

Sistema de fijación externa atlas para tratamiento de fracturas óseas.

Características mecánicas de un fijador con seis grados de libertad

Dr. Andrés Machado***, Dr. Arlex Leyton**, Dr. Andrés A. Echeverri****, Dr. José Jaime García*

*** Médico Ortopedista – Instituto de Seguros Sociales – Santiago de Cali, Colombia.

Profesor Ad Honorem Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle.

** Ingeniero Mecánico – Estudiante de la Maestría en Ingeniería Mecánica – Universidad del Valle – Santiago de Cali, Colombia.

**** Médico Ortopedista – Profesor Titular Escuela de Medicina – Universidad del Valle - Santiago de Cali, Colombia.

* Ph.D. – Ingeniero Mecánico – Profesor Titular Escuela de Ingeniería Civil y Geomática – Universidad del Valle – Santiago de Cali, Colombia.
E-mail: josejgar@univalle.edu.co

Resumen

Se describe un sistema de fijación externa desarrollado en la Universidad del Valle que ofrece una gran versatilidad para diferentes tipos de fracturas, es de costo muy competitivo y cumple los requisitos de estabilidad y rigidez. La base del sistema consiste en una prensa de seis grados de libertad que permite construir configuraciones de doble barra, que brindan buena estabilidad. El sistema está complementado por anillos de aluminio y otros accesorios que permiten configurar desde fijadores monoplanares para fracturas diafisarias hasta fijadores híbridos para tratar fracturas complejas como las del pión tibial. Se presentan los componentes del sistema, algunas configuraciones típicas, sus características mecánicas realizadas mediante procedimientos computacionales validados experimentalmente en el laboratorio, buscando la matriz de flexibilidad interfragmentaria. Los resultados indicaron una rigidez y una estabilidad comparables con las de otros fijadores internacionalmente probados y aceptados, en nuestro medio. Desde el punto de vista biomecánico el sistema está listo para ser probado clínicamente.

Palabras Clave: Fijador externo, fractura diafisaria

Abstract

External fixation system atlas for bone fracture treatment. Mechanical characterization of a fixation with six degrees of freedom

A versatile low-cost external fixation system developed at the Universidad del Valle is presented which fulfills stability and stiffness requirements. The core of the system is a six-degree-freedom connector which allows to build stable double-bar configurations with which is possible to maintain six-degree of freedom between bone fragments. The system is complemented with aluminum rings and other parts in order to construct different configurations ranging from monoplanar fixators for diaphyseal fractures to hybrid fixators for the tibial pilon fracture. The components of the system and three typical configurations are presented as well as the mechanical characterization, obtained with a procedure based on a computational model validated experimentally to determine the inter-fragmentary compliance matrix. Results indicated that stability and stiffness are similar to those of other internationally used and accepted fixators used in our region. From the biomechanical point of view the system is ready to be tested clinically.

Key words: External fixator, diaphyseal fracture.

Introducción

Los fijadores externos son herramientas indispensables para el tratamiento de fracturas de los huesos. Existen muchas configuraciones de fijadores externos entre las cuales se pueden citar la unilateral, la de anillos y la configuración

combinada que da origen al fijador híbrido. Características esenciales de un buen fijador externo son que tenga la versatilidad suficiente para permitir una adecuada reducción de la fractura y que después de ser instalado provea la estabilidad y la rigidez necesarias para la formación de un buen callo óseo ⁽¹⁾. Además, es deseable que el fijador no sea muy

voluminoso y pesado, y en nuestro medio es conveniente además que el costo no sea muy alto.

Son pocos los fijadores externos desarrollados en nuestro país y en contadas ocasiones se han realizado pruebas para determinar sus características mecánicas.⁽²⁻³⁾ Uno de los modelos es el fijador Sardib, el cual consta de prensas que permiten cuatro grados de libertad entre los clavos y las barras conectoras. Su configuración de doble barra provee muy buena estabilidad y rigidez al conjunto pero es muy difícil de instalar si se desea reducir adecuadamente la fractura, ya que permite sólo dos grados de libertad entre los fragmentos. Adicionalmente, con las configuraciones unilaterales de doble barra, armadas con prensas conectoras de cinco grados de libertad, como las que generalmente se ofrecen comercialmente, se limita la posibilidad de corregir deformidades.⁽⁴⁾ Una fractura mal alineada puede ocasionar complicaciones en articulaciones vecinas debidas a la enfermedad articular degenerativa, secundaria a presiones anormales sobre el cartílago articular.⁽⁵⁾ Por este motivo, algunos estudios se han dedicado al análisis y mejoramiento de la versatilidad de los fijadores para reducir fracturas.⁽⁶⁻⁷⁾ Si se utilizaran conectores de seis grados de libertad se podrían armar configuraciones de doble barra y se conservarían todos los grados de libertad entre los fragmentos de hueso facilitando el manejo de fracturas complejas.

