

ORIGINAL

Comparación de tres técnicas de tornillo endomedular mínimamente invasivo para fracturas de falange proximal. Estudio biomecánico



I. Gallardo-Calero^a, R. Sevil-Mayayo^a, A. Lluch-Bergada^{a,b}, N. Vidal-Tarrasón^a, A. Rodríguez-Baeza^c e I. Esteban-Feliu^{a,*}

^a Unidad de Cirugía de Mano y Muñeca, Servicio de Cirugía de Ortopedia y Traumatología, Hospital Vall Hebrón, Barcelona, España

^b Cirugía de Mano, Institut Kaplan, Barcelona, España

^c Facultad de Medicina, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España

Recibido el 8 de marzo de 2022; aceptado el 1 de junio de 2022

Disponible en Internet el 13 de junio de 2022

PALABRAS CLAVE

Fractura;
Falange proximal;
Tornillo
endomedular;
Estabilidad;
Biomecánica

Resumen

Antecedentes y objetivo: Las fracturas de falange proximal (FP) son las fracturas más frecuentes de la mano. En los últimos años, se ha descrito el uso de tornillos endomedulares sin cabeza (TESC) para las fracturas inestables transversas u oblicuas de la FP. A pesar de que tanto la técnica anterógrada como retrógrada con TESC han mostrado buenos resultados, no se ha publicado ningún estudio comparativo de su uso en fracturas de FP. Nuestro objetivo es determinar la estabilidad que se obtiene con el uso de TESC retrógrados y anterógrados en un modelo en cadáver de fractura transversa proximal de FP, a dos niveles diferentes.

Material y métodos: Realizamos un estudio biomecánico en 30 modelos de fractura de FP de cadáver fresco-congelado. La osteotomía se realizó a los 9 mm desde la articulación metacarpofalángica (MCF) en 15 especímenes, y a una distancia de 15 mm en los otros 15. A su vez, en cada grupo, cinco osteotomías se estabilizaron con un TESC anterógrado intraarticular, cinco mediante un TESC anterógrado transarticular y cinco con un TESC retrógrado.

Resultados: La fijación con TESC anterógrado en osteotomías realizadas a los 9 mm (tanto con la técnica transarticular como intraarticular, 62,74 N y 70,86 N, respectivamente) fue más estable que la fijación con TESC retrógrado (32,72 N) ($p = 0,022$). Por otra parte, la fijación con TESC retrógrado fue más estable en el modelo de fractura más distal (90,52 N retrógrado vs. 57,64 N transarticular vs. 42,92 N intraarticular ($p = 0,20$)).

Conclusiones: La fijación con TESC retrógrado ofrece más estabilidad en fracturas más distales, mientras que las técnicas anterógradas son más estables en fracturas proximales.

© 2022 Publicado por Elsevier España, S.L.U. en nombre de SECOT. Este es un artículo Open Access bajo la licencia CC BY-NC-ND (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: iestebanfeliu@gmail.com (I. Esteban-Feliu).

KEYWORDS

Fracture;
Proximal phalanx;
Intramedullary screw;
Stability;
Biomechanics

Comparison of three different minimally invasive intramedullary screw for proximal phalanx fractures. A biomechanical study

Abstract

Background and objective: Phalangeal fractures are the most common hand fractures. In the last years, intramedullary compression screw (IMHCS) for instable transverse or short oblique proximal P1 fractures have been described. Although both anterograde (intraarticular or trans-articular) and retrograde IMHCS techniques have shown good results, no comparison between anterograde and retrograde screw in P1 fractures has been published. We sought to determine stability with retrograde IMHCS and anterograde IMHCS, both trans-articular and intra-articular technique, in a cadaveric transverse proximal P1 fracture model, at two different levels.

Material and methods: We performed a biomechanical study in 30 fresh-frozen human cadaveric P1 fracture model. Fracture was performed at 9-mm from the metacarpo-phalangeal (MCP) joint in 15 specimens, whereas it was done at 15 mm in the other 15. In turn, in each group, five fractures were stabilized with an anterograde intra-articular IMHCS, five with anterograde trans-articular IMHCS and other five with retrograde IMHCS.

