

Descripción anatómica del sistema de poleas digitales de la mano. Impacto funcional ante la lesión.

Anatomic description of flexor pulley system. Functional impact of injury.

Maria-Camila Mosquera-Matta^{1,a}, Juan-José Ocampo-Loaiza^{1,a}, Daniel Vélez-Cano^{1,a},
Estefanía Montoya-Cobo^{2,a}

1. Estudiante de Medicina, Semillero de Innovadores en Salud ISSEM.
2. Fisioterapeuta, Magister en Ciencias Biomédicas, Profesora del Departamento de Ciencias Básicas de la Salud, Grupo de Investigación en Ciencias Básicas y Clínicas de la Salud.

a. Facultad de Ciencias de la Salud, Pontificia Universidad Javeriana (Colombia).

CORRESPONDENCIA

María Camila Mosquera Matta

ORCID ID <https://orcid.org/0000-0003-1065-2929>

Facultad de Ciencias de la Salud, Pontificia Universidad Javeriana, Cali (Colombia).

E-mail: mcosqueram@javerianacali.edu.co

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores del artículo hacen constar que no existe, de manera directa o indirecta, ningún tipo de conflicto de intereses que pueda poner en peligro la validez de lo comunicado.

RECIBIDO: 27 de noviembre de 2022.

ACEPTADO: 13 de junio de 2023.

RESUMEN

Introducción: La mano es la región más distal del miembro superior la cual permite la motricidad fina y el agarre, para ello, cuenta con un sistema complejo de estructuras palmodigitales denominadas poleas que apoyan la función de los tendones flexores durante los movimientos de los dedos. Su lesión puede manifestarse con alteraciones estéticas y funcionales que comprometen la capacidad laboral y la calidad de vida de los pacientes es por ello que su conocimiento debe ser motivo de interés para el personal médico. **Materiales y métodos:** Se realizó una revisión de la literatura en Medline, utilizando terminología controlada y ecuaciones de búsqueda avanzada, recopilando 26 artículos que permitieron conocer la descripción morfofuncional del sistema de poleas flexoras de la mano humana y los compromisos funcionales ante su lesión traumática. **Resultados:** Los dedos II-V cuentan con 8 poleas entre anulares y cruciadas, de las cuales las anulares 2 y 4 son las más importantes para el funcionamiento y deslizamiento del aparato flexor. En el I dedo la polea oblicua estabiliza el sistema de agarre, sin embargo, sus lesiones pueden afectar el sistema vascular proporcionado a través de las vainas sinoviales generando pérdidas funcionales graves. **Conclusiones:** La ubicación, conformación y mecanismo de acción de las poleas digitales confiere un gran nivel de evolución a la mano humana al facilitar diversas formas de agarre y pinza para las actividades diarias, pero también está altamente expuesto a lesiones por ser subcutáneo y estar sometido a altas cargas en algunas actividades laborales y/o deportivas lo que conlleva a lesiones con incapacidad motora y/o deformidad.

Palabras clave: Lesión de polea flexora, anatomía del tendón flexor, lesión de mano, anatomía de la mano, lesión del tendón.

ABSTRACT

Introduction: The hand, as the most distal region of the upper limb, plays a crucial role in enabling fine motor skills and gripping abilities. It houses a complex system of palmodigital structures known as pulleys that support the functioning of flexor tendons during finger movements. Injuries to these pulleys can lead to aesthetic and functional impairments, significantly impacting patients' work capacity and quality of life. Hence, understanding these structures should be of great interest to medical professionals. **Materials and methods:** A comprehensive literature review was conducted using Medline, employing controlled terminology and advanced search equations. This review gathered 26 articles that describe the morphofunctional characteristics of the human hand's flexor pulley system and its functional implications in the event of traumatic injuries. **Results:** The II-V fingers possess five pulleys located between annular and cruciate regions, with annular pulleys 2 and 4 playing a pivotal role in the functioning and sliding of the flexor apparatus. In the I finger, the oblique pulley stabilizes the gripping system; however, injuries to this pulley can affect the vascular supply provided by the synovial sheaths, resulting in severe functional losses. **Conclusions:** The digital pulleys' specific location, configuration, and mechanism of action contribute significantly to the evolutionary advantage of the human hand, facilitating various gripping and pinching actions for daily activities. Nevertheless, their subcutaneous placement and exposure to high loads during certain work and sports activities make them susceptible to injuries, leading to motor disabilities and deformities.

Key words: Flexor pulley injury, flexor tendon anatomy, hand injury, hand anatomy, tendon injury.

Mosquera-Matta MC, Ocampo-Loaiza JJ, Vélez-Cano D, Montoya-Cobo E. Descripción anatómica del sistema de poleas digitales de la mano. Impacto funcional ante la lesión. *Salutem Scientia Spiritus* 2023; 9(2):88-96.



La Revista *Salutem Scientia Spiritus* usa la licencia Creative Commons de Atribución – No comercial – Sin derivar:

Los textos de la revista son posibles de ser descargados en versión PDF siempre que sea reconocida la autoría y el texto no tenga modificaciones de ningún tipo.

