



Contribution ID: 340

Type: **Presentazione orale**

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

Wednesday 2 September 2026 16:30 (15 minutes)

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 multivariata, 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.

Primary author: VERGANI, Laura Maria (Politecnico di Milano)

Co-author: BUCCINO, Federica (Politecnico di Milano)

Presenter: VERGANI, Laura Maria (Politecnico di Milano)

Session Classification: Biomeccanica

Track Classification: Biomeccanica