Results: Anterograde IMHCS fixation in 9-mm P1 fractures (both trans- and intra-articular technique, 62.74 N and 70.86 N, respectively) was found to be more stable than retrograde IMHCS one (32.72 N) ($p = 0.022$). Otherwise, retrograde IMHCS fixation was found to be more stable in more distal P1 fractures (90.52 N retrograde vs. 57.64 N trans-articular vs. 42.92 N intra-articular; $p = 0.20$).

Conclusions: Anterograde IMHCS fixation in proximal transverse P1 bone cut in a cadaveric model provides more stability than retrograde IMHCS, while retrograde screw provides more stability when the bone cut is located more distal.

© 2022 Published by Elsevier España, S.L.U. on behalf of SECOT. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

Introducción

Las fracturas de falange son las fracturas más frecuentes de la mano, y dentro de estas, el 38% son fracturas de falange proximal (FP)¹. La cirugía se reserva para las fracturas inestables. Entre las diferentes técnicas descritas, la más común es con agujas Kirschner (AK), placa-tornillo y tornillos endomedulares sin cabeza (TESC). Las fracturas extraarticulares oblicuas cortas y transversas de la FP clásicamente se han estabilizado con dos AK anterógradas cruzadas. A pesar de haberse reportado buenos resultados con esta técnica^{2,3}, se ha descrito una tasa de complicaciones de hasta el 36%⁴. Dado que requiere de un periodo de inmovilización postoperatoria, no es rara la aparición de rigidez articular⁵. Alternativamente, en los últimos años se ha descrito el uso de TESC tanto anterógrados como retrógrados para este patrón de fractura^{6,7}. Entre sus ventajas, destaca la poca agresión de partes blandas, que permite una movilización inmediata y la no necesidad de retirar el implante⁷.

La técnica de TESC retrógrado se realiza a través de la cabeza de la falange, en máxima flexión de la articulación interfalángica proximal. La técnica de TESC anterógrado sería teóricamente un mejor método de osteosíntesis en las fracturas proximales de FP, ya que nos permite cubrir mejor todo el segmento. El TESC anterógrado se puede implantar mediante el método intraarticular (desde el margen dorsal articular de la FP) o transarticular (a través de la cabeza del metacarpiano, lo que permite un punto de entrada centrado en la FP). Desde un punto de vista biomecánico, los TESC han demostrado ofrecer una estabilidad suficiente en fracturas de metacarpianos y FP^{8,9}. No obstante, no hemos encontrado

en la literatura ningún estudio biomecánico comparativo del uso de TESC anterógrados y retrógrados en fracturas de FP.

Nuestro objetivo es determinar la estabilidad que se obtiene con el uso de TESC retrógrados y anterógrados en un modelo en cadáver de fractura transversa proximal de FP, a dos niveles diferentes. Nuestra hipótesis es que el TESC anterógrado confiere una mayor estabilidad en las fracturas proximales de FP, mientras que se iguala al TESC retrógrado si la fractura es más distal.

Material y métodos

Realizamos un estudio biomecánico en 30 modelos de fractura de FP de cadáver fresco-congelado. La edad de los especímenes fue entre 86 y 90 años, un hombre y tres mujeres. Se incluyeron todos los dedos de la mano, excepto el pulgar. Todas las fracturas se estabilizaron con un TESC de 2,4 mm (DePuy Synthes, Raynham, MA). La fractura se recreó a 9 mm de la articulación metacarpofalángica (MCF) en 15 especímenes, mientras que se realizó a 15 mm en los otros 15. A su vez, en cada grupo, cinco osteotomías se estabilizaron con un TESC anterógrado intraarticular, cinco con un TESC anterógrado transarticular, y las últimas cinco con un TESC retrógrado.