INTRODUCCIÓN

El miembro superior es uno de los segmentos de mayor importancia para el ser humano, ya que le permite la relación con su entorno y con sus pares, además de darle facultades especiales en la creación de herramientas que aseguran la supervivencia de la especie. Sus funciones son fundamentales en el día a día y se reflejan en los procesos de alimentación y generación de recursos a través del trabajo manual, además, tiene un gran componente emocional que se encuentra permeado por la cultura a la que pertenece cada individuo. La mano como componente distal de este segmento, corresponde a una estructura evolutiva que le ha conferido al ser humano la capacidad de desarrollar diferentes habilidades motoras que conllevan a atributos frente a las otras especies. Su disposición anatómica conlleva una estructura y diseño que se adapta fácilmente a las necesidades del medio; organizándose de proximal a distal en región carpiana o base, región metacarpiana o palma y las falanges que conforman los dedos: cada uno cuenta con tres falanges, a excepción del primer dedo o pulgar que solo tiene dos. En extensión total, los dedos permanecen separados y en flexión no se sobreponen unos sobre los otros a excepción del dedo pulgar el cuál, dada su posición, permite el correcto agarre. La anatomía de la mano es sumamente compleja puesto que consta de múltiples estructuras óseas, musculares intrínsecas y extrínsecas, ligamentosas, y neurovasculares que le permiten la motricidad fina y gruesa.

Las manos son la vía de acceso de las personas a los diferentes ámbitos de la vida, por lo que las lesiones y traumatismos son causa frecuente de discapacidad y consultas al servicio de urgencias y estos representan el 28% de las lesiones que afectan el sistema musculoesquelético; la mayoría de estudios sobre lesiones en este segmento, reportan que el compromiso de la mano en accidentes está presente entre el 6,6% y el 28,6% de la totalidad de las lesiones, comúnmente asociadas a accidentes industriales u ocupacionales representando el 25% de los accidentes ocupacionales que se reportan, sin dejar de lado la gran proporción de accidentes que ocurre durante actividades al aire libre, en prácticas deportivas y accidentes que suceden en el hogar.¹

La mano cuenta con un sistema complejo de estructuras de tejido conectivo que constituye poleas, ubicadas a nivel digital sobre la cara palmar y juegan un papel vital en el proceso de flexión, motricidad fina y agarre con los dedos; las alteraciones primarias o secundarias de estas poleas pueden manifestarse clínicamente con perturbaciones estéticas y funcionales como pérdida de la fuerza, inestabilidad local, reducción del arco de movilidad y dolor durante el proceso de agarre, lo que impacta directamente en la calidad de vida y capacidad laboral de los pacientes.²

Aunque la epidemiología de las lesiones en mano no ha sido bien estudiada en Colombia, existen algunos estudios de países como

México que muestran mayor ocurrencia en hombres dentro del contexto laboral.¹ A pesar de todo, la literatura tradicional no evidencia los detalles anatómicos y funcionales, razón por la cual el estudio anatómico de la mano permite comprender no sólo su disposición, sino también el funcionamiento, los mecanismos de lesión más frecuentes y los datos epidemiológicos y clínicos de este sistema de poleas.

Las lesiones de las poleas flexoras de la mano son identificables a través de diferentes estudios imagenológicos como la resonancia magnética y la ultrasonografía, sin embargo, cuando se trata de lesiones en las poleas cruciadas (C1-C3) puede dificultar su identificación a través de imágenes diagnósticas dado que su espesor es mucho menor en comparación con las poleas anulares (A1-A5), por lo que su descripción en la literatura suele ser reducida. Paradójicamente, la lesión más frecuente en los dedos trifalángicos ocurre en la segunda polea anular (A2) ya que biomecánicamente es la que más carga soporta. Las poleas A1, A3 y A5 se lesionan con menor frecuencia dado que tienen soporte en la placa volar a nivel de las articulaciones metacarpofalángicas, interfalángicas proximales e interfalángicas distales, lo que les otorga mayor resistencia ante la tensión mecánica. Las poleas A2 y A4 se unen al periostio a nivel de la falange proximal y media, lo que las hace menos resistentes ante el estrés biomecánico. El esguince o la ruptura de la polea puede estar asociado con la tensión en arco ejercida por los tendones de los músculos flexores de los dedos durante el agarre.³ De esta manera, el objetivo de esta revisión es realizar una descripción morfofuncional del sistema de poleas flexoras de la mano humana y los compromisos funcionales ante su lesión traumática.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión bibliográfica basada en la metodología PRISMA, para ello se realizó una búsqueda avanzada en la base de datos MEDLINE desde su buscador biomédico Pubmed. Se utilizaron palabras clave con vocabulario controlado MESH y el operador booleano AND, logrando el siguiente algoritmo: *((flexor pulley injury) AND (flexor tendon anatomy)) AND (hand injury); además de los descriptores en salud: tendon injury y hand injury.*

Inicialmente se encontraron 60 documentos, los cuales fueron filtrados por los criterios de inclusión: artículos de revisión, reportes de caso y ensayos clínicos controlados y aleatorizados, metaanálisis y libros que contengan una descripción anatómica del sistema tendinoso flexor de la mano, el sistema de poleas y con ello las diferentes variaciones anatómicas y las principales lesiones. El rango de publicación de los documentos estuvo entre los años 1990 y 2022. Se descartaron artículos realizados en animales, efectos farmacológicos y técnicas quirúrgicas de reparación. Los idiomas incluidos fueron inglés y español. Finalmente fueron incluidos 26 artículos que aportaron al objetivo de la revisión.

