of the method is first outlined, including the governing equations, the radial basis function approximation, and the treatment of boundary and contact conditions. The algorithmic structure of the iterative procedure is then described in general terms. Finally, the approach is applied to representative benchmark problems in two-dimensional elasticity. Preliminary numerical results are presented to illustrate the feasibility of the proposed method, and its performance is discussed in comparison with established numerical techniques.

Modellazione / 373

A study on the effects of the Quantum Computer measurement errors on the Quantum Finite Element Algorithm performance

Author: Emanuele Petriconi¹

Co-authors: Claudio Sbarufatti ¹; Marco Giglio ¹

¹ *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: emanuele.petriconi@polimi.it, marco.giglio@polimi.it, claudio.sbarufatti@polimi.it

The rise of Quantum Computing (QC) is opening the floor to many novel engineering applications. One of the most promising applications in mechanical engineering is the Quantum Finite Element Method (QFEM), which leverages quantum technology to solve large-scale models that would be computationally prohibitive for classical solvers. However, practical use of QFEM is strongly influenced by the intrinsic uncertainty of quantum measurements, which introduces stochastic variability in the computed results. This study investigates the impact of quantum measurement uncertainty on the performance and reliability of a QFEM formulation specifically developed for structural mechanics simulations of beam elements. A quantum-inspired model has been implemented using parameterised quantum circuits to evaluate stiffness matrix assembly and solution accuracy under different levels of measurement precision. The analysis quantifies how shot noise, the number of qubit measurements, and circuit depth affect the global convergence, energy norm error, and computational efficiency of the resulting structural model. Results show that beyond a certain uncertainty threshold, the accuracy degradation becomes negligible, indicating a strong relation between algorithmic robustness and hardware-imposed measurement limits. The findings highlight the importance of uncertainty-aware algorithm design in hybrid quantum-classical solvers for engineering applications. This research provides initial insights into the trade-off between quantum noise and model fidelity, contributing to the broader understanding of quantum numerical mechanics and guiding future development of scalable QFEM implementations.

Modellazione / 338

Electrostatic Particle Acceleration via LINAC: Enabling Next-Generation Solid-State Material Deposition

Author: Monil Mihirbhai Thakkar¹

Co-authors: Amir Ardeshiri Lordejani ²; MARIO GUAGLIANO ¹

¹ *POLITECNICO MILANO*

² *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: mario.guagliano@aiasnet.it, monilmihirbhai.thakkar@polimi.it, amir.ardeshiri@polimi.it

Cold spray has emerged as a promising technique for surface metallization and coating, and has been explored for near-net-shape manufacturing applications. The conventional cold spray process faces limitations, including rough surfaces, limited feature resolution, and high energy consumption due to accelerating particles to supersonic velocities using heated gas. To address these challenges, this study proposes a particle acceleration method using an electric-field-based linear accelerator (LINAC) system.

In the proposed approach, charged particles are accelerated through a series of aligned electrodes to form a LINAC configuration. Particles released from a charging source undergo sequential acceleration stages, during which the electric potential energy is converted into kinetic energy. As the particles traverse the drift tube electrodes, the applied voltage at each stage is dynamically switched to ensure continuous acceleration of the particles across the stages. A key challenge in this system is determining the optimal switching time of the electrode potentials to maximize the energy transfer and particle velocity.

To assess the feasibility of this concept, a simulation framework was created to examine how variations in the particle mass, charge, and velocity affect the acceleration efficiency. The findings reveal that an increase in the variability of the particle properties significantly diminishes the effective acceleration of the particle beam. A key observation from this study is that maintaining a constant charge-to-mass ratio alleviates the negative impact of parameter variability, resulting in acceleration profiles that closely resemble ideal scenarios. This insight allows the use of simplified fixed-switching schemes, thereby reducing the system complexity and cost.

In addition to particle acceleration, this study investigates particle–substrate interactions in the proposed electrostatic framework. Unlike conventional cold spray, where particles are uniformly heated by gas flow, the proposed method introduces electrostatic effects owing to the particle charge. As charged particles approach the substrate, image charge formation induces an additional electric field, resulting in further acceleration. At sufficiently high field strengths, field emission occurs, leading to localized thermal effects at the particle–substrate interfaces. This localized heating enhances particle deformation upon impact, which is critical for solid state bonding.

By utilizing experimentally derived charge-to-mass ratios, the temperature increase due to field emission was estimated and integrated into thermomechanical single-particle impact finite element simulations. The findings revealed that the particle temperatures reached approximately 500 K before impact. Comparative simulations demonstrated higher equivalent plastic strain (PEEQ) values than the impacts at room temperature, indicating enhanced deposition efficiency and bonding quality in the proposed system. Overall, this study illustrates the feasibility of an electrostatically driven particle acceleration and deposition process using a LINAC architecture, presenting a potential pathway toward energy-efficient, high-resolution additive manufacturing.

Modellazione / 344

Modello analitico per la valutazione degli effetti flessionali locali in gusci conici composti flangiati

Authors: Valerio G. Belardi¹; Francesco Vivio¹

¹ *Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa, Università degli Studi di Roma Tor Vergata*

Corresponding Authors: valerio.belardi@uniroma2.it, vivio@uniroma2.it

Il ritmo con cui l'industria aerospaziale è chiamata a sviluppare nuovi prodotti è in costante aumento, a causa della crescita dei programmi di ricerca, del numero di aziende del settore e della competizione sempre più intensa. Di conseguenza, la fase di progettazione, in particolare quella concettuale, che comporta il confronto tra configurazioni alternative al fine di individuare la soluzione ottimale nel compromesso tra numerosi vincoli progettuali, richiede tempi di gestione estremamente ridotti. In questo contesto, sebbene i metodi numerici, quali il metodo degli elementi finiti, abbiano raggiunto elevati livelli di affidabilità e diffusione, i metodi analitici mantengono vantaggi significativi in termini di rapidità di applicazione ed accuratezza dei risultati.

Tra le geometrie più comuni nelle strutture aerospaziali vi sono i gusci conici in materiale composito, impiegati in lanciatori e veicoli spaziali come payload adapters, interstadi o intertanks. Il comportamento globale di queste strutture può essere descritto mediante la teoria di membrana; tuttavia, le zone di collegamento tra guscio e flange non possono essere modellate con tale approccio a causa delle discontinuità geometriche presenti. In queste regioni si sviluppano effetti flessionali locali necessari a garantire la compatibilità degli spostamenti tra guscio e flange. Sebbene tali effetti decadano rapidamente allontanandosi dalla discontinuità, essi determinano i livelli tensionali più elevati della struttura e risultano quindi fondamentali per la scelta della laminazione e dello spessore del guscio. Per tali motivi, il presente lavoro propone uno strumento progettuale basato su una soluzione analitica originale della teoria flessionale per gusci conici composti. La metodologia si fonda sulle equazioni di equilibrio e compatibilità del guscio ed è risolta mediante il metodo delle differenze finite del quarto ordine. Integrando tale soluzione con quella di una piastra circolare in materiale composito utilizzata per rappresentare la flangia, è possibile valutare accuratamente le tensioni e gli spostamenti locali. I risultati ottenuti sono stati validati mediante confronto con modelli agli elementi finiti, mostrando un'elevata accuratezza su differenti configurazioni geometriche e stratifiche.

Modellazione / 375

Experimental and Numerical Evaluation of Magnetorheological Fluid-Actuated Metamaterials

Author: Alex Mazza¹

Co-authors: Francesco Cadini²; Luca Lomazzi³

¹ *Politecnico di Milano*

² *Politecnico di Milano; Department of Mechanical engineering*

³ *Politecnico di Milano; Department of Mechanical Engineering*

Corresponding Authors: francesco.cadini@polimi.it, luca.lomazzi@polimi.it, alex.mazza@polimi.it

Smart metamaterials, featuring dynamically tunable mechanical properties, represent a promising frontier in structural engineering and advanced robotics. Tunable properties can be introduced through several approaches, e.g., by designing geometric instability mechanisms, by embedding actuators within metamaterials, or by pre-tensioning lattice metamaterial struts.

In this context, this study presents the design and characterization of a class of smart lattice metamaterials where traditional struts are replaced by hollow beams filled with a magnetorheological (MR) fluid. The MR fluid is leveraged to achieve dynamically tunable and fully reversible mechanical response by applying an external magnetic field, which is used to modify the fluid's yield stress.

Multiphysics finite element simulations were carried out in COMSOL 6.4 to characterize the magneto-mechanical behavior of the lattice metamaterial subjected to large deformation. The numerical results were validated through experiments conducted on real prototypes, allowing for a direct comparison between empirical evidence and computational predictions.

The results bring evidence that filling lattice metamaterial beams with MR fluids enables dynamically tunable and fully reversible mechanical response. This class of metamaterials paves the way for intelligent structures with custom mechanical properties and design, and will be further studied to research any self-sensing capabilities to design autonomous metamaterials.

Modellazione / 407

Metamaterial-Based Passive Noise Control for the Piaggio P.180 Cabin

Author: Carmen Brancaccio¹

Co-authors: Felicia Palmiero²; Giorgio Travostino²; Giovanni Fasulo¹; Mattia Barbarino³; Roberto Citarella¹

¹ *Università degli Studi di Salerno*

² *Piaggio Aerospace*

³ *Italian Aerospace Research Centre (CIRA)*

Corresponding Authors: gfasulo@unisa.it, gtravostino@piaggioaerospace.it, cbrancaccio@unisa.it, m.barbarino@cira.it, fpalmiero@piaggioaerospace.it

ABSTRACT

This work investigates the potential of acoustic metamaterials to outperform a conventional sound insulation package on the Piaggio P.180 aircraft, in terms of vibroacoustic attenuation at the blade pass frequency (BPF) and its harmonics, under strict constraints on mass and available installation volume. The approach integrates analytical metamaterial design and sizing, impedance extraction, and fully coupled structural-acoustic simulations of the aircraft, using a high-fidelity P.180 finite element (FE) model. Propeller tonal excitation is computed by computational fluid dynamics (CFD) simulations at cruise, mapped onto the aircraft FE mesh and solved by MSC Nastran. The metamaterial treatment is represented through its impedance, introduced as an acoustic boundary condition, applied to frequency-dependent fluid acoustic absorber element adjacent to cabin skin surfaces.

Metamaterials performance, in terms of cabin sound pressure level, is benchmarked against the conventional insulation package.

Keywords: Cabin noise; turboprop; blade pass frequency; acoustic metamaterials; impedance boundary condition; MSC Nastran.

MOTIVATION AND CONTEXT

Enhancing aircraft efficiency and safety remains a priority for manufacturers, while passenger comfort has gained equal relevance in a competitive aviation market. Cabin comfort substantially shapes passengers' overall experience and influences airline preferences. Positive comfort perceptions can increase the likelihood of selecting the same aircraft or airline again [1]. Among comfort drivers, noise, vibration, and harshness (NVH) plays a central role because prolonged exposure to elevated tonal and broadband noise can lead to annoyance and dissatisfaction.

From a physical standpoint, cabin noise results from complex vibroacoustic interactions between elastic structures and surrounding fluids, characterized by mutual coupling between structural vibration and acoustic pressure fields [2,3]. These interactions are governed by geometry, boundary conditions, material properties, and frequency-dependent excitation, and may involve resonance and energy dissipation mechanisms. Consequently, high-fidelity numerical approaches such as the finite element method (FEM), often complemented by other deterministic or hybrid strategies, are typically required to predict and mitigate cabin noise [4–6].

Turboprop cabins pose specific challenge, in particular, tonal components at the propeller blade pass frequency and its harmonics can dominate perceived annoyance, while long wavelengths at low frequency make passive insulation packages thick and heavy. Traditional solutions can be effective but may conflict with stringent mass and packaging constraints, particularly when targeting the first BPF. This motivates the exploration of acoustic metamaterials, engineered subwavelength structures that can exhibit tailored effective impedance or enhanced absorption around target frequencies, as candidates for lightweight, compact passive control of tonal cabin noise.

MATERIALS AND METHODS

This study exploits a comprehensive coupled structural-acoustic FEM model of the Piaggio P.180 passenger cabin [7]. The model adopts a hybrid discretization strategy (three-dimensional fluid elements for the cabin volume, shell elements for skins/panels and one-dimensional elements for stiffeners and reinforcements) to capture the structural complexity needed for low- and mid-frequency response prediction. Starting from a baseline white body fuselage, internal structural components and relevant connections were added to enable realistic transmission path, supporting localized as well as global assessments of cabin noise and vibration.

In the present work, the FE model is employed as the simulation backbone for evaluating passive treatments. This ensures that any performance difference between a metamaterial sandwich structure and a conventional one is attributed primarily to treatment physics and integration strategy, rather than to changes in the aircraft-level numerical representation.

The objective is to quantify the noise reduction improvement by replacing a conventional passive sound insulation package with a metamaterial-based treatment on the P.180 fuselage, focusing on the propellers BPF and its harmonics, under cruise operating conditions. The comparison is conducted at aircraft level and includes cabin sound pressure level (SPL) reduction, as well as areal mass and thickness/space occupancy versus the conventional package.

Metamaterials comprise periodic unit cells that exhibit resonance-driven effective properties over targeted bands. When coupled to a host plate, stepped or lumped resonators can precisely control and manipulate sound waves through specific geometric configurations, arrangements, and material combinations, improving sound transmission loss (STL) in the targeted region.