Preparación del modelo de fractura y técnica de fijación

Se usaron manos frescas-congeladas desarticuladas a nivel de la articulación radiocarpiana. Se realiza una incisión

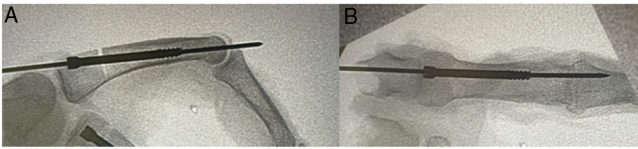


Figura 1 Técnica de tornillo endomedular sin cabeza anterógrado: A) Anterógrado intraarticular, B) Anterógrado transarticular.

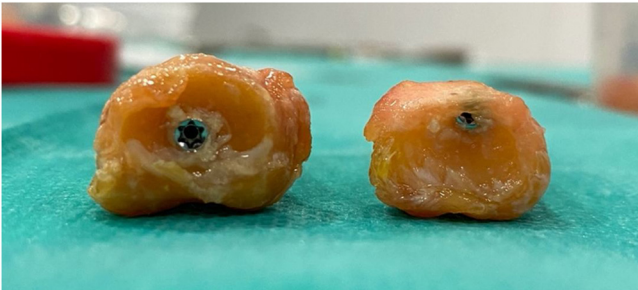


Figura 2 Afectación articular de la base de la falange proximal tras la fijación con un tornillo endomedular sin cabeza: A) Anterógrado intraarticular, B) Anterógrado transarticular.

longitudinal central para exponer la FP de los dedos trifalángicos. A continuación, se realiza una osteotomía transversal con una sierra sagital a 9 mm desde la base de la falange en quince dedos y a 15 mm en los otros quince. Mediante un desplazamiento manual de la osteotomía, verificamos la recreación de una fractura bicortical inestable, y se verifica mediante fluoroscopia. Una vez la osteotomía se ha estabilizado, se desbridan todos los tejidos blandos circundantes y se recogen las falanges para su posterior estudio biomecánico.

Técnica de TESC anterógrado intraarticular

Se realiza una incisión dorsal transversal de 1 cm en la piel, a nivel de la articulación MCF. El tendón extensor se incide longitudinalmente, y mediante una maniobra suave de subluxación dorsal y flexión de la articulación MCF, se expone la superficie articular proximal dorsal de la FP. Una vez se ha reducido la fractura, se procede a colocar la aguja guía hasta la cabeza de la FP. Se realiza el brocado a través de la aguja guía y se coloca el tornillo canulado sin cabeza de 2,4 mm. Usando esta técnica, el punto de entrada del tornillo queda excéntrico y el daño articular del cartílago proximal de la FP es menor.

Técnica de TESC anterógrado transarticular

Se realiza una incisión dorsal transversal de 1 cm en la piel, 1 cm proximal desde la articulación MCF. A continuación, la división longitudinal del tendón extensor permite el acceso al dorso de la cabeza del metacarpiano. A través de la cabeza del metacarpiano y con máxima flexión de la articulación MCF, la aguja guía se coloca en el centro de la base de la FP. Una vez colocada la aguja guía con la fractura reducida, se realiza el brocado a través de la aguja guía y se coloca el tornillo canulado sin cabeza de 2,4 mm (figs. 1 y 2).



Figura 3 Técnica de tornillo endomedular sin cabeza retrógrado.

Técnica de TESC retrógrado

Se realiza una incisión dorsal transversal de 1 cm en la piel, a nivel de la articulación interfalángica proximal. El aparato extensor se incide longitudinalmente y se expone la superficie articular distal de la FP. Una vez la fractura se ha reducido, se coloca una aguja guía endomedular hasta el hueso subcondral de la base de la FP. Tras el brocado a través de la aguja guía se inserta un tornillo canulado sin cabeza de 2,4 mm (fig. 3).