RESULTADOS

El sistema de poleas flexoras de la mano comprende un sistema de vainas fibro-óseas las cuales abrazan los tendones flexores con el fin de tenerlos adyacentes a la cara palmar de las falanges y al eje de movimiento de las articulaciones;^{1,2} esto permite poder trasladar la fuerza de manera adecuada y equitativa desde el músculo y tendón a la articulación interfalángica. En los dedos II, III, IV y V existen cinco poleas anulares (A1-A5) y tres poleas cruzadas o cruciadas (C1-C3) las cuales se organizan en orden descendente desde proximal hacia distal;² en cuanto a su inserción, las poleas A2 y A4 se insertan directamente en el hueso de las falanges proximal y media respectivamente, y las poleas A1, A3 y A5 se ubican sobre las articulaciones metacarpofalángicas, interfalángicas proximales e interfalángicas distales y estas se insertan en la placa palmar permitiendo la función de compresión sin pinzamiento y expansión durante la flexoextensión de los dedos; todo esto apoyado con el sistema de poleas cruzadas. Las poleas cruzadas C1, C2 y C3, ubicadas entre las poleas A2-A3, A3-A4 y A4-A5, respectivamente, presentan una morfología más fina y cuya función es permitir que la vaina fibrosa se acomode a la flexión digital favoreciendo la aproximación de las poleas anulares entre sí. En el dedo pulgar o primer dedo se encuentran solo tres componentes del sistema de poleas; la polea A1, oblicua (Ao) y A2. La polea A1 se encuentra sobre la articulación metacarpofalángica, la polea oblicua que corresponde a la más importante funcionalmente, se extiende desde la diáfisis de la falange proximal dirigiéndose distal y lateralmente hasta quedar adyacente al tendón del aductor del pulgar y la polea A2 se ubica sobre la articulación interfalángica.

Los dedos II, III, IV y V o dedos trifalángicos, cuentan con tendones flexores superficiales y tendones flexores profundos, a diferencia del I dedo donde se encuentra un tendón flexor largo y un tendón flexor corto. En ambos casos, estas vainas fibrosas (poleas) permiten el direccionamiento de los tendones durante la flexión y extensión de los dedos, al tiempo que permiten su vascularización y facilitan el deslizamiento de los mismos. Para cumplir con esta función mecánica y funcional, los tendones presentan variaciones en su recubrimiento de acuerdo al sitio adyacente óseo o articular donde se da su recorrido: en aquellas zonas con recorrido rectilíneo, los tendones cuentan con un tejido especializado laxo y elástico que los rodea denominado paratendon y en las zonas donde el tendón debe girar sobre su propio eje o presenta desplazamientos curvilíneos se encuentra cubierto por una membrana sinovial delgada que cumple una función de fijación y soporte vascular llamado mesotendon.⁴

En el sistema flexor de las poleas, se han evidenciado tres niveles: En la capa interna e intermedia se producen diversas sustancias como el ácido hialurónico y el colágeno, que ayudan y facilitan el deslizamiento de los tendones dentro de su túnica fibrosa, mientras

la capa externa aporta los componentes nutricionales que necesita el sistema flexor para poder desempeñar su función.⁵

El sistema flexor de los dedos de la mano está caracterizado por tres estructuras organizadas de proximal a distal, empezando por el túnel carpiano, el túnel palmar de los tendones flexores y las vainas fibrosas digitales.

El túnel carpiano se encarga de mantener fijo sobre la línea media a los tendones de los músculos flexores que van del II al V dedo de la mano. Esta estructura se superpone al túnel palmar.

El túnel palmar delimitado lateral y medialmente por los tabiques paratendinosos verticales (septos de Legueu-Juvara), ventralmente por las fibras transversales de la aponeurosis palmar media y dorsalmente por la aponeurosis palmar profunda o interósea; permite la identificación de los tendones flexores contenidos en su interior, además de los músculos lumbricales y las vainas vasculonerviosas que se extienden en los túneles vecinos; en esta zona se proyectan las vainas sinoviales digitales carpianas: una interna correspondiente a los dedos trifalángicos que quedarán sobre el túnel carpiano y una externa para el tendón del músculo flexor largo del pulgar, el cual se encuentra en un compartimiento exclusivo y mantiene su trayectoria gracias a que tiene contacto directo con las paredes óseas de los huesos escafoides y el trapecio. Las vainas sinoviales forman una cavidad sinovial entre el tendón y el interior de la vaina fibrosa donde los mesotendones proporcionan la nutrición vascular a los tendones.

Por último se encuentran las vainas fibrosas digitales, extendiéndose desde los metacarpos hasta las falanges distales del II al V dedo: en esta, se insertan cinco poleas anulares (A1, A2, A3, A4 y A5) conformadas por bandas gruesas y tres poleas cruciformes (C1, C2 y C3) mucho más delgadas y flexibles. Estas últimas, se fijan a las crestas laterales de la falange proximal y media y en las placas palmares de las articulaciones digitales. En el pulgar a diferencia de los dedos trifalángicos, la vaina fibrosa está formada por tres poleas, dos anulares (A1 y A2) y una oblicua (Ao).⁴

Este sistema conforma una estructura compleja que permite una función normal y eficiente de los tendones flexores presentando una organización alterna entre las poleas, siendo A1, A2, C1, A3, C2, A4, C3, A5 para los dedos trifalángicos y A1, Ao y A2 para el pulgar. Su localización y longitud se describen en la Tabla 1. En cuanto a su inserción las poleas A2 y A4 se insertan directamente en el hueso en las falanges proximal y media, de forma respectiva. Las poleas A1, A3 y A5 presentan una morfología más estrecha y mucho más flexible, lo que les permite ubicarse sobre las articulaciones de los dedos y adaptarse a los movimientos de flexión y extensión de los dedos, respaldadas por las poleas cruzadas. Las poleas cruzadas C1, C2 y C3 presentan una morfología más finas y su función es permitir que la vaina fibrosa se acomode

Tabla 1. Características de las poleas flexoras para los dedos II-V y para el I dedo. Fuente: Morro-Martí *et al* (2015)⁴

Sistema de poleas de los dedos II, III, IV, V		
Polea	Longitud	Localización
Polea A1	10 mm	Se extiende desde 5 mm proximal a la articulación metacarpofalángica hasta la base de la falange proximal.
Polea A2	20 mm	Separada por 2 mm de la A1. Se origina en la zona proximal de la falange proximal.
Polea C1	4 mm	Distal a la A2. Localizada en la zona distal de la falange proximal.
Polea A3	3 mm	Localizada a nivel de la articulación interfalángica proximal.
Polea C2	3 mm	Localizada en la base de la falange media.
Polea A4	12 mm	Se localiza en la zona media de la falange media.
Polea C3	***	Banda Oblicua, distal a la A4.
Polea A5	***	Localizada a nivel de la articulación interfalángica distal.