An analytical model [8,9] is used to set the unit-cell resonator parameters (mass, stiffness, damping, and geometric descriptors) that satisfy aircraft constraints (areal mass and thickness) while targeting the BPF and its harmonics. The analytical model is based on an impedance approach for plate sound transmission. In this framework, STL behavior is interpreted through the relationship between the plate's dynamic impedance and the acoustic loading. Locally resonant attachments modify the effective impedance of the host structure, producing resonance and antiresonance features that can either enhance or degrade STL.

Propeller noise at cruise is computed by CFD and post-processed to obtain the complex acoustic pressure field associated with the first BPF and its harmonics. The resulting pressure distribution is interpolated onto the aircraft FE mesh. This mapping preserves both amplitude and phase information, which is essential for accurate tonal response prediction and for capturing interference patterns and structural-acoustic coupling effects.

To this purpose, DAREA and DPHASE Nastran cards will be used to properly allocate the forces

while preserving both amplitude and phase information. The fully coupled analysis is automatically set up through inclusion of the ACMODL card within the Nastran bulk data input file. A direct frequency response solution is then performed on the coupled structural-acoustic model to compute the cabin pressure response at the tone.

For the benchmark configuration, the baseline P.180 equipped with a conventional sound insulation package is investigated by using the same impedance modelling approach.

Beyond performance comparison, this paper provides a practical toolchain that starts from the analytical metamaterial synthesis, proceeds through impedance identification in a standardized numerical setting, and ends with a full aircraft vibroacoustic assessment under simulated tonal loading. This enables systematic exploration of trade-offs among attenuation, mass, and thickness, supporting the development of next generation passive cabin noise control solutions for turboprop aircraft.

CONCLUSIONS

This work proposes a comprehensive methodology to assess metamaterial-based passive noise treatments on the Piaggio P.180, targeting the first propeller BPF and its harmonics. The method integrates constrained analytical design, frequency-dependent numerical impedance extraction, and fully coupled aircraft structural-acoustic simulations, driven by CFD-derived tonal excitation. Performance is benchmarked against a conventional insulation package in terms of cabin sound pressure level reduction, mass and packaging constraints.

REFERENCES

- [1] Pennig, S., Quehl, J., & Rolny, V. (2012). Effects of aircraft cabin noise on passenger comfort. *Ergonomics*, 55(10), 1252-1265.
- [2] Dhandole, S. D., & Modak, S. V. (2007, February). Review of vibro-acoustics analysis procedures for prediction of low frequency noise inside a cavity. In *Proceeding of the 25th Conference & Exposition on Structural Dynamics*, Orlando, Florida. US.
- [3] Morand, H. J. P., & Ohayon, R. (1995). *Fluid-structure interaction: Applied numerical methods* (pp. 1-224). Wiley.
- [4] Hughes, T. J. (2003). *The finite element method: linear static and dynamic finite element analysis*. Courier Corporation.
- [5] Kirkup, S. (2019). The boundary element method in acoustics: A survey. *Applied Sciences*, 9(8), 1642.
- [6] Culla, A., Fregolent, A., & Milana, S. (2016). Vibroacoustic optimization using a statistical energy analysis model. *Journal of Sound and Vibration*, 375, 102-114.
- [7] Brancaccio, C., Fasulo, G., Palmiero, F., Travostino, G., & Citarella, R. (2025, August). A Finite Element Modeling Approach for Assessing Noise Reduction in the Passenger Cabin of the Piaggio P. 180 Aircraft. In *Acoustics* (Vol. 7, No. 3, p. 54). MDPI.
- [8] Liu, Z., Rumpler, R., & Feng, L. (2018). Broadband locally resonant metamaterial sandwich plate for improved noise insulation in the coincidence region. *Composite structures*, 200, 165-172.
- [9] Xiao, Y., Wen, J., & Wen, X. (2012). Sound transmission loss of metamaterial-based thin plates with multiple subwavelength arrays of attached resonators. *Journal of Sound and Vibration*, 331(25), 5408-5423.

Modellazione / 350

Applicazione di modelli costitutivi per analisi termomeccaniche viscoplastiche a componenti di turbine a vapore

Author: Gabriele Tarica¹

Co-authors: Alessandro Guazzini²; Bernardo Disma Monelli²; Federico Bucciarelli³

¹ University of Pisa

² Università di Pisa

³ Baker Hughes, Nuovo Pignone S.r.l.

Corresponding Authors: gabriele.tarica@phd.unipi.it, federico.bucciarelli@bakerhughes.com, alessandro.guazzini@phd.unipi.it, bernardo.disma.monelli@unipi.it

Con questo studio abbiamo confrontato due differenti tipologie di analisi utilizzabili per la verifica di resistenza a fatica e creep di componenti di turbine a vapore. Nell'ambito di energy transition

e di un mercato energetico sempre più competitivo, la valutazione della resistenza a creep fatica di componenti di turbomacchine continua ad essere un tema di ricerca di rilevanza industriale. In prima analisi abbiamo utilizzato il procedimento definito dalla normativa ASME Boiler and Pressure Vessel Code, che considera un'analisi disaccoppiata di creep e fatica. Questa procedura prevede l'esecuzione di un'analisi elastica agli elementi finiti del componente che permette di ridurre il costo computazionale in modelli geometrici con elevato numero di nodi. Tuttavia, il risultato è eccessivamente cautelativo in quanto sottostima la vita del componente e non considera possibili interazioni tra i fenomeni di creep e fatica. Abbiamo poi sviluppato altri modelli costitutivi agli elementi finiti per eseguire un'analisi termomeccanica viscoplastica, con creep e fatica accoppiati, e valutarne così le influenze reciproche. La ricerca ha mostrato una maggiore precisione nella valutazione della vita dei componenti, ma con un inevitabile maggiore costo computazionale dovuto all'implementazione di modelli non lineari. Con questo studio presenteremo le differenze principali tra i modelli utilizzati e metteremo a confronto i risultati delle due analisi.

Modellazione / 412

Non-linear frictional contact mechanics of visco-hyperelastic materials

Authors: Michele Loglisci¹; Guido Violano¹; Nicola Menga¹; Luciano Afferrante¹

¹ *Politecnico di Bari*

Corresponding Authors: m.loglisci2@phd.poliba.it, luciano.afferrante@poliba.it, nicola.menga@poliba.it, guido.violano@poliba.it

Contact mechanics represents a topic of primary importance in mechanical engineering and tribology, with direct implications for the design and analysis of critical components in several application fields, including aerospace, automotive, and biomedical engineering. The increasing use of soft materials, such as those employed in sealing systems, tires, and soft robotics devices, leads to operating conditions characterized by large deformations and displacements, which cannot be adequately described within the framework of linear elasticity. In this context, the presence of friction and the viscoelastic behavior of the material contribute to making the contact mechanical response significantly more complex.

The present study addresses the contact problem in soft materials within a theoretical and numerical framework capable of capturing its strongly nonlinear and dissipative nature. Particular attention is devoted to the combined effects of interfacial friction conditions, large deformations, and viscoelastic material behavior, investigated through a finite element model developed to assess the contribution of the main parameters governing the system response. In particular, the contact between a rigid sphere and a soft visco-hyperelastic substrate is considered.

A relevant result is the emergence, during a loading-unloading cycle, of a non-adhesive pull-off force. This phenomenon is attributed to the combined action of friction, viscoelasticity, and geometric nonlinearities, and is found to strongly depend on the loading rate and on the material properties. The study further shows that the contact problem is intrinsically time- and path-dependent, and that friction contributes significantly to hysteretic losses, which are further amplified by geometric and constitutive nonlinear effects.

Modellazione / 353

Numerical and Experimental Deformation Analysis of an EPP Component Subjected to Mechanical Loads and Temperature Gradients

Authors: Carlo Sabbatini^{None}; Gianluca Chiappini¹; Marco Rossi²; Marco Sasso²; Mattia Utzeri²

¹ *Università ECampus*

² *Università Politecnica delle Marche*

Corresponding Authors: gianluca.chiappini@uniecampus.it, m.rossi@staff.univpm.it, m.utzeri@staff.univpm.it, c.sabbatini@pm.univpm.it, m.sasso@staf.univpm.it

Expanded polymeric foams are increasingly adopted in industrial applications not only for energy absorption and impact mitigation but also for structural purposes. Their large strain elastic response in finite element (FE) simulations is commonly described using the Ogden–Hill hyperelastic model, typically calibrated on standardized specimens.

This work presents an experimental campaign carried out on commercial expanded polypropylene (EPP) components from the HVAC R sector. Two geometries were tested across a range of temperatures to capture the strong thermo mechanical dependence of the material. Tests were performed both under ambient conditions and inside a climatic chamber. Deformation fields were measured using three dimensional digital image correlation (3D DIC), applied to multiple regions of the components to obtain full field strain data. This measurement approach enabled a direct comparison between experimental results and numerical predictions obtained with the Ogden foam model.

The study evaluates the model's capability to reproduce the mechanical behavior of large, geometrically complex EPP components subjected to non uniform temperature fields. The results highlight both the strengths and the limitations of standard hyperelastic formulations when applied beyond specimen scale calibration.

Progettazione Meccanica / 239

Buckling strength analysis for the construction phase of oil storage tanks

Authors: Andrea Nono Dachille^{None}; Luciano Lamberti¹

¹ *Politecnico di Bari*

Corresponding Authors: luciano.lamberti@poliba.it, a.nonodachille@phd.poliba.it

Cylindrical tanks are used to store energetic materials and products. Wind loads acting on the shell tank may cause

buckling failure, especially during the construction phase of the storing structure. Wind girders are stiffeners mounted onto the shell to increase stiffness and strength of the structure and hence maximize buckling resistance. However, what happens in the construction of the tank, particularly during the mounting of wind girders has never been investigated in a systematic way. This study aims to fill this gap in technical literature. For that purpose, it is analyzed how structural strength changes during mounting intermediate wind girders on the tank shell. Parametric analysis is performed to understand how to reach the desired level of stiffness/strength in the fastest way as possible. In particular, tank shells with different radius-to-thickness ratio and height-to-diameter ratio are considered to evaluate how the buckling resistance changes during the mounting of the wind girder at shell middle height. Finite element analyses are carried out to assess either linear or non-linear buckling behavior of the tank structure. The load transfer from shell to wind girders is investigated by correlating the tributary height of the tank with the stiffness ratio between the shell and the wind girders. Stiffness increments are strongly dependent on oil tank geometry and the selected cross section of wind girders.

Interestingly, mounting a partial wind girder can increase the structure's stiffness more than adopting a full wind girder. In summary, it is demonstrated that using partial wind girder is an effective way to reduce material consumption, costs and times of construction as well as to optimize maintenance of large shell storage tanks.

Progettazione Meccanica / 246

Resonant test bench with controlled support position at a variable flexural nodal point during block loading fatigue testing of drillpipes

Authors: *Ciro Santus*¹; *Lorenzo Romanelli*²

Co-author: *Alessandro Burchianti*³

¹ *DICI - Università di Pisa*

² *DII - Università di Trento*

³ *ACTA Srl*

Corresponding Authors: *a.burchianti@acta.srl*, *lorenzo.romanelli-1@unitn.it*, *ciro.santus@unipi.it*

Obiettivi

Nell'ambito della perforazione petrolifera, o esplorativa a fini di ricerca, è di interesse la sperimentazione meccanica sui componenti che compongono la stringa di perforazione. Al fine di testare le zone della connessione a fatica, solitamente si eseguono test in risonanza su porzioni del singolo elemento di perforazione (drillpipe) o sulla zona di connessione che tipicamente rappresenta l'elemento debole. Per eseguire questi test in risonanza, la porzione di elemento tubolare (sia semplice tubo, sia zona di connessione) è sottoposta a delle masse fisse posizionate lateralmente e una singola massa eccentrica rotante la cui velocità di rotazione è controllata con elevata risoluzione. In questo modo la massa eccentrica rotante può essere portata ad una frequenza molto vicina a quella di risonanza, ovvero la frequenza naturale del primo modo proprio flessionale della struttura, costituita dal tubo stesso e le masse aggiuntive. La modulazione della frequenza, in un intorno piuttosto ristretto del primo modo proprio, può essere gestita mediante un motore elettrico asincrono e relativo inverter, tuttavia, questa variazione della frequenza di eccitazione comporta una modifica della forma e quindi al tempo stesso una diversa posizione dei nodi che sono usati per sostenere il peso proprio della struttura e per tenere in posizione il componente durante il test. Al fine di gestire questa variazione in esercizio, senza interrompere la prova, è stato depositato dagli autori un brevetto in cui si implementa una soluzione per la movimentazione e il controllo della posizione del supporto maggiormente sottoposto alla variazione della posizione durante il test. L'obiettivo del presente lavoro è mostrare la progettazione e l'implementazione delle soluzioni costruttive adottate per ottenere un riposizionamento continuo del supporto durante l'esecuzione del test.

Metodi

Tipicamente, la posizione dei supporti per questo tipo di test è determinata preliminarmente tramite analisi modale o di risposta armonica implementate tramite FEM. L'accuratezza di questa stima dipende da alcuni accorgimenti tenuti in considerazione durante la simulazione. Tuttavia, anche in caso di stime imprecise, brevi test iniziali permettono di regolare iterativamente la posizione per evitare vibrazioni eccessive dei supporti. Questa metodologia è adatta a prove ad ampiezza costante come avviene di consueto per ottenere le curve SN. Per prove ad ampiezza variabile, la posizione dei nodi cambia passando da un blocco di carico all'altro. In particolare, si osserva che il nodo della massa fissa resta vicino alla condizione ideale del primo modo proprio flessionale, mentre quello della massa eccentrica è più sensibile all'ampiezza e alla frequenza. Per questo motivo, la boccia a contatto con il supporto è stata dotata di rotelle disposte a 120° che ne consentono lo scorrimento assiale rispetto all'elemento tubolare. La soluzione di controllo prevede il monitoraggio di due accelerometri alle estremità della boccia, con correzione della posizione del supporto per mantenere un rapporto prefissato tra le ampiezze degli accelerometri stessi.