Estudio biomecánico

Las fuerzas a las que se ven sometidas las fracturas transversas u oblicuas cortas del tercio proximal de la FP a menudo involucran la extensión del fragmento debido a las inserciones tendinosas¹⁰. Con el objetivo de reproducir este escenario clínico, se diseñó un estudio biomecánico de flexión de 3 puntos (3 P). Las falanges obtenidas se colocaron horizontalmente en el dispositivo de prueba (Bionix 358®; MTS Systems, Eden Prairie, MN, EE. UU.). La distancia entre los soportes inferiores fue constante a 20 mm, y el soporte superior se colocó en el punto medio entre ellos (fig. 4). En todos los casos, se aseguró que la osteotomía estaba comprendida entre ambos soportes. Se aplicó una célula de carga de 2,5 kN, manteniendo una velocidad de desplazamiento constante de 10 mm/min hasta la rotura del constructo^{11,12}.

Análisis estadístico

El resultado primario fue la diferencia en la resistencia media a las fuerzas de flexión de 3 P entre las tres técnicas de TESC descritas. Como no se habían publicado datos aplicables anteriormente, el tamaño de la muestra se calculó en base a estudios previos con diseños y métodos de prueba similares⁸, asumiendo un posible estudio con poca potencia,

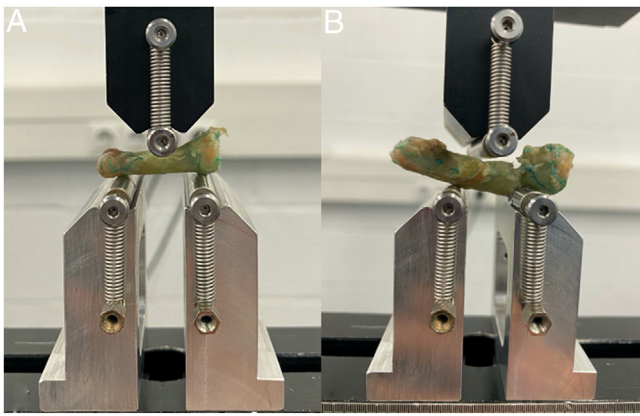


Figura 4 Imágenes del dispositivo diseñado para aplicar la fuerza en flexión en 3 puntos. A) Falange intacta previa a la aplicación de la fuerza; B) Falange con la deformidad secundaria a la fuerza aplicada por el dispositivo.

que eventualmente podría ampliarse. Las variables categóricas se presentaron como números absolutos y porcentajes, mientras que las variables continuas se resumieron como medianas con rangos intercuartiles, o medias y desviaciones estándar (DE), según el caso. Los análisis comparativos se realizaron mediante el test de Anova para variables continuas entre varios grupos. Todas las pruebas estadísticas fueron de dos colas, y el criterio de significación estadística se fijó en $p < 0,05$.

Resultados

Este estudio biomecánico evaluó la resistencia del modelo de fractura de FP a las fuerzas de flexión en 3 P (tabla 1). Para las osteotomías a los 9 mm de la articulación MCF, la técnica de TESC anterógrado (tanto intraarticular como transarticular técnica, 70,86 N y 62,74 N, respectivamente)

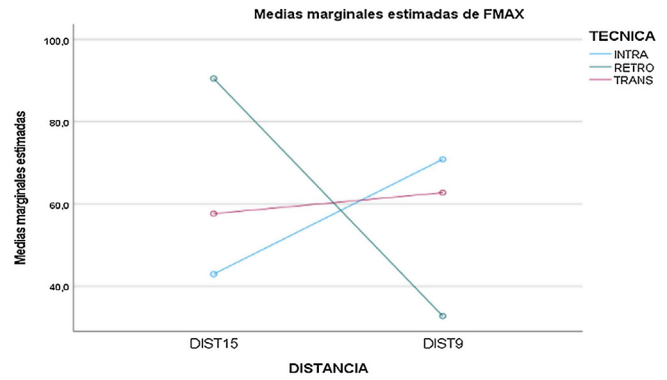


Figura 5 Gráfica de los resultados obtenidos. Podemos observar como a la distancia de 15 mm, la técnica retrógrada es más estable y a la distancia de 9 mm la técnica anterógrada es más estable. Y: fuerza aplicada; X: dos niveles de osteotomía, 9 mm y 15 mm.