Sistema de poleas del dedo I		
Polea A1 o proximal	4 a 8 mm	Localizada a nivel de la articulación metacarpofalángica, fijándose en la placa palmar y la base de la falange proximal.
Polea oblicua	8 a 11 mm	Localizada a nivel de la diáfisis de la falange proximal, dirigiéndose de forma cruzada en dirección distal y radial.
Polea A2 o distal	5 a 10 mm	Localizada a nivel de la articulación Interfalángica, cerca de la inserción tendinosa del músculo flexor largo del pulgar y se fija a la placa palmar

a la flexión digital favoreciendo la aproximación de las poleas anulares entre sí.⁵

Algunas poleas desempeñan un rol más importante en el sistema flexor como lo son la A2 y A4 en dedos trifalángicos y la polea oblicua en el I dedo, ya que estas mantienen la biomecánica normal de la mano, y junto con el resto de poleas crean un sistema conjunto que permite el movimiento de los tendones y genera eficacia en todo el aparato flexor, todo esto gracias a que pueden mantener los tendones y el hueso en una estrecha relación, permitiendo su anclaje sobre los ejes de rotación y el movimiento articular propiamente dicho (Figura 1).

El sistema de poleas flexoras del pulgar, la polea A1 se encuentra sobre la articulación metacarpofalángica, la polea oblicua se extiende desde la diáfisis de la falange proximal dirigiéndose distal y lateralmente hasta quedar adyacente al tendón del aductor del pulgar y la polea A2 se ubica sobre la articulación interfalángica (Figura 2), adicional a estas tres poleas constantes, existe una polea variable (Av), localizada entre la polea A1 y Ao, esta ha sido encontrada en el 90% de los especímenes cadavéricos con tres posibles orientaciones: Transversa, oblicua o continua con la polea A1.^{6,7}

La primera polea anular del pulgar (A1) mide alrededor de cuatro a ocho milímetros de longitud, con un promedio de seis, se ubica a nivel de la articulación metacarpofalángica y se relaciona de cerca con el tendón de la cabeza profunda del músculo flexor corto del pulgar. Es una de las principales poleas encargadas de prevenir el *bowstringing* o efecto en cuerda de arco del pulgar durante su flexión.

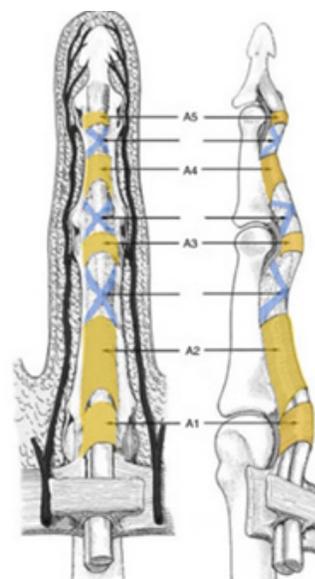


Figura 1. Vista palmar y lateral de la distribución de las poleas flexoras para los dedos II-V. Imagen tomada de Morro-Martí *et al* (2015).⁴

La segunda polea anular (A2) se localiza a nivel de la articulación interfalángica y mide de cinco a 10 milímetros de longitud. Si esta polea se encuentra intacta, la lesión de la polea A1 o la oblicua no resultará en *bowstringing*, sin embargo, tiene poca contribución al arco de movilidad funcional del pulgar.^{8,9}

La polea oblicua (Ao) mide entre tres y cinco milímetros de lon-

Sistema de poleas digitales de la mano

gitud, se origina en la mitad proximal de la falange proximal y está estrechamente relacionada con el tendón del músculo aductor del pulgar, es considerada la polea más importante del pulgar ya que junto a la polea A1 previene la deformidad en cuerda de arco. Tiene una función similar a la de las poleas cruciformes de los demás dedos, además de facilitar la excursión total del tendón del músculo flexor largo del pulgar.

La polea variable (Av) mide entre cuatro y ocho milímetros de longitud, su función es ayudar a prevenir el *bowstringing* y se localiza entre A1 y la polea oblicua (Ao) por lo que anteriormente se pensaba que era parte de esta última. Tiene tres variables anatómicas:

- Tipo I: transversal, paralela a la polea A1, con un espacio entre la polea Av y A1.
- Tipo II: sin espacios entre Av y A1, es decir, continua con la polea A1.
- Tipo III: Av oblicua o triangular con fibras que convergen en el lado radial.