Risultati

Nel presente lavoro si mostra come il sistema, attualmente brevettato, sia stato implementato e messo in funzione dimostrando la capacità di controllare in modo automatico la posizione del supporto per inseguire il nodo, generando una rapida riduzione del livello di vibrazione e rumore nel momento in cui l'ampiezza della sollecitazione, e conseguentemente la frequenza, è modificata. Nel lavoro si mostra inoltre come il sistema è inizialmente tarato in modo che possa garantire un controllo affidabile, della posizione del supporto, durante l'esercizio ad ampiezza variabile.

Conclusioni

In questo lavoro, si parte dal concetto descritto in un brevetto recentemente depositato e concesso, e si mostra la progettazione e l'implementazione delle soluzioni meccaniche per mettere in esercizio la soluzione che prevede un supporto variabile durante l'esecuzione di prove in risonanza su elementi di perforazione. In particolare, si mostrano le soluzioni tecniche e costruttive, ed inoltre il principio di controllo basato su due accelerometri opportunamente posizionati sulla boccia di supporto dell'elemento tubolare. Questa evoluzione della macchina a risonanza, per prove di fatica rotante su elementi tubolari, permette di eseguire test ad ampiezza variabile, quantomeno con un tipo di

caricamento a blocchi, che può essere una tipologia di test di particolare interesse per gli elementi di perforazione che subiscono storie di carico complesse durante l'esercizio.

Progettazione Meccanica / 249

Controllo termico passivo avanzato per piattaforme in LEO mediante strutture sandwich in additive manufacturing con materiali a cambiamento di fase (PCM)

Authors: Lino Sartori¹; Matteo Benedetti¹; vigilio fontanari¹; Emiliano Rustighi²; Antonio Concilio³; Nunzia Favalloro³

¹ *Università di Trento*

² *Università degli Studi di Trento*

³ *CIRA (Centro Italiano Ricerche Aerospaziali)*

Corresponding Authors: emiliano.rustighi@unitn.it, a.concilio@cira.it, matteo.benedetti@unitn.it, n.favalloro@cira.it, vigilio.fontanari@unitn.it, lino.sartori@unitn.it

L'ambiente presente nella Low Earth Orbit (LEO) rappresenta uno scenario radiativo estremamente sfidante per il dimensionamento termico dei piccoli satelliti. In queste orbite la piattaforma è soggetta a carichi termici esterni complessi, derivanti dal flusso solare diretto, da albedo (luce solare riflessa dalla Terra) e dalla radiazione infrarossa (IR) emessa dal pianeta. L'alternanza periodica tra condizioni di illuminazione e zone di eclisse (ombra della Terra) induce severe fluttuazioni termiche cicliche, mentre l'esposizione asimmetrica, alla luce solare, delle facce del satellite genera gradienti termici trasversali significativi.

Per satelliti di dimensioni ridotte, tali fenomeni sono amplificati da proprietà intrinseche quali la ridotta massa termica, l'elevata densità di potenza e i volumi estremamente limitati. In questo contesto, i sistemi di controllo termico attivo risultano spesso inapplicabili per via dei vincoli di massa e potenza, rendendo necessaria l'implementazione di soluzioni passive ad alta efficienza.

Il presente lavoro propone lo sviluppo di una struttura satellitare innovativa, interamente realizzata mediante manifattura additiva, che integra un sistema di controllo termico passivo di tipo sandwich (lamine esterne e nucleo lattice). Il nucleo alveolare è progettato per essere infiltrato con materiali a cambiamento di fase (Phase Change Materials - PCM).

L'integrazione del PCM all'interno di una struttura sandwich ottimizzata in 3D permette di incrementare l'inerzia termica del sistema, garantendo capacità termiche maggiori, per unità di volume, rispetto alle strutture convenzionali. Durante le fasi di massima esposizione, la struttura è in grado di accumulare energia termica sfruttando il calore latente associato alla transizione di fase solido-liquido del PCM. Al contrario, durante i periodi di eclisse, il calore precedentemente immagazzinato viene ceduto alla struttura. Tale meccanismo di accumulo e rilascio agisce come un volano termico, garantendo uno smorzamento delle fluttuazioni termiche cicliche e una maggiore stabilità delle temperature operative all'interno del satellite.

Grazie alla flessibilità della stampa 3D, è possibile mitigare i gradienti termici ottimizzando la topologia del lattice per favorire la conduzione verso le zone fredde o agire come isolante dove richiesto dalla strumentazione. Tale approccio permette inoltre di ottimizzare la piattaforma riducendo il peso e il numero di elementi di montaggio, integrando le funzioni strutturali e di controllo termico in un unico componente adattabile a diverse configurazioni LEO.

Il sistema viene sviluppato e validato attraverso una metodologia che parte dalla definizione del complesso ambiente termico presente in LEO. A seguire, si svolgerà un processo di ottimizzazione topologica del lattice, per massimizzare sia lo scambio termico che la stabilità meccanica. Questo design è supportato da una modellazione numerica multi-fisica agli elementi finiti (FEM), necessaria per simulare il comportamento del transitorio termico e la cinetica del cambiamento di fase durante i cicli orbitali. L'efficacia del metodo viene testata sul caso studio del sensore GEO GRS (Gravity Reference System), caratterizzato da requisiti di stabilità termica stringenti.

Sebbene il sistema sia ottimizzato per gli standard CubeSat, la metodologia proposta risulta scalabile e adattabile a strutture custom operanti in LEO che richiedono elevate prestazioni termiche. L'approccio integrato tra Additive Manufacturing e PCM rappresenta una soluzione d'avanguardia per la protezione di strumentazione scientifica sensibile, garantendo affidabilità senza l'ausilio di componenti attivi energeticamente esigenti.

Keywords: Stampa 3D, Phase Changing Materials, Strutture lattice, CubeSat

Progettazione Meccanica / 251**Ripristino dei denti di ingranaggi tramite manifattura additiva: fattibilità e prestazioni del Directed Energy Deposition****Author:** Andrea Mura¹**Co-author:** Edoardo Gianolio¹¹ *Politecnico di Torino***Corresponding Authors:** andrea.mura@polito.it, edoardo.gianolio@polito.it

Il presente lavoro si propone di investigare e valutare strategie innovative per la riparazione di ingranaggi danneggiati mediante tecnologie di manifattura additiva. In particolare, lo studio si concentra sul ripristino dei denti di ingranaggi attraverso il processo di Directed Energy Deposition (DED), con l'obiettivo di analizzare l'efficacia di diverse geometrie di riparazione e approcci di deposizione. L'intento principale è quello di verificare se tali tecnologie possano rappresentare una valida alternativa ai metodi tradizionali di sostituzione dei componenti, contribuendo all'estensione della vita utile degli ingranaggi e alla riduzione dei costi e degli impatti ambientali associati alla produzione ex novo.

La metodologia adottata prevede un'analisi comparativa di differenti configurazioni di riparazione dei denti, includendo sia interventi parziali sia ricostruzioni complete del profilo del dente. Il processo DED viene utilizzato per depositare materiale direttamente sulle aree danneggiate, consentendo una ricostruzione controllata della geometria originale. Sono stati esaminati parametri geometrici rilevanti, come la prelavatura delle superfici prima del deposito del materiale d'apporto, la qualità delle superfici ottenute. Inoltre, è stata valutata la fattibilità del processo in termini di stabilità operativa, ripetibilità e compatibilità con componenti esistenti. L'analisi si è basata su prove di fatica effettuate su simulacri di denti e valutazioni qualitative delle diverse strategie di deposizione, al fine di identificare le soluzioni più promettenti.

I risultati sperimentali evidenziano che le tecnologie di manifattura additiva, e in particolare il processo DED, offrono un elevato potenziale per la riparazione efficace degli ingranaggi danneggiati. Le soluzioni di riparazione mostrano vantaggi in termini di riduzione del materiale utilizzato e tempi di lavorazione. È stata osservata una buona continuità metallurgica tra il materiale depositato e il substrato, elemento fondamentale per assicurare l'integrità strutturale del componente riparato. Nel complesso, le prestazioni funzionali dei simulacri di denti riparati risultano compatibili con i requisiti operativi, dimostrando la validità dell'approccio.

Lo studio conferma che la manifattura additiva rappresenta una soluzione flessibile, efficiente e sostenibile per la riparazione di ingranaggi ad alto valore. L'utilizzo del Directed Energy Deposition consente di intervenire in modo localizzato sulle aree danneggiate, riducendo la necessità di sostituire interamente il componente e contribuendo a una gestione più sostenibile delle risorse. I risultati ottenuti indicano che, con un'adeguata ottimizzazione dei parametri di processo e delle strategie di deposizione, è possibile ottenere riparazioni affidabili e prestazioni funzionali comparabili a quelle degli ingranaggi originali. Questo lavoro contribuisce allo sviluppo di metodologie di riparazione robuste e replicabili, aprendo la strada a una più ampia adozione delle tecnologie additive nel settore della manutenzione avanzata dei sistemi di trasmissione meccanica.

Progettazione Meccanica / 266**Ingegneria inversa dello Scorpione: dalle fonti storiche alla validazione prestazionale mediante FEM****Author:** MARIO GUAGLIANO¹**Co-authors:** AMIR ARDESHIRI LORDEJANI¹; MONIL MIHIRBHAI THAKKAR¹¹ *POLITECNICO MILANO***Corresponding Authors:** mario.guagliano@aiasnet.it, monilmihirbhai.thakkar@polimi.it, amir.ardeshiri@polimi.it

Le macchine da guerra romane, come lo Scorpione, testimoniano l'avanzato livello ingegneristico raggiunto nei periodi tardo-repubblicano e imperiale. Tuttavia, le fonti storiche forniscono poche informazioni sul suo funzionamento e sulla metodologia di progettazione. Questo studio propone un approccio di ricostruzione ingegneristica dello Scorpione romano che parte da fonti storiche, evidenze archeologiche e dal rilievo sperimentale del danneggiamento che i proiettili scagliati dallo Scorpione erano in grado di infliggere, per arrivare a investigare i parametri progettuali della macchina e a eseguirne la ricostruzione concettuale.

Inizialmente, sono stati condotti test di caratterizzazione meccanica su un materiale simile a quello delle mura di Pompei per estrarre le proprietà necessarie a un modello dinamico a elementi finiti (FE) in grado di simulare il danneggiamento indotto dai proiettili dello Scorpione. Tale modello ha permesso di determinare la velocità minima d'impatto richiesta perché un dardo produca cavità coerenti con quelle rilevate durante le campagne archeologiche sulle mura settentrionali di Pompei. Successivamente, la macchina è stata ricostruita secondo le descrizioni storiche, e sono state analizzate quattro composizioni per le funi che fungevano da molla di torsione. Per ciascun materiale, sono state calcolate la capacità di accumulo energetico della macchina e la velocità di rilascio del dardo. È stata quindi eseguita un'analisi aerodinamica per valutare le perdite energetiche dovute alla resistenza dell'aria e la riduzione di velocità durante il volo.

Infine, lo studio ha verificato se lo Scorpione ricostruito—utilizzando i materiali candidati—potesse raggiungere la velocità d'impatto necessaria per generare le indentazioni osservate sulle mura. I risultati confermano che la progettazione proposta e la selezione dei materiali sono in grado di riprodurre i crateri documentati, fornendo nuove prospettive per l'analisi e la comprensione dei principi ingegneristici dell'artiglieria romana.

Progettazione Meccanica / 291

Sviluppo di un banco prova per la valutazione delle prestazioni di un dispositivo meccanico per la generazione di energia da moto ondoso

Author: Andrea Mura¹

Co-author: Vincenzo La Battaglia²

¹ Politecnico di Torino

² Università degli Studi Roma Tre

Corresponding Authors: vincenzo.labattaglia@uniroma3.it, andrea.mura@polito.it

Sommario:

Obiettivo

Il presente lavoro si propone di sviluppare e validare un banco prova dedicato all'analisi delle prestazioni di un innovativo dispositivo meccanico per la generazione di energia da moto ondoso. L'interesse verso questa fonte rinnovabile è in costante crescita, in quanto il moto delle onde marine rappresenta una risorsa energetica abbondante e ancora largamente inutilizzata. Tuttavia, una delle principali criticità risiede nella conversione del moto oscillatorio delle onde in un moto rotatorio continuo, necessario per l'azionamento di un generatore elettrico. L'obiettivo dello studio è quindi quello di progettare un sistema sperimentale in grado di simulare realisticamente le condizioni operative del mare e di valutare l'efficienza, l'affidabilità e la fattibilità di un nuovo meccanismo di conversione, concepito per superare i limiti delle soluzioni tradizionali, spesso caratterizzate da elevata complessità e problematiche ambientali.