mostró una mayor resistencia que la técnica retrógrada (32,72 N) ($p = 0,002$). Entre las dos técnicas anterógradas, la intraarticular (70,86 N) soportó unas fuerzas de flexión en 3 P más altas que la transarticular (62,74 N), en el grupo de 9 mm ($p > 0,05$). Por el contrario, la técnica de TESC retrógrada fue más estable que las anterógradas en las fracturas a 15 mm desde la articulación MCF (90,52 N retrógrado vs. 57,64 N transarticular vs. 42,92 N intraarticular ($p = 0,20$) (fig. 5).

Discusión

En el estudio biomecánico presentado, la fijación mediante un TESC anterógrado en las fracturas proximales de FP ha demostrado ser más estable que mediante un TESC retrógrado. Por el contrario, la fijación con TESC retrógrado ha

Tabla 1 Resultados obtenidos tras la aplicación de la fuerza deformante en 3 puntos

Muestra 9 mm					
	F _{máx} (N)		F _{máx} (N)		F _{máx} (N)
A. intra (1)	143,4	A. trans (1)	38,9	Retro (1)	30,7
A. intra (2)	45,5	A. trans (2)	94,2	Retro (2)	33,2
A. intra (3)	53,6	A. trans (3)	101,3	Retro (3)	27,7
A. intra (4)	28,6	A. trans (4)	48,2	Retro (4)	40,8
A. intra (5)	83,2	A. trans (5)	31,1	Retro (5)	31,2
	70,86		62,74		32,72
Muestra 15 mm					
	F _{máx} (N)		F _{máx} (N)		F _{máx} (N)
A. intra (1)	124	A. trans (1)	22,8	Retro (1)	91,1
A. intra (2)	17,6	A. trans (2)	32,3	Retro (2)	18,5
A. intra (3)	122,5	A. trans (3)	103,3	Retro (3)	96,6
A. intra (4)	55,7	A. trans (4)	29,6	Retro (4)	27,6
A. intra (5)	132,8	A. trans (5)	26,6	Retro (5)	54,4
	90,52		42,92		57,64

F_{máx}: Fuerza máxima; N: Newtons.

demostrado ser más resistente en fracturas de FP más distales.

Se han descrito diversos métodos de fijación para fracturas transversas u oblicuas cortas de FP¹³⁻¹⁵. El tratamiento óptimo debería proporcionar suficiente estabilidad para permitir una rehabilitación precoz, con la mínima agresión de partes blandas y baja tasa de retirada de material de osteosíntesis. Las técnicas que usan TESC han demostrado ofrecer una estabilidad equiparable a la placa evitando la agresión de partes blandas, y por lo tanto la potencial rigidez postoperatoria también se ve reducida^{7,8}. Se han descrito tres técnicas de TESC: intraarticular anterógrada, transarticular anterógrada y retrógrada. Con la técnica de TESC retrógrado, a pesar del daño que se produce en el cartílago de la cabeza de la falange (13-18% para tornillos de 2,5 mm, 19-25% para tornillos de 3,0 mm¹⁵) y el aparato extensor durante la implantación del tornillo, se ha reportado que el porcentaje de superficie articular afectada es bajo, y tendría poca repercusión clínica¹⁵. La fijación anterógrada tiene la ventaja de que evita el daño de la bandeleta central del aparato extensor y produce un porcentaje menor de daño de la superficie articular durante su implantación⁶, habiéndose descrito un 4,6% de daño con el uso de tornillos de 2,2 mm y un 8,5% con tornillos de 3,0 mm⁶. Entre las técnicas anterógradas, la intraarticular evita la lesión de la cabeza del metacarpiano y reduce a la mitad el daño del cartílago de la base de la FP en comparación a la transarticular⁶, pero no siempre es posible ya que una subluxación de la articulación MCF limitada podría no permitir la implantación del tornillo. En estos casos, especialmente en los dedos índice y medio, la técnica transarticular sería la alternativa.