En la Tabla 1 se describen las características de las poleas flexoras para los dedos II-V y para el I dedo.⁴

La irrigación de las poleas depende de su localización anatómica; debido a que las vainas musculotendinosas son irrigadas a través de los vasos segmentarios, estos están distribuidos en vasos proximales y distales que discurren por el paratendón y el epitendón. Las porciones tendinosas reciben su vascularización dependiendo de su ubicación anatómica: en los extrasinoviales, los vasos llegan a través de mesotendones que forman una serie de arcos y esto genera vascularización segmentaria, sin embargo, cuando son intrasinoviales la vascularización depende de pequeños vasos que penetran el mesotendón y se comunican con pequeños vasos intratendinosos. Por otro lado, los dedos trifalángicos reciben su irrigación por medio de pequeños vasos que provienen de las arterias comunicantes transversas, ramas de la arteria digital. Se define una vincula larga y una corta para cada uno de los tendones flexores permitiendo así la libre excursión tendinosa al mismo tiempo que se irrigan. Este sistema se localiza en el canal digital llegando al sistema tendinoso por su porción dorsal. La vincula larga nace a nivel de las articulaciones interfalángicas y las cortas nacen cerca de la inserción tendinosa. Este sistema vincular va a generar un gran aporte vascular que facilita la difusión de nutrientes a través del líquido sinovial.⁴

Mecanismos de lesión más frecuentes y estudios biomecánicos

Las poleas A2 y A4 se insertan directamente en el hueso cortical de las falanges de los dedos y comprenden las mayores poleas de todo el sistema flexor ya que biomecánicamente son las que más estrés soportan, lo que las hace más propensas a sufrir

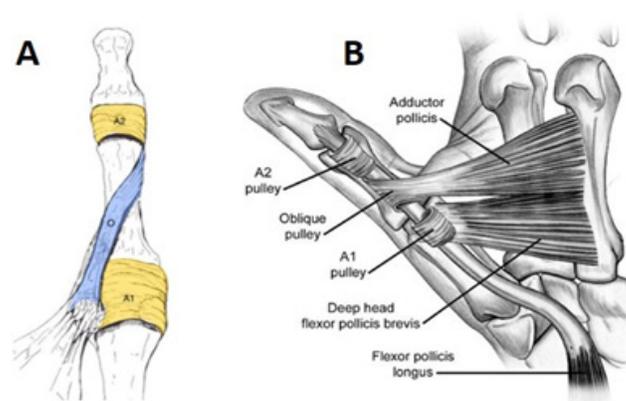


Figura 2. Sistema de poleas flexoras del pulgar. A. Distribución de las poleas A1, Ao y A2. Imagen tomada y modificada de Morro-Martí et al (2015).⁴ B. Relación de las poleas con músculos intrínsecos. Imagen tomada y modificada de Migoya-Nuño et al (2021).⁷

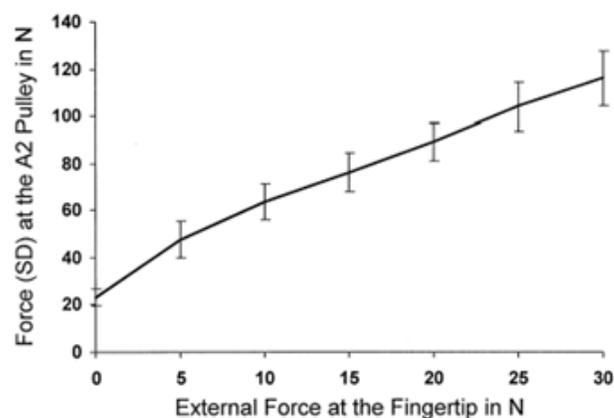


Figura 3. Fuerza de arco fisiológico que actúa sobre el borde distal de la polea A2 bajo fuerza externa en flexión. Imagen tomada de Schweizer (2001).⁹

lesiones. Como cualquier otro tejido, el tejido fibroso del que están compuestas las poleas es susceptible de sufrir ruptura si su carga tolerable es excedida. La polea A2 sostiene los tendones del músculo flexor superficial y profundo de los dedos, lo que ciertamente la pone bajo un mayor estrés mecánico durante el agarre. La cantidad de fuerza que debe soportar la polea A2 está determinada por dos factores principales, el ángulo de flexión de la articulación interfalángica proximal y la cantidad de carga externa ubicada en el extremo distal del dedo, es decir, la cantidad de peso que debe soportar. Un estudio realizado en Berna (Suiza) en 2001 por Schweizer *et al*, lograron determinar que la fuerza en el extremo más distal del dedo es proporcional a la fuerza que

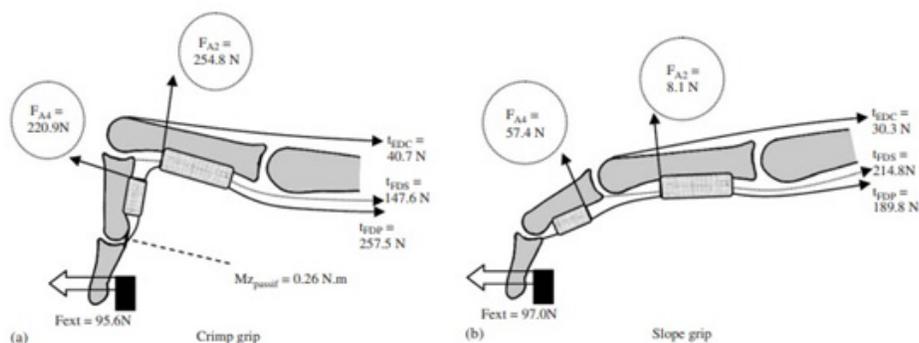


Figura 4. Fuerzas medias que actúan sobre las poleas A2 (FA2) y A4 (FA4) en el *crimp grip* (a) y en el *slope grip* (b). Imagen tomada de Vigouroux *et al* (2006).¹²

debe soportar la polea, en este caso la polea A2^{10,11} tal como se muestra en la Figura 3.

