



Contribution ID: 337

Type: **Presentazione orale**

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

Wednesday 2 September 2026 15:45 (15 minutes)

### 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  $\mu\text{m}$ . 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.

**Primary author:** BUCCINO, Federica (Politecnico di Milano)

**Co-author:** VERGANI, Laura Maria (Politecnico Di Milano)

**Presenter:** BUCCINO, Federica (Politecnico di Milano)

**Session Classification:** Biomeccanica

**Track Classification:** Biomeccanica