

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

Wednesday 2 September 2026 14:30 (15 minutes)

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 rigidezza, 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 concentrando sull'implementazione della metodologia, verificandone la resistenza meccanica e la manifatturabilità come prerequisiti per l'indagine clin-

ica. 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.

Primary author: Dr ROMANELLI, Lorenzo (Dipartimento Ingegneria Industriale, Università di Trento)

Co-authors: Prof. SANTUS, Ciro (Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale Università di Pisa); Dr MENEL, Damiano (Dipartimento Ingegneria Industriale, Università di Trento); Dr NAPOLEONI, Flavio (Istituto di BioRobotica, Scuola Superiore Sant'Anna); Dr SENEGAGLIA, Ivan (Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale Università di Pisa); Prof. CONTROZZI, Marco (Istituto di BioRobotica, Scuola Superiore Sant'Anna); Prof. BENEDETTI, Matteo (Dipartimento Ingegneria Industriale, Università di Trento); Dr BORRACCI, Palma (Istituto di BioRobotica, Scuola Superiore Sant'Anna); Dr DE BIASI, Raffaele (Dipartimento di Ingegneria Chimica e dei Materiali, Università di Roma La Sapienza)

Presenter: Dr ROMANELLI, Lorenzo (Dipartimento Ingegneria Industriale, Università di Trento)

Session Classification: Biomeccanica

Track Classification: Biomeccanica