Las pruebas biomecánicas han sido capaces de demostrar que la cantidad de fuerza en la polea A2 es directamente proporcional a la fuerza externa realizada en la punta del dedo, sin embargo, el ángulo en la articulación interfalángica proximal también ha demostrado jugar un papel importante en los mecanismos de lesión, pues a mayor flexión, más fuerza en la polea. En un estudio realizado por Vigouroux *et al* en 2005 se pudo demostrar que las diferentes técnicas de agarre suponen cambios significativos en cuanto a la tensión a la que es sometida cada polea: al realizar agarre en pendiente (*slope grip*), las fuerzas que actuaban sobre la polea A2 eran casi 36 veces menores en comparación con el agarre engarzado (*crimp grip*), mientras las fuerzas sobre A4 eran casi cuatro veces menores con el agarre en pendiente¹² (Figura 4). De esta manera, factores como un mayor ángulo de flexión de la articulación interfalángica proximal y una mayor carga para la punta del dedo supone un mayor riesgo de ruptura de las poleas, principalmente de A2, que por razones ya mencionadas es más propensa a sufrir lesiones. Adicionalmente, si la ruptura de la polea A2 ocurre de manera concomitante con A3 y A4, el resultado es un arqueamiento del dedo, conocido clínicamente como cuerda de arco o por su término en inglés *Bowstringing*¹³ lo que lleva a pérdida de la fuerza y disminución del rango de movilidad¹⁴ (Figura 5)

La escalada y el montañismo se han convertido en gran fuente de lesiones para el sistema flexor de poleas, un ejemplo de ello es que en un estudio realizado por Schöffl *et al* entre 1998 y 2001, identificó que las lesiones de poleas eran las más frecuentes en estas disciplinas deportivas, sin embargo, la polea con mayor índice de lesión fue la A2 seguida de la A4, lo que puede haber sido consecuencia de los mecanismos biomecánicos de la técnica de agarre utilizada por los deportistas.¹⁵

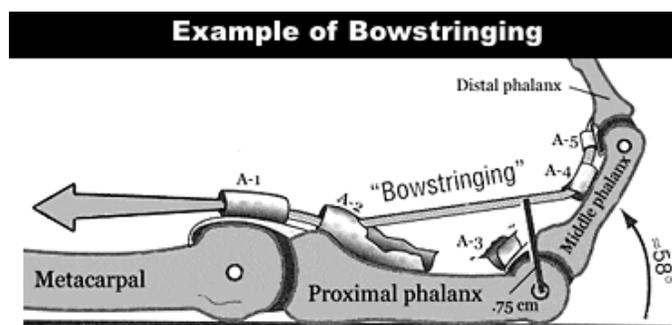


Figura 5. Fuerza de arco fisiológico que actúa sobre el borde distal de la polea A2 bajo fuerza externa en flexión. Imagen tomada de Schweizer (2001).⁹

En 2015, un estudio de serie de casos realizado por los mismos autores con 911 casos de lesiones durante climbing entre los años 2009 y 2012, encontró que el 52% de las lesiones fueron a nivel de los dedos, siendo la más frecuente la lesión en el sistema flexor de poleas con un 15,4%, y nuevamente la polea más frecuentemente lesionada fue la A4 seguida de la A2.¹⁶ Las lesiones grado I son lesiones por estiramiento sin evidencia de distanciamiento entre el ligamento y el hueso (<2mm) visible a través de resonancia nuclear magnética o ultrasonido. Por otro lado, las lesiones grado II como la ruptura completa de A2 tienen buen pronóstico con una recuperación completa entre las cuatro y seis semanas. La razón por la que la ruptura completa de A2 o A3 no están catalogadas como grado II sino como grado III es porque estas suelen tener mayores repercusiones funcionales y requieren mayor tiempo de recuperación. Las lesiones Grado IV son mucho más complejas y deben ser abordadas quirúrgicamente, mientras que las que van de grado I a grado III pueden ser candidatas a manejo conservador.¹⁷ (Tabla 2)

Desde 1990 diferentes investigadores como Bollen *et al*¹⁸ y Tropet *et al*¹⁹ han reportado buenos resultados de tratamiento para la ruptura de las poleas secundaria a trauma cerrado de los dedos, Bollen *et al* a favor del manejo conservador y Tropet *et al* a favor del manejo quirúrgico: sin embargo, al no haber una guía clara de manejo, la elección de un manejo u otro suele determinarse a través de la valoración de la severidad; por ejemplo, para las rupturas únicas, el manejo conservador ha sido el tratamiento de elección, puesto que los estudios y análisis biomecánicos han arrojado resultados óptimos para aquellos pacientes que reciben terapia física después de la ruptura de una polea,²⁰⁻²² Schöffl *et al*, apoyó esta afirmación al indicar que el déficit de fuerza secundario a la lesión puede recuperarse después de tres a seis meses de manejo conservador.¹⁷ Sin embargo, la decisión de elegir manejo conservador o quirúrgico no ha sido muy bien descrita para cada una de las poleas, pues se sabe que anatómicamente y funcionalmente, estas tienen características diferentes que las pueden hacer requerir mayor tiempo de recuperación como lo es el caso de la polea A2, por esta razón, lo recomendable es la individualización de cada caso a la hora de elegir el manejo.¹⁷

Los estudios que han informado la tasa de éxito de las reparaciones quirúrgicas de las poleas han sido muy limitados, sin embargo, en un estudio con siete pacientes con lesiones grado IV que se sometieron a reconstrucción quirúrgica se encontraron resultados excelentes en cuatro de ellos, buenas en dos y aceptable en uno. Los resultados funcionales fueron excelentes en uno de los pacientes, buenos en cinco y aceptables en uno, mientras que las habilidades específicas de cada deporte fueron excelentes en uno, buenas en tres y aceptables en dos de los pacientes.¹⁷ La categorización de los resultados quirúrgicos se hizo a través del *Buck-Gramcko score* que incluye tres variables, el grado de flexión de la articulación interfalángica, el retraso en la extensión y la movilidad activa total.