Siendo conscientes de las ventajas y desventajas de los tres métodos de fijación con TESC, queríamos investigar si la estabilidad del constructo cambiaba en función de la técnica escogida y del nivel de la fractura. Algunos autores han realizado estudios biomecánicos encontrando equivalencia estadística entre las técnicas de TESC intraarticular y la fijación con placa-tornillo en las fracturas oblicuas cortas de la FP⁸. Sin embargo, hasta donde conocemos, no existen estudios biomecánicos que evalúen y comparen la estabilidad de la fijación con las diferentes técnicas de TESC en este tipo de fracturas. Nosotros encontramos que cuando la fractura se localizaba más cerca de la articulación MCF, la técnica anterógrada ofrecía una mayor estabilidad que retrógrada (66,74 N±38,86 vs. 32,72 N±4,92, respectivamente), sin diferencias entre las dos técnicas anterógradas entre sí (70,86±45,11 vs. 62,74±32,62.). Por otra parte, cuando la fractura se localizaba más distal, el constructo con TESC retrógrado fue más resistente (90,52 N±51,13 vs. 50,28 N±34,79, respectivamente). Lo que resulta interesante de estos hallazgos es que, a pesar de que algunos métodos ofrecían una menor estabilidad que otros, en todos los grupos la resistencia fue mayor a 25 N, la cual se ha definido como la fuerza que experimenta la FP en las actividades diarias¹⁶.

La interpretación de nuestros resultados requiere precaución, dado las limitaciones propias que presenta el estudio en cadáver. Nosotros sólo reproducimos fracturas transversas, lo cual puede no representar adecuadamente un escenario clínico, ya que normalmente este tipo de fracturas presentan algún grado de oblicuidad. A pesar de ello, el nivel donde realizamos la osteotomía se realizó a una distancia constante con el fin de evitar la variabilidad que podría

producir en nuestros resultados. Usamos la misma medida de tornillo en todos los casos, a diferencia de la práctica clínica, donde el tamaño del tornillo se individualiza de acuerdo con la falange y la fractura. En nuestro estudio sólo valoramos la resistencia a las fuerzas de extensión, que, a pesar de ser las fuerzas deformantes más comunes en las fracturas transversas y oblicuas cortas de la FP, no incluye otras fuerzas deformantes como la rotacional, a la que pueden estar expuestas este tipo de fracturas durante el periodo postoperatorio.

Gracias a nuestros hallazgos, hemos podido demostrar que la fijación mediante TESC anterógrado en un modelo de fractura proximal transversa de FP en un modelo en cadáver ofrece una mayor estabilidad que el TESC retrógrado, mientras que esta técnica ofrece mayor estabilidad cuando la osteotomía se sitúa más distal. Sin embargo, combinando nuestros resultados con estudios biomecánicos previos, ambas técnicas de TESC anterógrada y retrograda ofrecen suficiente estabilidad postoperatoria para las actividades de la vida diaria.

Nivel de evidencia

Nivel de evidencia IV.

Financiación

El presente trabajo ha sido financiado por la Sociedad Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología: Proyectos de Iniciación a la Investigación Fundación SECOT.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Bibliografía