Metodo

La metodologia adottata si basa sulla progettazione e realizzazione di un banco prova in grado di riprodurre il comportamento dinamico del moto ondoso e le condizioni di carico tipiche di un sistema reale di generazione energetica. Il banco è costituito da un attuatore lineare, utilizzato per simulare il moto alternato imposto dalle onde al dispositivo, e da un freno elettrico, che riproduce il carico resistente associato al generatore elettrico. Il dispositivo oggetto di studio è un meccanismo innovativo capace di trasformare direttamente il moto alternato del galleggiante in un moto rotatorio unidirezionale. Particolare attenzione è stata posta alla valutazione delle prestazioni del

sistema in termini di continuità del moto, efficienza della conversione energetica e comportamento sotto carichi variabili. Inoltre, sono state considerate le caratteristiche costruttive del dispositivo, tra cui l'assenza di lubrificanti a base di olio, al fine di garantire una maggiore sostenibilità ambientale e ridurre i rischi di contaminazione marina. Le prove sperimentali sono state condotte variando i parametri operativi dell'attuatore e del freno, al fine di analizzare il comportamento del sistema in diverse condizioni simulate.

Risultati

I risultati ottenuti dimostrano che il banco prova sviluppato è in grado di riprodurre in modo efficace le condizioni operative tipiche dei sistemi di generazione di energia da moto ondoso, consentendo una valutazione accurata delle prestazioni del dispositivo. Il meccanismo proposto evidenzia una conversione efficiente del moto alternato in moto rotatorio unidirezionale, garantendo una trasmissione continua e regolare del moto verso il sistema di generazione. Rispetto ai sistemi tradizionali basati su circuiti idraulici, il dispositivo mostra una riduzione significativa della complessità meccanica e l'eliminazione dei rischi legati all'impiego di fluidi lubrificanti. Inoltre, sono stati osservati miglioramenti in termini di efficienza complessiva e affidabilità operativa, grazie alla semplificazione del sistema e alla riduzione delle perdite energetiche associate ai processi di conversione indiretta. Il banco prova ha inoltre permesso di identificare le condizioni operative ottimali e di evidenziare i principali fattori che influenzano le prestazioni del sistema.

Conclusioni

Lo studio conferma la validità dell'approccio proposto per l'analisi sperimentale di dispositivi per la generazione di energia da moto ondoso e dimostra il potenziale del meccanismo sviluppato come alternativa innovativa alle soluzioni convenzionali. Il banco prova rappresenta uno strumento efficace e flessibile per la caratterizzazione delle prestazioni, consentendo di simulare in modo controllato diverse condizioni operative e di supportare lo sviluppo di tecnologie più efficienti e sostenibili. Il dispositivo analizzato si distingue per la capacità di realizzare una conversione diretta del moto ondoso, migliorando l'efficienza e l'affidabilità rispetto ai sistemi esistenti e riducendo l'impatto ambientale grazie all'assenza di lubrificanti a base di olio. I risultati ottenuti aprono prospettive interessanti per l'ottimizzazione e l'industrializzazione di sistemi di generazione di energia marina, contribuendo allo sviluppo di soluzioni energetiche rinnovabili più competitive e sostenibili.

Progettazione Meccanica / 305

Microturbina a idrogeno: progettazione preliminare dinamica e termo-strutturale

Author: Lorenzo Nicolini¹

Co-authors: Andrea Sorrentino¹; Davide Castagnetti¹; Andrea Spaggiari¹; Shashikanth Nemuri²; Sanjay Reddy Pentaparthi²; Angelo Minotti²; Ludovica Canta²; Daniele Ferrara³; Uma Nataraj Gottipati²; Marco Alfano¹; Eugenio Dragoni¹

¹ Università di Modena e Reggio Emilia - Dipartimento di Scienze e Metodi dell'Ingegneria

² MIEEG

³ MIPRONS

Corresponding Authors: sanjayreddypentaparthi@mieeg.org, shashikanth.nemuri@mieeg.org, lorenzo.nicolini@unimore.it, daniele.ferrara@mieeg.org, ludovica.canta@mieeg.org, angelo.minotti@mieeg.org, nataraj.gottipati@mieeg.org, marco.alfano@unimore.it, davide.castagnetti@unimore.it, eugenio.dragoni@unimore.it, andrea.spaggiari@unimore.it, andrea.sorrentino@unimore.it

Le microturbine a gas, grazie alle loro ridotte dimensioni e tempi di avvio contenuti, rappresentano una soluzione promettente per la generazione di energia con basse emissioni e in forma decentralizzata. In relazione a questa tecnologia un vettore energetico di particolare interesse è l'idrogeno, in quanto privo di carbonio e compatibile con le infrastrutture esistenti, pur ponendo sfide importanti relativamente alla necessità di soluzioni ingegneristiche avanzate in termini di materiali durevoli e affidabili.

In questo scenario la startup italiana MIEEG ha brevettato una microturbina a gas che utilizza specificamente idrogeno come combustibile. La microturbina, che si caratterizza per una configurazione multistadio, senza rigeneratore, è pensata per raggiungere una velocità di esercizio di 100 krpm. L'

efficienza termica, stimata intorno al 30%, permette di erogare potenze elettriche nell'intervallo 50 kW-100kW.

Il lavoro presenta l'analisi ed ottimizzazione preliminare del sistema, dal punto di vista del comportamento dinamico e strutturale, attraverso un approccio analitico e di simulazione. In particolare, si è affrontata l'analisi dei modi e delle frequenze proprie di tutto il sistema rotante (albero con giranti), tenendo conto degli effetti dinamici dovuti alle elevate velocità di rotazione e individuando le velocità critiche di rotazione dell'albero. Un secondo aspetto dello studio ha riguardato l'analisi termo-strutturale della parte rotorica, al fine di valutare le dilatazioni termiche del sistema, che hanno effetti importanti sulla progettazione dei giochi e delle tenute meccaniche. Specifica attenzione è stata posta anche sulle giranti, sia del compressore che della turbina, così da prevedere lo stato tensionale e deformativo dovuto ai carichi termomeccanici. Infine, si sono valutate le soluzioni tecnologiche più promettenti relativamente alle tenute tra le parti rotanti e quelle statoriche su compressore e turbina.

I risultati ottenuti evidenziano quanto il progetto di una macchina con questo livello di prestazioni sia sfidante, sia dal punto di vista strutturale, sia relativamente alla scelta dei materiali e dei processi tecnologici.

Progettazione Meccanica / 309

A Transfer Learning and Domain Adaptation Framework for Imbalance Localization in Rotating Shafts

Authors: Libero Lucii¹; Emanuele Petriconi¹; Lucio Pinello¹; Marco Giglio¹; Claudio Sbarufatti¹

¹ *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: marco.giglio@polimi.it, lucio.pinello@polimi.it, libero.lucii@polimi.it, claudio.sbarufatti@polimi.it, emanuele.petriconi@polimi.it

Rotating machinery is central to modern industrial applications, and shaft unbalance remains one of the most prevalent causes of premature failure and structural degradation. Effective condition monitoring is therefore essential to ensure operational reliability and optimise maintenance schedules. Modern strategies rely on machine learning algorithms, for which data availability is crucial. However, in real applications, it is common to be in a data-scarce condition, especially for new structures. Thus, this study proposes a transfer learning framework for damage localisation on rotating shafts. In this scope, experimental tests were conducted in which two rotating shafts were subjected to controlled fault conditions and different rotational speeds. Four accelerometers, placed on the shafts' bearings, are used to acquire signals during the shafts' rotation. One shaft is used to mimic a structure for which there is a very good knowledge, e.g., data. The other shaft represents a newer structure, for which there is little data, e.g., poor knowledge. Damage is induced in the form of imbalances by screwing bolts with different masses in varying locations. Domain adaptation and fine-tuning techniques are used to transfer knowledge from one domain to another, and a convolutional neural network is employed for damage localisation. This research provides a transfer learning framework for rotating shaft damage localisation based on vibration monitoring.

Progettazione Meccanica / 319

FEM-based verification and structural optimization of an aircraft cargo loading platform

Authors: Venanzio Giannella¹; Alessandro Greco²; Fabrizio Salvatore³; G. Concilio⁴; Rosario Giordano⁵

¹ *University of Salerno*

² *Università degli Studi di Salerno*

³ *No affiliation*

⁴ *ProEtico SRL*

⁵ ProEtico srl, Pozzuoli (NA), Italy

Corresponding Authors: info@fsengineering.it, ceo@proetico.it, vgiannella@unisa.it

This document presents the FEM analyses for the verification and structural optimization of a 10 m × 2.5 m cargo loading platform designed for pallets in transport aircraft. Originally conceived in aluminium, the platform was evaluated for steel construction to meet enhanced load requirements. The analysis considered the most critical loading scenarios, including four fully loaded pallets (~18,000 kg) and lateral wind at 100 km/h. FEM simulations were used to assess stress distributions, identify critical regions and evaluate structural performance. Design improvements were implemented, such as optimized cross-sections of key profiles, geometric modifications and removal of non-critical profiles, hence reducing the number of welded components and simplifying production. These modifications enhanced structural stiffness and safety while ensuring a robust and manufacturable configuration. This study demonstrates the effectiveness of FEM in guiding material substitution and structural optimization of aerospace ground support equipment.

Progettazione Meccanica / 322

Ideazione e progettazione di un palo telescopico per turbine eoliche –Progetto PERIMA 2

Authors: Antonio Pantano¹; Marco Costanza¹; Tullio Tucciarelli¹

¹ Università degli Studi di Palermo

Corresponding Author: antonio.pantano@unipa.it

Tra il 2015 e il 2016, un consorzio composto da diversi partner ha avviato il progetto di ricerca denominato PERIMA, con l'obiettivo di sviluppare un prototipo di palo telescopico per la produzione eolica, caratterizzato da un ridotto impatto ambientale, insieme al relativo sistema di sollevamento destinato a turbine di potenza compresa tra 60 e 250 kW e altezza pari a 30 m. Il palo telescopico, movimentabile tramite sistemi automatici o controllo remoto, consente di modulare nel tempo la presenza dell'aerogeneratore nel paesaggio, offrendo significativi vantaggi in termini di integrazione ambientale.

In assenza di riferimenti consolidati nello stato dell'arte, sia il palo sia il sistema di sollevamento sono stati progettati ex novo, affrontando e risolvendo le principali criticità mediante soluzioni innovative. Il progetto PERIMA mirava alla realizzazione di un palo automontante telescopico per generatori minieolici bipala, capace di permettere la produzione energetica in periodi selezionati e, al contempo, di occultare l'aerogeneratore quando non necessario, grazie alla possibilità di abbassarlo a pochi metri dal suolo o di sollevarlo in pochi minuti anche da remoto. Il sistema attualmente sviluppato utilizza una configurazione di tipo jack-up, analoga a quella impiegata nelle piattaforme di perforazione, e consente al palo di raggiungere la quota operativa in circa 15 minuti. Il prototipo è stato installato a Caltanissetta.

Il progetto PERIMA 2 si pone in continuità con l'esperienza maturata, con l'obiettivo di individuare soluzioni progettuali più efficienti ed economicamente vantaggiose. A tal fine sono in fase di studio tre differenti meccanismi, sviluppati in scala 1:10, con l'intento di selezionare la configurazione più promettente da realizzare in scala reale. Le soluzioni attualmente in sviluppo sono:

- Sistema idraulico, che elimina il meccanismo jack-up per il sollevamento del puntone. Il pozzo, di piccolo diametro, viene sigillato inferiormente e riempito d'acqua insieme al puntone. Una pompa posta alla base aspira il fluido dall'interno del puntone e lo trasferisce nella camera di espansione compresa tra la camicia del pozzo e il fondo, generando il sollevamento. Forature opportunamente posizionate consentono il rientro dell'acqua durante la fase di discesa.
- Sistema a carrucole, che evita sia la realizzazione del pozzo sia l'impiego del puntone. Il sollevamento avviene mediante un sistema di cavi e carrucole che avvicina progressivamente le sezioni telescopiche, consentendo l'estensione della torre.
- Sistema a traliccio, che sostituisce la configurazione telescopica con elementi reticolari abbattibili. Un attuatore posto alla base solleva sequenzialmente ciascun elemento, portandolo in posizione estesa e bloccata fino al raggiungimento dell'altezza operativa complessiva.

Bibliografia:

1. Pantano A., Tucciarelli T., Montinaro N., Mancino A. "Design of a telescopic tower for wind energy production with reduced environmental impact". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, 2020, 7(1), pp. 119–130

Funding:

POC 1.1.1 –Progetti selezionati da P.O. FESR SICILIA 2014/2020, Obiettivo Tematico 1, Obiettivo specifico 1.1, Azione 1.1.5

Aknowledgement:

Progetto: "Produzione Eolica con Ridotto Impatto Ambientale 2 - PERIMA 2"

Progettazione Meccanica / 335

Progettazione di un sistema sperimentale per il monitoraggio in tempo reale della frattura dello smalto in serbatoi soggetti a cicli di pressione ad alto numero di cicli

Authors: Marco Rossi¹; Carlo Sabbatini^{None}; Giacomo Zandri²; Marco Sasso¹

¹ *Università Politecnica delle Marche*

² *Università eCampus*

Corresponding Authors: c.sabbatini@pm.univpm.it, m.sasso@univpm.it, giacomo.zandri@studenti.uniecampus.it, m.rossi@univpm.it

La durabilità dei rivestimenti vetrosi (smalti) applicati a serbatoi in pressione rappresenta un aspetto critico in numerose applicazioni industriali, in particolare quando i componenti sono soggetti a cicli di carico ad elevato numero di cicli. Nonostante l'ampio utilizzo di tali rivestimenti per le loro proprietà anticorrosive, i meccanismi di iniziazione e propagazione della frattura risultano ancora non completamente caratterizzati, anche a causa dei limiti delle prove standard, che non consentono una osservazione diretta dell'insorgenza del danno.