Es importante aclarar que las tasas de éxito de estas cirugías están influenciadas por diferentes factores como la técnica quirúrgica utilizada, la gravedad y cronicidad de la lesión, la adherencia a las medidas no farmacológicas por parte del paciente incluida la terapia física, entre otros, por lo que es difícil establecer cifras, sobretodo cuando los estudios reportados en la literatura presentan muestras pequeñas.¹⁷

DISCUSIÓN

La mano es un órgano de grandes capacidades motoras y sensitivas. Permite la relación del ser humano con su entorno y todo esto está dado por los diferentes sistemas que la conforman.

El sistema de poleas flexoras de la mano comprende un sistema especializado y muy detallado que puede verse alterado fácilmente por traumatismo directos, exceso de fuerza o mecanismos de estrés

Tabla 2. Grados de lesión del sistema de poleas flexoras. Tabla modificada de Schöffl y Schöffl (2006).¹⁷

Grado	Lesión
Grado I	Distensión de la polea.
Grado II	Ruptura completa de A4 o ruptura parcial de A2 o A3.
Grado III	Ruptura completa de A2 o A3.
Grado IV	Rupturas múltiples como A2/A3, A2/A3/A4 o ruptura única (A2 o A3) combinada con trauma de los músculos lumbricales de la mano o trauma colateral de los ligamentos.

continuo, es por ello que las pruebas robóticas van orientadas a detallar como se afecta la funcionalidad del aparato flexor digital con lesiones individuales o combinadas de estas estructuras.

Desde finales del siglo XX se han venido estudiando las implicaciones clínicas de las lesiones de este sistema de poleas a través del seccionamiento secuencial y selectivo de las poleas anulares y de la aponeurosis palmar. En 1983 Manske y Lesker notaron que la sección de cualquiera de las tres poleas proximales tenía mínimas implicaciones funcionales, sin embargo, cuando la aponeurosis palmar era seccionada conjuntamente con las poleas anulares uno y dos (A1 y A2) había una pérdida significativa o total del arco de movimiento respecto a la sección de las poleas anulares solas. Lo que se logró demostrar con este estudio es que las fibras transversas de la aponeurosis palmar también tienen una función significativa como polea.²³

La polea de la aponeurosis palmar comienza de uno a tres milímetros desde el borde proximal de la vaina sinovial y está anclado a cada lado de la vaina por fibras verticales que se adhieren al ligamento metacarpiano transversal profundo, esta polea es más ancha sobre el tercer y cuarto dedo donde alcanza un ancho entre los ocho y los 10 milímetros. Durante el estado de reposo, la polea de la aponeurosis palmar no está tan estrechamente relacionada con los tendones como las otras poleas, sin embargo, un acercamiento entre estas estructuras ocurre gracias a la tensión durante el agarre.²³

Las lesiones del sistema de poleas son poco comunes en la población general y normalmente ocurren cuando una fuerza externa ejerce presión y genera la lesión, este tipo de lesiones tiene una alta incidencia en deportistas, en los últimos años se ha reportado al alpinismo como uno de los deportes en donde más comunes se han vuelto estas lesiones. La lesión predominante en los tendones o poleas flexoras de los dedos es de la polea A2 también conocida como “dedo de escalador”, la cual representa el 33% de todas las lesiones por escaladas que son notificadas,²⁴ así como este, otros

deportes como el fútbol, rugby o fútbol bandera también generan un gran porcentaje de lesiones en esta zona.²⁵

CONCLUSIONES

La distribución y ubicación anatómica de las vainas fibrosas o poleas del aparato flexor de la mano otorga perfiles biomecánicos diferentes a cada uno de los dedos, lo que implica que algunas de estas poleas deban soportar más tensión durante las actividades cotidianas y/o laborales y con ello sean más propensas a lesionarse. Estas lesiones que en muchas ocasiones son pasadas por alto pueden generar consecuencias funcionales importantes que repercuten en la calidad del vida de los pacientes. Comprender la anatomía del sistema flexor, la biomecánica y sus mecanismos de lesión son de vital importancia para los profesionales de salud, con el fin de ofrecer una atención oportuna, diagnósticos acertados y tratamientos o planeaciones quirúrgicas que permitan mejorar la capacidad funcional.

