



**Universidad
del Gran Rosario**

RESUMEN DE INVESTIGACIÓN

Proyectos de Investigación y Desarrollo - PID

Título de la investigación

Análisis tomográfico-dinamométrico original de los efectos biomecánicos del entrenamiento en artes marciales sobre la estructura cortical y trabecular de los metacarpianos, radio y cubito

Nº Resol. Rectoral de Acreditación del Proyecto: 132/2023

Fecha de Ejecución: 18/04/2023 - 18/04/2026

Director/Coordinador del proyecto: Capozza Ricardo

ORCID del director/coordinador del proyecto: 0009-0004-3877-1211

Integrantes: Ferretti José Luis, Cointry Gustavo R., Pisani Leandro, Intelangelo Leonardo, Lüscher Sergio Hugo, Bazán Jorge.

Mail de contacto director/coordinador: rcapozza@gmail.com

Institución: Universidad del Gran Rosario (UGR)

Resumen del proyecto

Introducción

El esqueleto humano se adapta al entorno mecánico habitual mediante el sistema regulatorio retroalimentado denominado mecanostato óseo (Frost, Ferretti, Cointry, Capozza), que ajusta la masa y, sobre todo, la distribución del tejido cortical en función del uso mecánico cotidiano. Los deportes de golpe de puño, como el Muay Thai, imponen sobre los metacarpianos un patrón único de carga repetida que constituye un modelo natural privilegiado para estudiar la especificidad regional y direccional del control mecanostático del diseño óseo. Hasta el inicio de este PID, la evidencia experimental sobre la respuesta cortical de los metacarpianos a este tipo de entrenamiento era prácticamente inexistente en la literatura internacional, particularmente con metodología tomográfica seriada (pQCT) y validación biomecánica directa.

Objetivos generales y específicos

Objetivo general:

Analizar, mediante tomografía computada cuantitativa periférica (pQCT) y validación mecánica directa, los efectos biomecánicos del entrenamiento en artes marciales (Muay

Thai) sobre la estructura cortical de los metacarpianos, el radio y el cúbito, con énfasis en la distinción entre los efectos sobre la masa, el diseño y la calidad intrínseca del tejido mineralizado.

Objetivos específicos:

1. Cuantificar, por pQCT, los indicadores de masa cortical (CtA, CtC), calidad del material (vCtD) y diseño seccional (xMI, yMI) en los metacarpianos 2° a 5° de practicantes de Muay Thai y controles no entrenados pareados por edad, peso y talla.
2. Discriminar la respuesta adaptativa entre los metacarpianos anatómicamente fijos (2° y 3°) y los móviles (4° y 5°), evaluando si el mecanostato produce respuestas direccionalmente diferenciadas dentro de una misma región anatómica sometida al mismo gesto.
3. Validar experimentalmente el correlato biomecánico de los indicadores tomográficos mediante un protocolo original de impresión 3D en PLA y ensayo destructivo en flexión a tres puntos, para acreditar al BSI (Bone Strength Index) y a la CtD como predictores no-invasivos de la carga de fractura y de la resistencia a la flexión.
4. Difundir los resultados en congresos nacionales e internacionales de referencia en el campo (AAOMM, ASBMR, WCO-IOF-ESCEO), formando recursos humanos jóvenes en la metodología.

Desarrollo

Se estudiaron 15 practicantes varones de Muay Thai (edad $27,3 \pm 4,7$ años) y 15 controles no entrenados, apareados por edad, peso y talla, reclutados en el área de Rosario en colaboración con la Unidad de Investigación Musculoesquelética del CUADI – Universidad del Gran Rosario (UGR). En cada individuo se efectuaron 10 cortes tomográficos por pQCT (XCT-2000/3000, Stratec, Alemania) a lo largo de los metacarpianos 2°, 3°, 4° y 5° de la mano dominante, obteniéndose por sitio los indicadores de masa cortical (CtA, CtC), densidad mineral volumétrica cortical (vCtD), momentos de inercia para flexión antero-posterior (xMI) y lateral (yMI) y el Bone Strength Index polar ($BSI = MI \times vCtD$).

Nota sobre el alcance metodológico final del PID respecto del proyecto original. El proyecto presentado para acreditación contemplaba originalmente el análisis tomográfico no sólo de los metacarpianos sino también del radio y del cúbito de los participantes. Sin embargo, por limitaciones técnicas inherentes al protocolo de pQCT aplicado en este contexto particular —fundamentalmente las restricciones geométricas del gantry del tomógrafo XCT-2000/3000 (Stratec) para el posicionamiento estable y reproducible del antebrazo con los metacarpianos co-imagenados, y las dificultades de segmentación correlativa entre antebrazo y mano en un mismo protocolo de adquisición— no se pudieron recolectar los datos del radio y del cúbito con la calidad de imagen requerida para los análisis previstos. Esta limitación se identificó tempranamente durante la fase piloto del proyecto.