In questo lavoro viene presentata la progettazione e realizzazione di un sistema sperimentale dedicato alla misura in tempo reale della frattura dello smalto durante prove cicliche di pressurizzazione. Il sistema è basato su un circuito di pressurizzazione che utilizza aria compressa per mettere in pressione l'acqua contenuta nel serbatoio, operando quindi in condizioni idrauliche fino a 9–10 bar, e consentendo l'esecuzione di cicli a frequenza superiore rispetto ai metodi convenzionali, con una significativa riduzione dei tempi di prova.

Il monitoraggio del danneggiamento è ottenuto mediante un sistema ottico costituito da quattro telecamere subacquee equipaggiate con lenti grandangolari, progettate per operare in condizioni di pressione e per garantire una copertura quasi completa della superficie interna del serbatoio. Tale configurazione permette di identificare con elevata risoluzione temporale e spaziale l'insorgere della frattura e il successivo distacco dello smalto.

Il lavoro discute le scelte progettuali del set-up sperimentale, le criticità incontrate e le soluzioni adottate, oltre a presentare alcuni casi studio rappresentativi. I risultati evidenziano il potenziale del sistema nel fornire nuove informazioni sui meccanismi di danneggiamento, con implicazioni rilevanti per la progettazione e la qualificazione di componenti smaltati soggetti a carichi ciclici.

Progettazione Meccanica / 341

A Design-Oriented Analytical Framework for Tension-Wound Orthotropic Cylindrical Assemblies

Author: Andrea Marchegiani¹

Co-authors: Alessio Capelluto ²; Andrea Masi ³; Gabriele Liuzzo ¹; Pierluigi Fanelli ¹; Simone Carusotti ¹

¹ *Department of Economics, Engineering, Society and Business Organization (DEIM), University of Tuscia, Largo dell'Università, 01100 Viterbo, Italy*

² *2. ASG Superconductors, Magnets&Systems units, Corso F.M. Perrone 73R, 16152, Genova –Italy*

³ *3. ENEA C.R. Frascati, Department of Fusion and Nuclear Security Technologies, Via Enrico Fermi 45, 00044, Frascati –Italy*

Corresponding Authors: simone.carusotti@unitus.it, andrea.masi@enea.it, gabriele.liuzzo@unitus.it, capelluto.alessio@asg.it, andrea.marchegiani@unitus.it, pierluigi.fanelli@unitus.it

Le strutture avvolte a strati costituiscono una classe di sistemi in cui il processo di fabbricazione influenza in modo diretto lo stato tensionale residuo e, di conseguenza, la stabilità meccanica del componente finale. In tali configurazioni, infatti, la deposizione progressiva di elementi sottili su un supporto rigido genera un accumulo incrementale di pressione di contatto e tensione circonferenziale, la cui distribuzione dipende sia dai parametri di processo sia dalle proprietà anisotrope dei materiali coinvolti. Il presente lavoro propone un modello analitico per lo studio di avvolgimenti cilindrici ortotropi realizzati per deposizione incrementale su mandrino rigido, con l'obiettivo di fornire uno strumento interpretativo rapido e orientato al progetto per la valutazione delle condizioni meccaniche indotte dall'avvolgimento. La soluzione si basa sulla formulazione classica della teoria dei rotori applicata a cilindri ortotropi in condizioni assialsimmetriche, ed è sviluppata in modo da descrivere l'evoluzione dello stato tensionale durante la costruzione progressiva degli avvolgimenti. Particolare attenzione è rivolta alla risposta degli strati più interni, per i quali la combinazione tra interferenza, pressione radiale e tensione di tiro può favorire l'insorgenza di stati compressivi circonferenziali, potenzialmente associati a fenomeni di instabilità locale o buckling. In quest'ottica, il modello mira a collegare in maniera trasparente geometria, ortotropia, condizioni di interfaccia e parametri di processo con la distribuzione finale delle tensioni residue. L'interesse per tale problematica nasce dallo studio di pancake coil superconduttive ad alta temperatura critica, costituite da nastri sottili a struttura stratificata e caratterizzate da una significativa sensibilità agli effetti meccanici indotti durante l'avvolgimento. Risulta per cui decisivo definire strategie di avvolgimento meccanicamente sicure attraverso strumenti analitici compatti, interpretabili e adatti a supportare le prime fasi di progettazione. In questa prospettiva, il modello proposto si configura come base per futuri sviluppi mirati, dedicati sia al raffinamento dei criteri di instabilità sia all'estensione verso casi applicativi di maggiore complessità.

Progettazione Meccanica / 347

Sviluppo di un sistema di motorizzazione elettrica per carrozzine

Author: Luca Miglino¹

Co-author: Francesco Bucchi ¹

¹ *Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale - Università di Pisa*

Corresponding Authors: luca.miglino@ing.unipi.it, francesco.bucchi@unipi.it

Nell'ambito dei preoggetti Interreg "Itinera Romanica+" e, successivamente, "RomaniCAP", finalizzati a migliorare l'accessibilità di percorsi turistici per persone con disabilità motoria, è stato concepito e sviluppato un dispositivo mecatronico da integrare con carrozzine manuali, finalizzato a consentire la percorrenza autonoma di terreni non asfaltati, quali ghiaia, sterrato e superfici in pendenza.

Il dispositivo è costituito da una struttura metallica installabile posteriormente alla carrozzina, senza necessità di modifiche permanenti alla stessa, su cui sono montati due motori elettrici. La trasmissione del moto avviene tramite rulli che entrano in contatto con le ruote posteriori della carrozzina e trasmettono coppia per attrito. Questa configurazione consente di mantenere una buona semplicità costruttiva e una elevata adattabilità a diversi modelli di carrozzina.

Le scelte progettuali sono state guidate da una fase preliminare di analisi dei dispositivi esistenti, che ha evidenziato i limiti delle soluzioni a ruota anteriore motorizzata e dei sistemi più ingombranti. Ne è derivata la preferenza per una trazione posteriore, in grado di garantire migliori prestazioni in termini di forza trasmissibile e capacità di superare pendenze.

Il primo prototipo realizzato ha permesso di validare il principio di funzionamento. Le prove sperimentali hanno mostrato che il dispositivo è in grado di assistere efficacemente la marcia su percorsi in salita e su fondi irregolari. Tuttavia, sono emerse alcune criticità, tra cui il dimensionamento non ottimale di alcuni componenti elettronici e difficoltà di avanzamento su ghiaia con le ruote standard.

Le successive iterazioni hanno portato a miglioramenti significativi: ottimizzazione del contatto tra rulli e ruote, introduzione di ruote più adatte a terreni accidentati e aggiornamenti dell'elettronica di controllo. Le prove conclusive hanno confermato la capacità del sistema di operare in modo affidabile anche con carichi elevati e su diverse tipologie di terreno.

Parallelamente, è stata avviata una fase di ingegnerizzazione del dispositivo con l'obiettivo di renderlo industrializzabile. In questa fase sono state riviste le soluzioni di montaggio e interfaccia con la carrozzina, introducendo sistemi di aggancio più semplici e regolabili e una configurazione compatta "a zaino", migliorando l'ergonomia e la facilità d'uso. Ulteriori sviluppi hanno riguardato il sistema di controllo, con l'introduzione di un microcontrollore per migliorare la risposta ai comandi e la manovrabilità.

Il dispositivo è stato brevettato e ha raggiunto un livello di maturità tecnologica intermedio-avanzato, dimostrando la validità della soluzione proposta. I risultati ottenuti evidenziano il potenziale del dispositivo come strumento per la mobilità inclusiva e l'accesso al patrimonio turistico, in linea con gli obiettivi dei programmi Interreg, pur richiedendo ulteriori sviluppi per la piena industrializzazione e diffusione su larga scala.

Progettazione Meccanica / 362

Progettazione di metapiastre per il controllo della risposta post-buckling in strutture adattive

Author: Ludovico Musenich¹

Co-author: Flavia Libonati²

¹ *Università degli Studi di Genova*

² *University of Genoa*

Corresponding Authors: flavia.libonati@unige.it, ludovico.musenich@edu.unige.it

I recenti sviluppi nel campo dei metamateriali meccanici mostrano che il buckling può essere sfruttato come meccanismo funzionale per il controllo della risposta deformativa delle strutture. In questo contesto, la maggior parte delle ricerche si è concentrata sullo studio dell'instabilità elastica alla mesoscala, analizzando come il buckling locale di solidi cellulari possa essere utilizzato per ottenere proprietà meccaniche non convenzionali. Viceversa, risulta ancora limitata la comprensione della relazione tra l'architettura dei metamateriali meccanici e il buckling globale di strutture snelle da essi costituite, nelle quali l'instabilità elastica si sviluppa su scale di lunghezza maggiori ed è governata dalle proprietà equivalenti del continuo omogeneizzato e dalle condizioni al contorno. In particolare, sono ancora pochi i contributi che affrontano in maniera sistematica la caratterizzazione del legame tra i parametri geometrici dei materiali architettati e la risposta post-buckling di strutture bidimensionali quali le piastre sottili. Il presente lavoro contribuisce a colmare tali lacune analizzando il comportamento di metapiastre (i.e., piastre metamateriali) soggette a instabilità elastica globale, con particolare attenzione al controllo della risposta post-buckling, per il caso notevole di compressione uniassiale uniforme nel piano e metamateriale composto da un reticolo periodico a celle esagonali. Attraverso simulazioni numeriche agli elementi finiti viene studiata l'influenza dei principali parametri geometrici dell'architettura metamateriale, delle condizioni al contorno della piastra e delle proprietà del materiale di base sul suo comportamento a buckling e post-buckling. I risultati numerici sono quindi validati mediante prove sperimentali di compressione su prototipi realizzati tramite stampa 3D, consentendo un confronto diretto tra risposta prevista e comportamento osservato. I risultati della ricerca evidenziano come la progettazione dell'architettura interna delle metapiastre consenta di modulare sia la loro capacità portante, sia i loro pattern deformativi, aprendo nuove prospettive applicative nello sviluppo di dispositivi di protezione individuale, meccanismi cedevoli o profili alari adattivi attuati.

Progettazione Meccanica / 406

Multiphysics Optimization of an Aircraft Winglet via CFD–FEM Coupling and Radial Basis Function Mesh Morphing

Authors: Andrea Lopez¹; Flavio Di Fede¹; Marco Evangelos Biancolini²; Rocco Gentile¹; Ubaldo Cella³

¹ LAD INNOVATION MANAGEMENT & TECHNOLOGY LABS

² Università di Roma Tor Vergata

³ RBF Morph srl

Corresponding Authors: ubaldo.cella@rbf-morph.com, andrea.lopez01@leonardo.com, biancolini@ing.uniroma2.it, rocco.gentile@leonardo.com

Objectives

The installation of winglets on aircraft wings allows contributing in drag reduction and thus in reducing fuel consumption, with clear advantages in long range cruising. The working principle consists in recovering energy from the tip vortex to generate a force with a component in the forward direction. Their efficiency is then related to the intensity of the vortex. For this reason the benefit of winglets is more evident in highly loaded wings but with the drawback to introduce an increase in the global wing bending moment. This aspects render winglet aerodynamic design a particularly complex structurally constrained problem requiring a coupled aero-structural assessment. The objective of this is to develop a numerical methodology for the multi-physics optimization of an aircraft winglet, capable of simultaneously accounting for aerodynamic performance and structural constraints.

Methodology

The proposed approach is based on the coupling of CFD and FEM analyses and on the use of Radial Basis Function (RBF) mesh morphing techniques for geometric parametrization. Starting from a baseline configuration, the winglet geometry is smoothly modified through a morphing approach that simultaneously updates both the CFD and FEM models, enabling the generation of multiple design variants while preserving mesh quality and avoiding costly remeshing procedures. For each morphed configuration, a fluid–structure interaction (FSI) analysis is performed by iteratively coupling the aerodynamic and structural solvers until convergence is achieved. In this framework, aerodynamic loads are computed on the current deformed configuration and transferred to the structural model, whose response in turn updates the geometry used for the flow solution. This ensures a fully consistent aero-structural evaluation, in which both aerodynamic performance and structural response are assessed on the converged deformed state. The optimization process is then carried out by considering both aerodynamic and structural objectives and constraints.

Results

The methodology is applied to an industrial case study developed in collaboration with Leonardo Aircraft Division, focusing on the optimization of a winglet for a light aircraft. The results demonstrate the capability of the proposed approach to efficiently explore the design space and identify improved configurations with respect to the baseline design. In particular, a reduction in aerodynamic drag is achieved while maintaining structural responses within acceptable limits, confirming the effectiveness of the multi-physics framework.

Conclusions

The study shows that the integration of RBF-based geometric parametrization with coupled CFD–FEM analyses provides a consistent and efficient framework for aero-structural winglet optimization. The proposed methodology represents a valuable tool for integrated aeronautical design, enabling a systematic trade-off between aerodynamic performance and structural integrity. The approach can be further extended to more complex configurations and industrial applications characterized by high design variability.

