

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

Wednesday 2 September 2026 16:45 (15 minutes)

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 mecano-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 nano-metriche (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.

Primary authors: SEBASTIANI, Sara (Dipartimento di Ingegneria Meccanica (DMEC), Politecnico di Milano, Via La Masa 1, 20156 Milano, Italia); KARPOV, Dmitry (ESRF, The European Synchrotron, Grenoble 38000, Francia; Université Grenoble Alpes, CEA, IRIG, MEM, NRX, Grenoble 38054, Francia); BUCCINO, Federica (Dipartimento di Ingegneria Meccanica (DMEC), Politecnico di Milano, Via La Masa 1, 20156 Milano, Italia); VERGANI, Laura Maria (Dipartimento di Ingegneria Meccanica (DMEC), Politecnico di Milano, Via La Masa 1, 20156 Milano, Italia)

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

Session Classification: Biomeccanica

Track Classification: Biomeccanica