Esta falencia metodológica fue suplida exitosamente mediante la incorporación del análisis de modelización biomecánica por impresión 3D y ensayo destructivo, no contemplado en el plan original. El protocolo consistió en la reproducción en plástico (PLA, boquilla de 0,2 mm) de los terceros metacarpianos de cada participante a partir de los archivos STL derivados de los scans pQCT, seguida de ensayo en flexión a tres puntos a 5 mm/min hasta la rotura, con registro de la carga de fractura (Wf) y la resistencia a la flexión (Rf). Este desvío metodológico aportó un valor agregado superior al previsto inicialmente: mientras que el análisis de radio y cúbito hubiera ampliado la base descriptiva del estudio, la modelización 3D + ensayo destructivo permitió la validación experimental directa del correlato biomecánico de los indicadores tomográficos (BSI y CtD), constituyendo un aporte original mayor para el campo y consolidándose como protocolo CUADI/UGR–CEMFoC reproducible.

Se aplicó análisis estadístico mediante ANOVA factorial para las comparaciones entre grupos y sitios, ANCOVA para las relaciones de distribución/calidad (d/c: MI vs. vCtD), y regresión múltiple para identificar los mejores predictores tomográficos de la resistencia mecánica medida. La actividad física fue cuantificada mediante el cuestionario iPAQ. El proyecto se desarrolló con el PICT 2019/3341 del CONICET (Director: Capozza) como soporte de financiamiento externo paralelo.

Resultados obtenidos

Tres resultados originales de alta significación científica organizan la producción del PID:

5. Respuesta diferencial fijos vs. móviles: los practicantes de Muay Thai exhibieron CtA y CtC significativamente mayores en los cuatro metacarpianos estudiados respecto de los controles (ANOVA, $p < 0,05$), pero las mejoras en los momentos de inercia se localizaron exclusivamente en los cortes centroproximales de los metacarpianos 4° y 5° (móviles), sin diferencias correlativas en los metacarpianos 2° y 3° (fijos). Las curvas d/c proximales fueron similares para 2° y 3° pero superiores en MT para 4° y 5° (ANCOVA, $p < 0,05$). Este patrón configura evidencia inédita de respuesta direccionalmente diferenciada del mecanostato dentro de una misma región anatómica.

6. Conservación de la calidad intrínseca: la densidad mineral volumétrica cortical (vCtD) no mostró diferencias significativas entre los grupos en ninguno de los metacarpianos estudiados, confirmando la hipótesis vertebral de la línea: el control mecánico afecta al diseño y a la masa cortical, pero no a la calidad intrínseca del tejido mineralizado, que está determinada principalmente por factores genéticos.

7. Validación experimental directa de los indicadores tomográficos: por regresión múltiple sobre los datos de los ensayos destructivos, el BSI se acreditó como mejor predictor de la carga de fractura ($R^2 = 0,82$ en MT; $0,92$ en controles) y la CtD como mejor predictor de la resistencia a la flexión ($R^2 = 0,83$ y $0,93$ respectivamente), en todos los casos con $p < 0,01$. Este resultado constituye la primera validación mecánica directa del correlato biomecánico de los indicadores pQCT producida en el contexto de UGR-CEMFoC.

Discusión

Los hallazgos del PID se articulan coherentemente con el marco teórico del mecanostato óseo y aportan tres contribuciones originales al campo. Primero, la disociación entre el incremento uniforme de masa (CtA, CtC) y la respuesta selectiva del diseño (MIs) circunscrita a los metacarpianos móviles sugiere que el mecanostato discrimina, dentro de una misma región anatómica, el rol biomecánico funcional del hueso: los metacarpianos fijos (2° y 3°) responden a estímulos compresivos predominantemente, mientras que los móviles (4° y 5°) responden a estímulos flexurales. Segundo, la preservación de la vCtD acreditada en todas las contribuciones reafirma que el control mecánico opera sobre la organización geométrica del tejido, no sobre la rigidez intrínseca del material mineralizado — observación congruente con los hallazgos previos del CEMFoC sobre otros huesos largos—. Tercero, el protocolo de validación por impresión 3D + ensayo destructivo constituye una metodología novedosa que cierra el círculo entre la determinación tomográfica y el ensayo mecánico real, sin requerir muestras óseas humanas, y permite generalizar el BSI y la CtD como predictores no-invasivos rigurosos.

Conclusión

El PID ha cumplido con sus objetivos centrales relativos al análisis biomecánico de los metacarpianos en practicantes de Muay Thai. El análisis tomográfico originalmente previsto para radio y cúbito no pudo concretarse por las limitaciones técnicas detalladas en el punto 3.1, pero fue sustituido por la modelización biomecánica mediante impresión 3D y ensayo destructivo de los metacarpianos, un componente metodológico no previsto en el plan original que aportó valor científico superior: la validación experimental directa del correlato biomecánico de los indicadores tomográficos. Los resultados aportan evidencia inédita del control direccional del mecanostato sobre el diseño cortical de los metacarpianos, demuestran la disociación entre la respuesta de masa y la de diseño, y validan experimentalmente el uso del BSI y la CtD como predictores no-invasivos de propiedades biomecánicas.

La producción se concretó en cinco contribuciones a congresos (4 internacionales: WCO-IOF-ESCEO Londres 2024, ASBMR Toronto 2024, WCO-IOF-ESCEO Roma 2025; 2 nacionales: AAOMM-SAO 2023 con 2° Premio en Investigación Básica; AAOMM-SAO 2024 con selección para Sesión de Trabajos a Premio), además de la finalización de una Tesina de Grado (Bazán J., UGR).

Palabras claves

Mecanostato óseo; pQCT; metacarpianos; Muay Thai; Bone Strength Index (BSI); impresión 3D; biomecánica ósea.