Progettazione Meccanica / 418

Prove di flessione a fondo dente di ingranaggi per applicazioni elicotteristiche

Author: Luca Bonaiti¹

Co-authors: Carlo Gorla ¹; Sergio Sartori ²

¹ *Dipartimento di Meccanica - Politecnico di Milano*

² *Helicopter Division, Leonardo S.p.A*

Corresponding Authors: sergio.sartori@leonardo.com, luca.bonaiti@polimi.it, carlo.gorla@polimi.it

A causa delle elevate prestazioni in termini di densità di potenza e di coppia, nonché dei requisiti di sicurezza dei riduttori principali degli elicotteri, gli ingranaggi devono essere progettati sulla base di metodologie validate e dati affidabili. Sebbene, in termini generali, la fatica a flessione non rappresenta solitamente il modo di danneggiamento più critico per gli ingranaggi aeronautici, la conoscenza accurata dei margini di sicurezza è fondamentale, a causa delle conseguenze catastrofiche associate al suo verificarsi. In particolare, i dati di resistenza a fatica del materiale devono essere pienamente rappresentativi dell'esperienza specifica e delle pratiche del costruttore, includendo gli effetti di diversi parametri legati alla geometria, alla produzione, ai trattamenti termici e meccanici e ai processi di finitura.

Il presente lavoro sintetizza numerose campagne di prove condotte su ingranaggi destinati a trasmissioni elicotteristiche. Obiettivo di queste prove è caratterizzare la resistenza a fatica flessionale al piede del dente e di costruire una base dati sperimentale rappresentativa dei materiali, dei trattamenti termici e meccanici, dei processi di finitura e delle soluzioni produttive adottate per componenti aeronautici.

La campagna sperimentale è stata svolta mediante prove di flessione a singolo dente (altresì chiamate prove pulsatore), impiegando provini dentati rappresentativi dell'effettivo ciclo produttivo. Sono stati considerati ingranaggi cementati, nitrurati e realizzati con altri acciai ad alta resistenza, includendo varianti legate a rettifica del piede, shot peening, superfinishing isotropico, cleanliness e differenti trattamenti termici. Per ciascuna famiglia sono state eseguite prove di fatica distribuite lungo la curva S-N, con run-out fissato a 10 milioni di cicli, integrate da prove statiche per la valutazione del carico ultimo.

Nel complesso sono state eseguite più di 650 prove di fatica, per un totale superiore a 3 miliardi di cicli. I risultati mostrano differenze significative tra le famiglie di materiali e tra le varianti di processo. Tra gli ingranaggi cementati, gli acciai ad elevata cleanliness hanno fornito i livelli di resistenza più elevati, con un ulteriori incrementi associati alla combinazione di shot peening e superfinishing isotropico. Per gli ingranaggi nitrurati, il materiale 32CDV13 ha mostrato prestazioni particolarmente favorevoli, mentre lo shot peening ha confermato la propria efficacia anche su dentature nitrurate. La rettifica del piede del dente ha prodotto un effetto positivo sia per la riduzione della tensione nominale sia per il miglioramento delle condizioni superficiali. I valori sperimentali ottenuti risultano ben superiori a quelli generalmente proposti dagli standard, confermando il ruolo determinante della qualità del materiale e del controllo del processo produttivo.

La campagna sperimentale ha permesso di costruire un database esteso e coerente di curve S-N per ingranaggi elicotteristici, utile per la qualificazione di materiali, processi e configurazioni progettuali. Alcuni risultati della campagna sono stati presentati in conferenze dedicate agli ingranaggi o al settore elicotteristico; tuttavia una sintesi completa dell'intera campagna sperimentale non è stata ancora presentata alla comunità scientifica italiana. L'obiettivo del presente contributo è quindi riassumere i risultati dell'intera campagna, confrontarli e discuterli, includendo gli approcci utilizzati per definire i diagrammi S-N impiegati nella progettazione di ingranaggi per riduttori elicotteristici.

Progettazione Meccanica / 430

Caratterizzazione meccanica di giunti ibridi ottenuti mediante giunzione termica diretta (thermal direct joining)

Authors: Chiara Morano¹; Luigi Bruno²; Marco Alfano³

¹ *Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Energetica e Gestionale, Università della Calabria*

² DIMEG - UNICAL³ UniMore - DISMI**Corresponding Authors:** chiara.morano@unical.it, luigi.bruno@unical.it, marco.alfano@unimore.it

In diversi ambiti industriali, tra cui quello automobilistico, aeronautico e robotico, emerge con crescente evidenza l'esigenza di ridurre i consumi energetici al fine di limitare le emissioni di CO₂. Una strategia efficace per raggiungere tale obiettivo consiste nella sostituzione dei componenti metallici con materiali leggeri, come polimeri e compositi. Tuttavia, questa scelta implica la necessità di sviluppare tecniche di giunzione in grado di preservare le proprietà dei nuovi materiali senza incrementare il peso complessivo della struttura.

Le soluzioni tradizionali (e.g., bulloni e rivetti) risultano inadatte, poiché possono compromettere l'integrità dei compositi e comportano un aumento di massa, riducendo così i benefici derivanti dall'impiego di materiali leggeri. Un'alternativa interessante è rappresentata dalle giunzioni incollate; tuttavia, in alcuni contesti industriali, l'utilizzo di adesivi termoindurenti solleva criticità di natura ambientale, sia in fase di produzione sia di smaltimento.

Un approccio potenzialmente più sostenibile è la giunzione termica diretta, che sfrutta il polimero stesso come elemento di collegamento. Mediante l'apporto di calore nella zona di contatto, il polimero viene portato a uno stato semifuso, consentendo la formazione del legame con il substrato metallico. Questo metodo permette di ottenere giunti leggeri, reversibili e riciclabili, in linea con i principi dell'economia circolare. Tuttavia, l'efficacia di tali giunzioni può essere limitata a causa della scarsa resistenza dell'interfaccia di collegamento, con conseguente riduzione delle prestazioni meccaniche. Studi recenti hanno dimostrato che l'impiego di opportuni trattamenti superficiali, in grado di favorire l'interlocking meccanico tra i substrati, rappresenta una soluzione efficace per migliorare la tenacità e la resistenza al danno dei giunti. In particolare, ricerche precedenti condotte dagli autori hanno evidenziato come un trattamento laser opportunamente ottimizzato consenta di incrementare significativamente la resistenza a taglio e a pelatura di giunti alluminio-polimero. Sulla base dei risultati ottenuti nei lavori precedenti, si è deciso di estendere la ricerca a nuove soluzioni progettuali. In particolare, nel presente lavoro si valuta la resistenza a taglio di giunti acciaio-composito realizzati mediante giunzione termica diretta. A tal fine, sono stati selezionati un acciaio per applicazioni automobilistiche e un composito a matrice polimerica (PETG+CF) come materiali di base. I substrati compositi sono stati prodotti tramite stampa 3D e le proprietà del materiale sono state determinate attraverso una campagna sperimentale. I substrati metallici sono stati trattati mediante marcatura laser al fine di migliorare la resistenza del giunto. Il trattamento è stato ottimizzato sull'acciaio partendo dai risultati già ottenuti sull'alluminio nei lavori precedenti. I risultati hanno mostrato un incremento significativo della resistenza a taglio grazie al trattamento laser.

Xtrema / 345

Optimization of density distribution in protective foams for motorcycle helmets

Author: Marco Sasso¹**Co-authors:** Carlo Sabbatini ¹; Giacomo Zandri ²; Marco Rossi ¹¹ Università Politecnica delle Marche² Università degli studi eCampus**Corresponding Authors:** c.sabbatini@pm.univpm.it, giacomo.zandri@studenti.uniecampus.it, m.rossi@univpm.it, m.sasso@univpm.it

This work investigates the application of variable-density polymeric foams for energy absorption. The study is based on the possibility, developed within a PRIN research project, of controlling the density of a porous component with high flexibility through additive manufacturing technologies: a printing head equipped with a microfluidic nozzle deposits a biphasic "ink" consisting of a polymeric agent and an emulsifier with variable composition.

The case study considered is that of a motorcycle helmet, where the main energy-absorbing layer is typically made of EPS foam with uniform density, usually in the range of 80–100 kg/m³. For homologation purposes, helmets are subjected to multiple impact tests according to the ECE 22-06 regulation, which requires the evaluation of parameters related to the acceleration experienced by

the head center of mass.

The material properties were characterized through compression tests at different strain rates on specimens with uniform density. The experimental results were used to calibrate a Crushable Foam constitutive model, with volumetric hardening and strain-rate sensitivity, implemented in tabular form within the Abaqus/Explicit finite element environment. Validation tests were carried out on multilayer specimens with different densities, showing good agreement between numerical and experimental load–deformation curves.

The resulting constitutive model was then used in a numerical procedure aimed at optimizing the density distribution in the liner of a size J motorcycle helmet. The density field was described through 12 shape functions defined in spherical coordinates (radius, azimuthal angle, and polar angle), each associated with a weighting coefficient, along with a parameter representing the average density. The design space was explored using 200 sampling points generated through a Latin Hypercube approach. For each configuration, 7 different impact scenarios against a rigid surface were simulated, and three key performance indicators were evaluated: HIC (Head Injury Criterion), BrIC (Brain Injury Criterion), and MaxG.

The simulation results were used to build a surrogate model based on 21 feedforward neural networks, one for each impact and metric, each with two hidden layers of 10 neurons. The networks were trained using a 75/15/15 split into training, validation, and test sets, with L2 regularization and early stopping to prevent overfitting. The surrogate model was then coupled with genetic optimization algorithms to identify the optimal density distribution configuration. The predicted optimal solution was finally validated through finite element simulations, showing excellent agreement with the surrogate model predictions.

Xtrema / 348

Valutazione dell'influenza dello strain rate sulla risposta plastica anisotropa della lamiera d'alluminio 6016-T4

Authors: Maria Caterina Fioretti¹; Matteo Anedda¹

¹ *Università Politecnica delle Marche*

Corresponding Authors: m.c.fioretti@pm.univpm.it, m.anedda@pm.univpm.it

Contesto I laminati in lega leggera d'alluminio, come ad esempio quelli appartenenti alla serie 6000, mostrano una pronunciata anisotropia in direzione planare e normale, derivante dal processo di laminazione. Sebbene questo comportamento sia stato ampiamente investigato in condizioni di carico quasi-statico, risultano ancora limitate le informazioni riguardanti una possibile influenza dello strain rate.

Metodo Nel presente lavoro viene valutata la dipendenza dell'anisotropia plastica dallo strain rate in lamiere di alluminio AA6016-T4 di spessore pari a 1.02 mm, su un ampio intervallo di velocità di deformazione compreso tra 10^{-3} s⁻¹ a 10^3 s⁻¹. In particolare, per le prove dinamiche sono stati impiegati metodi di carico impulsivo ottenuti mediante torre di caduta e barra di Hopkinson. Inoltre, tutte le prove di trazione uniassiale sono state condotte considerando tre diversi orientamenti dei provini rispetto la direzione di laminazione (0°, 45°, 90°). I dati sperimentali raccolti sono stati utilizzati per valutare l'evoluzione dei coefficienti di Lankford e la forma del locus di snervamento a fissati valori del lavoro plastico.

Risultati I risultati ottenuti indicano una riduzione sistematica dei coefficienti di Lankford all'aumentare dello strain rate per i diversi orientamenti considerati. Dalla analisi delle curve di flusso plastico (hardening) è stato possibile confermare una generale insensibilità della lega allo strain rate. Infine, i dati sperimentali di tensione di snervamento e dei coefficienti Lankford sono stati utilizzati per calibrare differenti criteri di snervamento anisotropi, consentendo di valutare l'evoluzione della superficie di snervamento al variare dello strain rate.

Conclusioni I risultati forniscono nuove informazioni sperimentali sull'interazione tra la sensibilità alla velocità di deformazione e l'anisotropia plastica nelle lamiere di alluminio AA6016-T4. Essi contribuiscono a una caratterizzazione più accurata della plasticità anisotropa in condizioni di carico di-

namico e possono supportare lo sviluppo di modelli costitutivi migliorati utilizzabili per simulazioni numeriche di formatura e di crash.

Keywords Caratterizzazione dell'anisotropia, Sensibilità allo strain-rate, AA6016-T4, Coefficienti di Lankford, Locus di snervamento

Xtrema / 359

Caratterizzazione visco-plastica e del danneggiamento duttile strain-rate dependent nella zona termicamente alterata (HAZ) di leghe AA6005-T6 mediante DIC e identificazione FEM inversa

Authors: Alessandro Rovinelli¹; Gianluca Chiappini²; Mattia Utzeri^{None}

¹ *Univerità Politecnica delle Marche*

² *Università eCampus*

Corresponding Authors: s1121806@studenti.univpm.it, gianluca.chiappini@uniecampus.it, m.utzeri@staff.univpm.it

Il lavoro presenta uno studio sperimentale e numerico del comportamento visco-plastico e dell'evoluzione del danneggiamento duttile della zona termicamente alterata (Heat-Affected Zone, HAZ) in lamiere di lega di alluminio AA6005-T6, utilizzate in applicazioni di crash ferroviario, con particolare riferimento alla deformazione a rottura (failure strain) e alla sua dipendenza dallo stato tensionale e dallo strain rate.

La caratterizzazione è stata condotta mediante prove di trazione, su provini standard, su provini intagliati (notched) e di tipo Dreimeier, progettati per generare differenti stati tensionali, in condizioni sia quasi-statiche che dinamiche. Le prove ad alta velocità sono state eseguite mediante barra di Hopkinson, consentendo di investigare un ampio intervallo di strain rate. I campi di deformazione sono stati acquisiti tramite Digital Image Correlation (DIC), permettendo una valutazione locale dell'evoluzione della deformazione e dell'innescio del danneggiamento.

È stata sviluppata una procedura di identificazione inversa agli Elementi Finiti, in grado di individuare in maniera non distruttiva la posizione del cordone di saldatura e di ricostruire la distribuzione spaziale delle proprietà meccaniche all'interno della HAZ.