1. van Onselen EBH, Karim RB, Hage JJ, Ritt MJPF. Prevalence and distribution of hand fractures. *J Hand Surg Br.* 2003;28:491-5, [http://dx.doi.org/10.1016/s0266-7681\(03\)00103-7](http://dx.doi.org/10.1016/s0266-7681(03)00103-7).
2. Joshi BB. Percutaneous internal fixation of fractures of the proximal phalanges. *Hand.* 1976;8:86-92, [http://dx.doi.org/10.1016/0072-968x\(76\)90069-3](http://dx.doi.org/10.1016/0072-968x(76)90069-3).
3. Green DP, Anderson JR. Closed reduction and percutaneous pin fixation of fractured phalanges. *J Bone Joint Surg Am.* 1973;55:1651-4 [consultado 7 Dic 2021] Disponible en: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4804987>.
4. Creighton JJSJ Jr. Complications in phalangeal and metacarpal fracture management. Results of extensor tenolysis. *Hand Clin.* 1994 Feb;10:111-6.
5. Faruqui S, Stern PJ, Kiefhaber TR. Percutaneous pinning of fractures in the proximal third of the proximal phalanx: complications and outcomes. *J Hand Surg Am.* 2012;37:1342-8, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhsa.2012.04.019>.
6. Borbas P, Dreu M, Poggetti A, Calcagni M, Giesen T. Treatment of proximal phalangeal fractures with an antegrade intramedullary screw: a cadaver study. *J Hand Surg Eur Vol.* 2016;41:683-7, <http://dx.doi.org/10.1177/1753193416641319>.
7. Giesen T, Gazzola R, Poggetti A, Giovanoli P, Calcagni M. Intra-medullary headless screw fixation for fractures of the proximal and middle phalanges in the digits of the hand: a review of

- 31 consecutive fractures. *J Hand Surg Eur Vol.* 2016;41:688–94, <http://dx.doi.org/10.1177/1753193416641330>.
8. Miles MR, Krul KP, Abbasi P, Thakkar MY, Giladi AM, Means KR. Minimally Invasive Intramedullary Screw Versus Plate Fixation for Proximal Phalanx Fractures: A Biomechanical Study. *J Hand Surg Am.* 2021;46:518.e1–8, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhsa.2020.11.013>.
 9. Jones CM, Padegimas EM, Weikert N, Greulich S, Ilyas AM, Siegler S. Headless Screw Fixation of Metacarpal Neck Fractures: A Mechanical Comparative Analysis. *Hand (N Y).* 2019;14:187–92, <http://dx.doi.org/10.1177/1558944717731859>.
 10. Kurzen P, Fusetti C, Bonaccio M, Nagy L. Complications after plate fixation of phalangeal fractures. *J Trauma.* 2006;60:841–3, <http://dx.doi.org/10.1097/01.ta.0000214887.31745.c4>.
 11. Melamed E, Hinds RM, Gottschalk MB, Kennedy OD, Capo JT. Comparison of Dorsal Plate Fixation Versus Intramedullary Headless Screw Fixation of Unstable Metacarpal Shaft Fractures: A Biomechanical Study. *Hand (N Y).* 2016;11:421–6, <http://dx.doi.org/10.1177/1558944716628485>.
 12. Curtis BD, Fajolu O, Ruff ME, Litsky AS. Fixation of Metacarpal Shaft Fractures: Biomechanical Comparison of Intramedullary Nail Crossed K-Wires and Plate-Screw Constructs. *Orthop Surg.* 2015;7:256–60, <http://dx.doi.org/10.1111/os.12195>.
 13. Hornbach EE, Cohen MS. Closed reduction and percutaneous pinning of fractures of the proximal phalanx. *J Hand Surg Br.* 2001;26:45–9, <http://dx.doi.org/10.1054/jhsb.2000.0524>.
 14. Pun WK, Chow SP, So YC, Luk KD, Ngai WK, Ip FK, et al. Unstable phalangeal fractures: treatment by A.O. screw and plate fixation. *J Hand Surg Am.* 1991;16:113–7, [http://dx.doi.org/10.1016/s0363-5023\(10\)80023-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0363-5023(10)80023-1).
 15. del Piñal F, Moraleda E, Rúas JS, de Piero GH, Cerezal L. Minimally invasive fixation of fractures of the phalanges and metacarpals with intramedullary cannulated headless compression screws. *J Hand Surg Am.* 2015;40:692–700, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhsa.2014.11.023>.
 16. Fowler NK, Nicol AC. Measurement of external three-dimensional interphalangeal loads applied during activities of daily living. *Clin Biomech (Bristol, Avon).* 1999;14:646–52, [http://dx.doi.org/10.1016/s0268-0033\(99\)00016-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0268-0033(99)00016-9).