REFERENCIAS

- Osnaya-Moreno H, Romero-Espinosa F, Mondragón-Chima M, Ochoa-González G, Escoto-Gómez J. Estudio epidemiológico de las lesiones traumáticas de mano en un Centro Médico de Toluca, Estado de México. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*. 2014; 82(5). <https://www.redalyc.org/pdf/662/66231760006.pdf>
- Mallo GC, Sless Y, Hurst LC, Wilson K. A2 and A4 Flexor Pulley Biomechanical Analysis: Comparison among Gender and Digit. *HAND* (2008) 3:13–16. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/23245888_A2_and_A4_Flexor_Pulley_Biomechanical_Analysis_Comparison_among_Gender_and_Digit
- Khalilzadeh O, Canella C, Fayad LM. Wrist and Hand. In J. Hodler (Eds.) et. al., *Musculoskeletal Diseases 2021-2024: Diagnostic Imaging*. 2021; 41-55. DOI: 10.1007/978-3-030-71281-5_4
- Morro Martí MR, Pérez ML, Carrera-Burgaya A, Forcada-Calvet P, Gondolbeu AM. Anatomía aplicada a la cirugía de los tendones flexores. *Revista Iberoamericana de Cirugía de la Mano*. 2015; 43(2):128-134. DOI: 10.1016/j.ricma.2015.08.001.
- Londoño JA, Náquira Escobar LF, Duque Orozco M del P. Ruptura de la polea A2 luego de una cirugía para la liberación de dedo en gatillo: informe de dos casos y revisión de la literatura. *Revista Colombiana de Ortopedia y Traumatología [Internet]*. 2014; 28(3):120-7. DOI: 10.1016/j.rccot.2015.04.004
- Lin GT, Cooney WP, Amadio PC, An KN. Mechanical properties of human pulleys. *Journal of hand surgery (Edinburgh, Scotland)*. 1990; 15(4):429-434. DOI: 10.1016/0266-7681(90)90085-i
- Migoya-Nuño A, Fraind-Maya G, Loyo-Soriano LE. Pulgar en gatillo, pulgar en resorte, o tenosinovitis estenosante del pulgar pediátrico. *Acta Pediatr Méx* 2021; 42(2):89-91. DOI: 10.18233/APM42No2pp89-912221
- Kosiyatrakul A, Jitprapaikulsarn S, Durand S, Oberlin C. Closed flexor pulley rupture of the thumb: case report and review of literature. *Hand surgery : an international journal devoted to hand and upper limb surgery and related research : journal of the Asia-Pacific Federation of Societies for Surgery of the Hand*. 2009; 14(2-3):139-142. DOI: 10.1142/S02188104090004384
- Schweizer A. Biomechanical properties of the crimp grip position in rock climbers. *Journal of biomechanics*. 2001; 34(2):217-223. DOI: 10.1016/s0021-9290(00)00184-6
- Brown MS, O'Donnell J, Walz D. Closed rupture of the flexor tendon pulleys of the thumb. *Clinical imaging*. 2019; 58:66-69. DOI: 10.1016/j.clinimag.2019.06.004
- Roloff I, Schofl VR, Vigouroux L, Quaine F. Biomechanical model for the determination of the forces acting on the finger pulley system. *J Biomech*. 2006; 39:915-923. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2005.01.028.
- Vigouroux L, Quaine F, Labarre-Vila A, Moutet F-O. Estimation of finger muscle tendon tensions and pulley forces during specific sport-climbing grip techniques. *J Biomech*. 2006; 39:2583-2592. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2005.08.027.
- Neumann DA, Kelly ER, Kiefer CL, Martens K, Grosz CM. *Kinesiology of the Musculoskeletal System : Foundations for Rehabilitation*. Ed. Elsevier, St. Louis, Missouri. 2017
- Marco RA, Sharkey NA, Smith TS, Zissimos AG. Pathomechanics of closed rupture of the flexor tendon pulleys in rock climbers. *J Bone Joint Surg*. 1998; 80A:1012-1019.
- Schöffl V, Hochholzer T, Winkelmann HP, Strecker W. Pulley injuries in rock climbers. *Wilderness & environmental medicine*. 2003; 14(2):94-100. DOI: 10.1580/1080-6032(2003)014[0094:pire]2.0.co;2
- Schöffl V, Popp D, Küpper T, Schöffl I. Injury Trends in Rock Climbers: Evaluation of a Case Series of 911 Injuries Between 2009 and 2012. *Wilderness & Environmental Medicine*. 2015; 26(1):62-67. DOI: 10.1016/j.wem.2014.08.013
- Schöffl V R, Schöffl I. Injuries to the finger flexor pulley system in rock climbers: current concepts. *The Journal of hand surgery*. 2006; 31(4):647-654. DOI: 10.1016/j.jhssa.2006.02.011
- Bollen SR. Injury to the A2 pulley in rock climbers. *J Hand Surg* 1990; 15B:268-270.
- Tropet Y, Menez D, Balmat P, Pem R, Vichard P. Closed traumatic rupture of the ring finger flexor tendon pulley. *J Hand Surg* 1990; 15A:745-747.
- Bollen SR, Gunson CK. Hand injuries in competition climbers. *Br J Sports Med* 1990; 24:16-18.
- Hochholzer T, Heuk A, Hawe W, Keinath C, Bernett P. Verletzungen und U^lberlastungssyndrome bei Sportkletterern im Fingerbereich. *Prakt Sport Trauma Sportmed* 1993; 2: 57-67.
- Holtzhausen LM, Noakes TD. Elbow, forearm, wrist, and hand injuries among sport rock climbers. *Clin J Sport Med* 1996; 6:196-203.
- Doyle JR. Anatomy of the flexor tendon sheath and pulley system: a current review. *J Hand Surg Am [Internet]*. 1989; 14(2 Pt 2): 349-

51. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036350238990110X>
24. King EA, Lien JR. Flexor Tendon Pulley Injuries in Rock Climbers. *Hand Clin.* 2017; 33(1):141-148. DOI: 10.1016/j.hcl.2016.08.006. PMID: 27886830. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27886830/>
25. Gil Santos L, Beltrán JA, Barrios Pitarque C. Lesiones deportivas de la muñeca y mano. *Arch Med Deporte* 2014; 31(1):41-50
26. Warne WJ, Brooks D. The effect of circumferential taping on flexor tendon pulley failure in rock climbers. *Am J Sports Med.* 2000; 8:674-8.