Per la modellazione del materiale sono stati sviluppati due approcci distinti: (i) un modello equivalente, rappresentativo del comportamento medio della HAZ, e (ii) un modello discretizzato, in cui le proprietà meccaniche variano spazialmente con passo di 0.5 mm, al fine di catturare i gradienti microstrutturali.

I risultati evidenziano come la presenza della HAZ influenzi significativamente sia la risposta visco-plastica sia la deformazione a rottura, con effetti dipendenti dallo stato tensionale e dallo strain rate. Il confronto tra modello equivalente e modello discretizzato è stato utilizzato per valutare l'accuratezza di modelli numerici basati su mesh relativamente grossolane, nelle quali non è possibile rappresentare esplicitamente la variabilità spaziale del materiale, e per definire criteri operativi per l'impiego di modelli equivalenti nella simulazione efficiente di componenti saldati soggetti a carichi dinamici.

Xtrema / 365

Descriptor-Based Inverse Design of Periodic Truss Lattices under Impact Loading

Author: Salvatore Annunziata¹

Co-authors: Andrea Manes¹; Luca Lomazzi¹

¹ *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: salvatore.annunziata@polimi.it, luca.lomazzi@polimi.it, andrea.manes@polimi.it

Periodic truss lattices are increasingly considered for lightweight impact-mitigation applications because their macroscopic mechanical response can be tailored through a limited set of geometric parameters. However, their practical design presents two main issues: the computational cost required to generate large and consistent simulation datasets, and the difficulty of solving the inverse problem, namely identifying the unit-cell parameters that yield a target structural response. In this work, an automated framework is presented for the generation of simulation-ready datasets and for the inverse design of periodic truss lattices under dynamic compression. The workflow is implemented in MATLAB and integrates parametric geometry generation, finite-element model export, automated post-processing of stress-strain curves, and training of a Unit-cell Optimization Network (UON). The study focuses on Kelvin and octagonal periodic lattices, for which the mechanical response is reduced to four descriptors: initial stiffness, plateau stress, densification strain, and absorbed energy. These quantities are then used as inputs to a mixed inverse-design model combining regression for strut thickness and classification for unit-cell size. The generated dataset showed clear and physically meaningful trends across the sampled design space, confirming the suitability of the adopted descriptors for learning-based inverse design. After automated cleaning, 1580 valid simulations were retained for training and evaluation. Overall, the results demonstrate that the proposed framework provides a scalable and reproducible strategy for the inverse design of periodic lattice metamaterials, significantly reducing manual intervention while enabling accurate recovery of unit-cell parameters from target mechanical performance.

Xtrema / 386

Hardening Curves of Polycarbonate at Quasistatic-to-High Strain Rates

Authors: Giuseppe Mirone¹; Raffaele Barbagallo²; Giuseppe Bua³

¹ *University of Catania -Italy*

² *Università degli Studi di Catania*

³ *University of Catania*

Corresponding Authors: raffaele.barbagallo@unict.it, giuseppe.bua@phd.unict.it, giuseppe.mirone@unict.it

Abstract

The polycarbonate exhibits a very special deformation mode in tensile tests, as the plastic strain firstly flows uniformly, then localizes at a neck section, then propagates all along the specimen until the necking vanishes, and finally flows again uniformly until failure.

This feature poses significant challenges in the characterization of the hardening of polycarbonate, as different experimental measurements of stress and strain are possible on the same specimen, leading to different resulting curves subjected to different undesired disturbances from the surrounding environment.

This paper firstly analyzes three possible strategies for the experimental derivation of the true stress - true strain curves, identifying the one less prone to external spoiling effects. Then it also proposes a corrective function to transform such “true curve” into an estimate of the effective flow curve, by accounting for the stress triaxiality induced by the necking and by the peculiar propagative straining mode of polycarbonate.

A set of True curves and corrected Flow curves is then derived at different strain rates including quasistatic, low, medium and high rates, referring to data from a dedicated experimental campaign and from the literature.

Finite elements simulations of the experimental tests are also provided in this work, confirming the suitability of the proposed procedure to derive the static and dynamic hardening curves of polycarbonate.

Keywords: Polycarbonate; Necking; Flow stress, True stress, Hardening,
References

[1] Mirone G., Barbagallo R., Bua G., (2025), Experimental characterization and plastic modeling of polycarbonate at static and dynamic rates, International Journal of Impact Engineering, Volume 203,

10532.

[2] G'sell C., Aly-Helal N.A., Jonas J.J., (1983) Effect of stress triaxiality on neck propagation during the tensile stretching of solid polymers, *J Mater Sci*, 18.

[3] Rittel D. Dorogoy A. (2008), A methodology to assess the rate and pressure sensitivity of polymers over a wide range of strain rates,

[4] Dorogoy A., Rittel D. (2015), Effect of confinement on thick polycarbonate plates impacted by long and AP projectiles, *International Journal of Impact Engineering* 76

Xtrema / 404

Numerical investigation of the influence of impact angle on the protective effectiveness of advanced ballistic protections with bulging effect

Authors: Massimo Di Fulvio¹; Luca Lomazzi²; Andrea Manes³

¹ *Politecnico Di Milano*

² *Politecnico di Milano; Department of Mechanical Engineering*

³ *Politecnico of Milano*

Corresponding Authors: andrea.manes@polimi.it, massimo.difulvio@polimi.it, luca.lomazzi@polimi.it

Long-rod kinetic penetrators, composed of high density materials such as tungsten heavy alloys (WHA), are designed to deliver large amounts of kinetic energy to an extremely concentrated area of the target, traveling at velocities exceeding 1000 m/s. Advanced multilayer protections with bulging effect are designed to counter this threat, disrupting the projectile by deforming in two opposite directions, owing to their sandwich structure (high-resistance steel encapsulates lower density materials, such as rubber). These deformations act upon the slender impactor, inducing erosion and fragmentation, thus drastically reducing the capability of the threat to penetrate the underlying protection (generally made by armour steel). However, the effect of the obliquity angle on protective performance has not been systematically characterized.

This work investigates how the obliquity angle affects the protective performance in terms of kinetic energy absorption and projectile fragmentation through a parametric finite element study validated against the literature. The model represents a three-layer bulging armour (RHA, Rolled Homogeneous Armour front plate / natural rubber interlayer / RHA backing plate) subjected to impact by a WHA long-rod penetrator ($L/D = 20$).

The results show that increasing the obliquity angle (thereby extending the interaction between the projectile and the armour) leads to a non-linear increase in kinetic energy dissipation and a markedly different fragmentation morphology of the impactor. The kinetic energy dissipation is unaffected by the impact angle up to 30°; beyond this threshold, the absorbed kinetic energy increases exponentially, and the armour is fully able to stop the threat when the impact angle is 82.5 degrees. In all the considered scenarios, the projectile does not ricochet off the armour and completely perforates the front RHA plate.

Xtrema / 250

On the applicability of nonlinear inverse FEM for shape sensing of plates under blast loading

Author: Jacopo Bardiani¹

Co-authors: Giovanni Marchesi ²; Andrea Manes ²; Claudio Sbarufatti ; Hung Chih Wu Chen ²

¹ *Politecnico of Milano*

² *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: claudio.sbarufatti@polimi.it, andrea.manes@polimi.it, jacopo.bardiani@polimi.it, giovanni.marchesi@polimi.it

The inverse Finite Element Method (iFEM) is a robust and efficient technique for reconstructing full-field displacements from sparse strain measurements, requiring only structural geometry, boundary conditions, and sensor data—without relying on material properties or external load information. This load-independence makes iFEM attractive for Structural Health Monitoring (SHM) and Digital Twin (DT) frameworks, yet its applicability to highly transient, large-deformation events remain less explored. In this work, we assess the use of a nonlinear iFEM formulation for real-time shape sensing of plates subjected to blast loading, where geometric nonlinearity, membrane–bending coupling, and steep spatial gradients can undermine linear reconstruction. The proposed approach embeds geometrical nonlinearity within the inverse least-squares finite element framework to improve reconstruction fidelity during impulsive response and post-peak oscillations. A systematic numerical campaign is performed on representative blast-driven plate configurations, varying boundary conditions, sensor layouts, and measurement noise, and benchmarking reconstructions against high-fidelity finite element simulations. Results indicate that the nonlinear iFEM markedly enhances displacement field accuracy compared with linear iFEM, particularly when large deflections dominate and when sensor networks are sparse. The study further quantifies sensitivity to instrumentation strategies, highlighting conditions under which nonlinear iFEM provides stable, near real-time reconstructions suitable for blast-resilient structures and DT-enabled decision support.

Xtrema / 253

On the Numerical Modelling of Blast Loading: Accuracy and Modelling Choices

Author: Giovanni Marchesi¹

Co-authors: Edison Shehu¹; Luca Lomazzi¹; Trevor John Cloete²; Andrea Manes¹

¹ *Politecnico di Milano, Dipartimento di Meccanica*

² *Blast Impact and Survivability Research Unit (BISRU), Department of Mechanical Engineering, University of Cape Town*

Corresponding Authors: trevor.cloete@uct.ac.za, andrea.manes@polimi.it, giovanni.marchesi@polimi.it, luca.lomazzi@polimi.it, edison.shehu@polimi.it

Blast loading represents a challenging scenario for numerical modelling, as it involves highly non-linear, high-intensity and short-duration events, typically at scales that are too small to resolve with practical numerical discretization and further complicated by material behaviour and strain-rate effects. Even for relatively simple structural configurations, obtaining consistent agreement between simulations and experiments requires a nuanced modelling approach.

This work investigates the numerical modelling of blast-loaded plates with a specific focus on the influence of modelling choices on predictive accuracy. A computational framework is developed and assessed against laboratory-scale blast experiments, involving steel plate specimens of different thicknesses and subjected to various load intensities. The experimental dataset is relatively large and varied in comparison with what is typically available in the literature, and includes high strain rate characterization data, thus providing a broad and detailed benchmark. Particular attention is devoted to numerical parameters governing shock wave propagation and to the calibration of constitutive models, as these play a key role in the consistency of the simulations. The results show that the loading is reproduced with good accuracy, with impulse predictions within a few percent across the range of conditions considered. The structural response is captured with a typical error of approximately 8%, preserving the correct trends and scaling observed experimentally.

Overall, the study highlights the role of modelling choices in increasing the accuracy of blast simulations and demonstrates that consistent predictions can be achieved when these aspects are properly addressed.

Xtrema / 268

High strain rate constitutive and fracture characterization of AA6065-T6 sheet under various stress states

Authors: Mattia Utzeri¹; Gianluca Chiappini²; Marco Rossi¹; Marco Sasso¹

¹ *Università Politecnica delle Marche*

² *Università eCampus*

Corresponding Authors: m.sasso@univpm.it, gianluca.chiappini@uniecampus.it, m.utzeri@univpm.it, m.rossi@univpm.it

The strain rate- and stress state-dependent fracture behavior of high-strength AA6005-T6 aluminum sheet is characterized experimentally and numerically. Tests employed shear, hole tension, and notch tension specimens across strain rates of 10–310–3 to 500 s–1500 s–1. Positive strain rate sensitivity emerged in axial force responses for hole and notch tension specimens, with fracture limits increasing at higher rates. A temperature- and strain rate-dependent Johnson-Cook model captures flow stress dependence on equivalent plastic strain, strain rate, and temperature. An isotropic modified Hosford criterion accounts for the J3J3 effect on yield stress, while a strain rate-extended Mohr-Coulomb model predicts fracture initiation.

Xtrema / 275

Experimental and Finite Element Investigation of Glass-Fiber Composite Plates under Shock Loading

Authors: Edison Shehu¹; Luca Lomazzi¹; Vegard Aune²; Andrea Manes³

¹ *Politecnico di Milano; Department of Mechanical Engineering*

² *Norwegian University of Science and Technology*

³ *Politecnico di Milano*

Corresponding Authors: edison.shehu@polimi.it, andrea.manes@polimi.it, luca.lomazzi@polimi.it

The increasing demand for lightweight structures across various engineering sectors has driven a significant surge in the use of composite materials. However, predicting the behaviour of these materials under extreme conditions remains a critical challenge. Composite materials are inherently difficult to model due to their anisotropic behaviour, layered architecture, and complex damage mechanisms. Furthermore, blast and shock loading present additional analytical difficulties owing to their highly dynamic nature. Despite these critical issues, the literature concerning composite plates subjected to shock loading remains strictly limited. To bridge this gap, this work presents a comprehensive experimental and numerical study on glass-fibre-reinforced composite plates exposed to shock loads. The experimental campaign encompasses tests at varying pressure levels to evaluate the structural response under escalating loading severity. Concurrently, finite element models have been developed to replicate the experiments and assess their accuracy in capturing the key features of the structural response. A rigorous comparison between empirical data and simulations is employed to gauge the effectiveness of the numerical approach and to deepen the understanding of composite behaviour under shock.

Xtrema / 302

Modellazione e sperimentazione di esplosioni subacquee: sviluppo di un banco prova in scala ridotta

Author: Martina Scapin¹

Co-authors: Lorenzo Peroni ¹; M. Beltramo ¹

¹ *Politecnico di Torino*

Corresponding Authors: martina.scapin@polito.it, lorenzo.peroni@polito.it

Le esplosioni sottomarine (UNDEX, Underwater Explosions) rappresentano uno dei fenomeni fisici più complessi e allo stesso tempo rilevanti per l'ingegneria navale, offshore, civile e militare. Esse producono effetti dinamici che differiscono in modo sostanziale dalle esplosioni atmosferiche a causa delle proprietà fisiche dell'acqua, che presenta elevata densità e scarsa comprimibilità. Queste caratteristiche rendono l'onda d'urto generata in ambiente subacqueo particolarmente intensa e distruttiva, con un potenziale di danno significativamente superiore rispetto a un'esplosione in aria. La comprensione e la modellazione di questi fenomeni sono fondamentali per la progettazione di strutture resistenti e per la valutazione della vulnerabilità di navi, sommergibili, impianti sottomarini e infrastrutture costiere.

Un'esplosione sottomarina dà origine a due fenomeni fisici principali: una violenta onda d'urto iniziale e la formazione di una bolla di gas, prodotta dalla detonazione dell'esplosivo, che pulsa ciclicamente. Questi due effetti si manifestano su scale temporali differenti, presentano dinamiche fisiche distinte e vengono spesso studiati separatamente per facilitarne l'analisi.

Di norma, gli ingegneri affrontano le problematiche legate alle esplosioni mediante simulazioni numeriche avanzate che, allo stato dell'arte, consentono di riprodurre con buona accuratezza l'interazione tra il dominio fluido e il dominio strutturale. Attraverso tecniche di accoppiamento fluido-struttura (FSI) è infatti possibile descrivere gli effetti dell'onda d'urto sulle strutture coinvolte, valutandone la risposta dinamica e gli eventuali meccanismi di danneggiamento. In questo contesto, l'impiego di software espliciti specializzati, come LS-DYNA, rappresenta uno strumento fondamentale per l'analisi di fenomeni altamente non lineari e caratterizzati da tempi di evoluzione estremamente ridotti. Tali strumenti permettono di ottenere risultati con un elevato livello di accuratezza, ma richiedono competenze specifiche sia nella definizione dei modelli numerici sia nell'interpretazione dei risultati. Le principali difficoltà derivano dalla notevole variabilità degli scenari che possono presentarsi, dalla complessità delle interazioni fisiche coinvolte e dalla sensibilità delle simulazioni ai parametri di input. Inoltre, la previsione degli effetti di un'esplosione tramite sole formulazioni analitiche risulta spesso limitata dalle inevitabili semplificazioni introdotte nei modelli teorici.

La sperimentazione in questo ambito risulta particolarmente complessa sia dal punto di vista tecnico sia da quello economico e logistico. I dati sperimentali disponibili nella letteratura tecnico-scientifica sono spesso limitati, difficilmente reperibili oppure soggetti a restrizioni e classificazioni, soprattutto nel caso di applicazioni in ambito militare o strategico. Di conseguenza, lo sviluppo di competenze affidabili nell'utilizzo degli strumenti di simulazione richiede la disponibilità di sistemi sperimentali controllati e ripetibili. In tale prospettiva, risulta particolarmente utile disporre di sistemi di prova in scala ridotta da impiegare in ambiente di laboratorio, finalizzati allo sviluppo e alla validazione di metodologie, modelli numerici e strumenti di analisi. In questo lavoro viene quindi affrontato lo sviluppo di un sistema sperimentale in scala ridotta per la riproduzione di esplosioni subacquee, con l'obiettivo di supportare lo sviluppo delle competenze ingegneristiche e il miglioramento dei tool di simulazione numerica.

Xtrema / 333

Analisi degli effetti della velocità di deformazione sul comportamento di una ghisa sferoidale in diverse condizioni di carico

Authors: Maria Caterina Fioretti¹; Matteo Anedda¹

¹ *Università Politecnica delle Marche*

Corresponding Authors: m.c.fioretti@pm.univpm.it, m.anedda@pm.univpm.it

Il presente lavoro analizza in dettaglio il comportamento meccanico di una ghisa sferoidale, materiale di crescente interesse grazie ai numerosi vantaggi rispetto alle ghise tradizionali e alla limitata

disponibilità in letteratura di dati relativi al suo comportamento ad elevate velocità di deformazione, in particolare in condizioni di carico non uniassiali.

La caratterizzazione sperimentale è stata condotta mediante prove di trazione, compressione e torsione, eseguite a diverse velocità di deformazione. Le prove in regime quasi statico sono state effettuate tramite una macchina di trazione/torsione, mentre i test dinamici sono stati condotti mediante una barra di Hopkinson, a trazione/ torsione. Per le elaborazioni sono state usate tecniche di analisi di immagine, tra cui la Digital Image Correlation (DIC).

I risultati della campagna sperimentale hanno evidenziato una marcata sensibilità del materiale alla velocità di deformazione, nonché un comportamento asimmetrico tra trazione e compressione, con differenti valori della tensione di snervamento e del coefficiente di incrudimento nelle due condizioni di carico.

Sulla base dei dati sperimentali ottenuti, il comportamento del materiale è stato modellato e implementato in un codice a elementi finiti, al fine di consentire simulazioni numeriche accurate in differenti condizioni di carico.

Xtrema / 420

Influence of Controlled Disorder on the Crushing Performance of Hexagonal Lattice Metamaterials

Author: Luca Lomazzi¹

Co-authors: Alessandro Lucchetti¹; Andrea Manes²

¹ *Politecnico di Milano*

² *Politecnico of Milano*

Corresponding Authors: luca.lomazzi@polimi.it, alessandro.lucchetti@polimi.it, andrea.manes@polimi.it

Lattice metamaterials are widely investigated as efficient lightweight energy-absorbing structures because their mechanical response can be tailored through geometry. Among them, out-of-plane extruded hexagonal lattices represent the benchmark configuration against which novel architectures for progressive collapse under compressive loading are evaluated. Most studies focus on periodic or random configurations, and deviations from nominal geometric parameters are treated as manufacturing defect that need to be limited, rather than as a source of controllable design parameter. This limits the understanding of how deviations from periodicity affect collapse mechanisms, stress transmission, and energy absorption.

In this work, controlled disorder is introduced as a design choice, and applied to an extruded hexagonal lattice to assess its influence on the crushing performance of the metamaterial. Starting from a nominal honeycomb configuration, disorder is introduced by perturbing the nominal metamaterial geometry. Disordered variants are generated while preserving the overall footprint, average geometric properties, and relative density. The resulting architected structures are first investigated through numerical simulations, where the full stress-strain response is used to compare the nominal and disordered configurations in terms of peak response, plateau stress, densification behavior, and specific energy absorption. Then, experimental drop-tower tests on additively manufactured nominal and disordered representative configurations are carried out.

The experimental and numerical observations bring evidence that controlled disorder can be introduced to tune the crushing response of metamaterials for energy absorption. The outcome is a mechanical assessment of disorder as a practical design variable for programming energy absorption in lightweight metamaterial structures.

Xtrema / 424

Influenza della temperatura sui meccanismi di innesco del danno duttile in condizioni di impatto

Authors: Andrew Ruggiero¹; Gabriel Testa²; Gianluca Iannitti³; Nicola Bonora¹; Sara Ricci³

¹ *Università di Cassino e del Lazio Meridionale*

² *Università degli Studi di Cassino*

³ *Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale*

Corresponding Authors: sara.ricci@unicas.it, gabriel.testa@unicas.it, g.iannitti@unicas.it, bonora@unicas.it, a.ruggiero@unicas.it

L'obiettivo del seguente lavoro è quello di investigare sperimentalmente l'influenza della temperatura nello sviluppo dei meccanismi di danneggiamento del rame OFHC ad alte pressioni e velocità di deformazione. A tal fine, sono state condotte prove di impatto simmetrico Rod-on-Rod (RoR) tramite un cannone a gas leggero a singolo stadio per diverse velocità e temperature controllate. Durante il processo di deformazione il proiettile impatta su un campione identico, risultando in un estremo processo deformativo accompagnato da elevate velocità di deformazione (~105-106/s), e valori di triassialità dello stato di sforzo elevati. In queste condizioni, i picchi di triassialità che si sviluppano all'interno del campione favoriscono lo sviluppo di danno duttile tramite void nucleation and growth lungo l'asse del provino. Sebbene i meccanismi di danno nel Cu OFHC in condizioni dinamiche siano noti in letteratura, l'influenza della temperatura su tali processi rimane ancora non completamente compresa. Attraverso l'integrazione di risultati sperimentali e simulazioni numeriche, il presente studio valuta l'effetto della temperatura sulla nucleazione del danno e sul livello critico di deformazione in condizioni di impatto, fornendo nuovi elementi per la modellazione del comportamento dei materiali in regime dinamico estremo.

Xtrema / 443

Experimental Investigation of the shock response of energetic materials simulants

Author: Andrea Ceccacci¹

Co-authors: Alexander Rack²; Bratislav Lukić³; David Pedroche⁴; Federico Sket⁵; Francesca Antonella Sepúlveda⁵; Javier García-Molleja⁵; José Antonio Rodríguez-Martínez⁴; Nicola Bonora⁶; Sergio Puerta⁴; Thomas Virazels⁴

¹ *Università degli studi di Cassino e del Lazio meridionale*

² *ESRF-The European Synchrotron*

³ *Institut Max von Laue-Paul Langevin (ILL)*

⁴ *Universidad Carlos III de Madrid*

⁵ *IMDEA Materials Institute*

⁶ *Università di Cassino e del Lazio Meridionale*

Corresponding Authors: bonora@unicas.it, andrea.ceccacci@unicas.it

Energetic materials are substances that undergo rapid chemical reactions when subjected to an appropriate stimulus, releasing substantial amounts of energy, heat, and gas. This class of materials finds various applications, including pyrotechnics, explosives, and rocket propellants. Energetics are intrinsically linked to shock wave propagation phenomena: while their chemical reaction often induces the formation and propagation of a shock front within the medium, a shock-loading stimulus can, conversely, trigger the reaction of an initially undisturbed material. Consequently, this work aims to investigate the shock response of these materials, with a particular focus on mesostructural evolution under dynamic loading conditions.

Because experimental investigations involving energetic materials pose inherent safety risks to personnel, inert surrogate materials are frequently employed as a mitigation strategy. Additionally, the adoption of energetic simulants permits the decoupling of the mechanical response from the chemical reaction of the energetic crystals. In this study, plate impact experiments were performed on specimens composed of sucrose crystals embedded within a polymer binder. This inert simulant was designed to mimic the structure and behavior of a polymer-bonded explosive (PBX); specifically, the energetic crystals were replaced by granular sucrose dispersed in a polydimethylsiloxane (PDMS) binder at an 80:20 sucrose-to-binder mass ratio.

Various impact velocities and crystal particle sizes were investigated. Photonic Doppler Velocimetry (PDV) measurements were conducted to record the rear-surface velocity of the specimens, thereby extracting quantitative data regarding the material's shock response. Furthermore, a subset of tests was performed at the ID19 beamline of the European Synchrotron Radiation Facility (ESRF), where high-rate X-ray phase contrast imaging enabled the in-situ observation of structural evolution, tracking microstructural features across the propagating shock front. This approach proved particularly valuable, as complex mesostructures and heterogeneities at relevant volumetric scales often dominate the dynamic material response. The coupling of in-situ imaging and velocimetry applied to energetic simulants constitutes a novel contribution to the field, providing both qualitative and quantitative insights into mesostructural evolution and the distinct influences of impact velocity, particle size, and porosity on shock wave propagation.

Xtrema / 453

Sviluppo e Caratterizzazione Sperimentale ad Impatto di Tessuti Gommati Funzionalizzati con Fibre Ibride per Serbatoi Flessibili Aeronautici

Authors: Gianluca Iannitti¹; Andrea Ceccacci²; Gabriel Testa³; Sara Ricci¹

¹ *Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale*

² *Università degli studi di Cassino e del Lazio meridionale*

³ *Università degli Studi di Cassino*

Corresponding Authors: andrea.ceccacci@unicas.it, gabriel.testa@unicas.it, sara.ricci@unicas.it, g.iannitti@unicas.it

I serbatoi flessibili aeronautici richiedono elevata crashworthiness per prevenire perdite di carburante in caso di impatto. I materiali tradizionali, pur offrendo elevati carichi di rottura, presentano una ridotta deformabilità. Questo lavoro presenta lo sviluppo e la validazione sperimentale di una nuova generazione di tessuti gommati innovativi, funzionalizzati per massimizzare l'energia d'impatto assorbita senza incorrere in perforazione. La funzionalizzazione è stata ottenuta avvolgendo a spirale fibre di rinforzo (Nylon o Zylon) attorno a un'anima elastica in Lycra, integrata in una matrice di gomma nitrilica. Per valutare il comportamento dinamico del materiale in scenari di crash, i laminati sono stati sottoposti a prove di impatto mediante lo sparo di una sfera d'acciaio da 18.2 mm.

I risultati sperimentali mostrano che l'elasticizzazione dei tessuti incrementa drasticamente la deformazione a rottura rispetto al materiale di riferimento. Nelle prove dinamiche, questa capacità si è tradotta in un eccezionale aumento delle prestazioni: l'energia di impatto assorbita è quasi raddoppiata per la configurazione MatB e più che quadruplicata per i tessuti funzionalizzati con rinforzo in Nylon (MatX e MatY) rispetto allo Zylon tradizionale. I tessuti rinforzati in Nylon hanno inoltre registrato le massime velocità di resistenza, sopportando impatti superiori a 110 m/s con energie fino a 149 J in condizioni di non perforazione. In conclusione, l'impiego di filati ibridi consente alla struttura di assorbire l'energia d'urto attraverso ampie deformazioni globali, ponendo solide basi per la progettazione di serbatoi flessibili conformi ai requisiti di sicurezza aeronautici