La resistencia y la estabilidad del sistema de fijación externa son factores críticos.⁽⁸⁾ Desde este punto de vista, un sistema de doble barra provee una estabilidad significativamente mayor que el sistema de barra sencillo, en el cual el deslizamiento de un solo conector implica la falla del conjunto. Por otra parte, algunos estudios⁽⁹⁾ han demostrado la influencia de la rigidez del fijador en la curación de la fractura. Por ejemplo, en experimentos con animales se ha llegado a la conclusión que desplazamientos interfragmentarios axiales entre 0.2-1 mm son óptimos para la curación de la fractura.⁽¹⁾ Por el contrario, no está claramente definida la influencia de otros desplazamientos interfragmentarios como los cizallantes. Dada la complejidad de los desplazamientos interfragmentarios, Duda et al⁽¹⁾ y Gardner et al⁽¹⁰⁾ presentaron un procedimiento experimental para determinar la denominada matriz de rigidez interfragmentaria, con la cual se pueden calcular todos los desplazamientos interfragmentarios, como axiales, cizallantes y angulares, dado cualquier caso de carga. Un procedimiento alternativo para evaluar tridimensionalmente los desplazamientos interfragmentarios ha

sido de desarrollado por nuestro grupo,⁽¹¹⁾ fundamentado en experimentos sencillos acompañados de un modelo de elementos finitos. Con base en este procedimiento se documenta la rigidez del sistema ATLAS.

En este documento se describe el sistema de fijación ATLAS que ha sido desarrollado por nuestro grupo para cumplir con los siguientes requisitos: 1. Una buena estabilidad y rigidez mediante una configuración de doble barra, 2. La facilidad para reducir adecuadamente la fractura aún con un mal alineamiento angular y traslacional de los clavos y 3. Sencillez, facilidad de construcción y por tanto bajo costo. Se presentan primero las componentes del sistema, luego los resultados de rigidez obtenidos mediante procedimientos experimentales y computacionales y por último algunas configuraciones típicas.

Materiales y métodos

Componentes del sistema ATLAS

El sistema de fijación ATLAS está compuesto de los siguientes elementos (*Figura 1*): a. Prensa conectora de seis grados de libertad, b. Anillos y semi-anillos de aluminio, c. Conector base. d. Conectores de alambre para los fijadores de anillos, e. Extensores, f. Otros componentes normalizados como, tornillos, tuercas, barras longitudinales y clavos con rosca distal de configuración cónica para fijarlo al hueso.

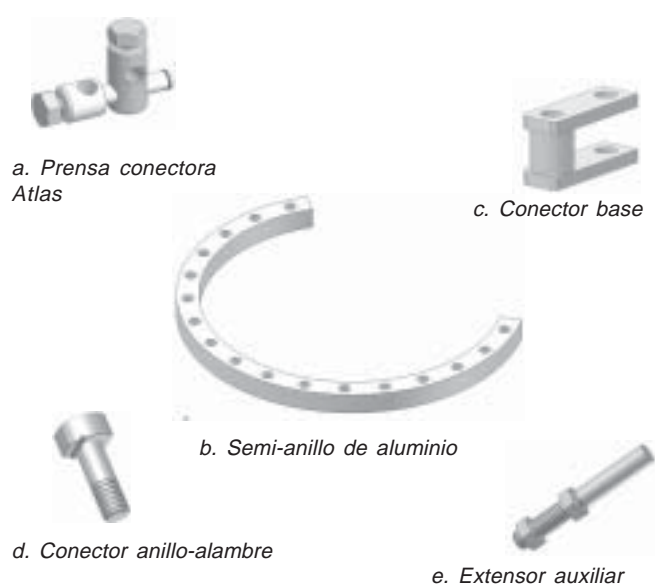


Figura 1. Principales componentes del sistema ATLAS

Para construir fijadores mono y biplanares solo es necesario utilizar las prensas, las barras y los clavos. Para construir otras configuraciones es necesario adicionar los anillos de aluminio, los conectores de alambre y los extensores auxiliares.

Prensa conectora

La prensa conectora, que consiste en dos cuerpos, un inserto y dos tornillos de acero inoxidable, permite despla-

zamientos ilimitados de las barras y los clavos en las direcciones correspondientes a los grados de libertad 1, 2, 3, 4 y 6 (Figura 2a) mientras que en la dirección 5 el desplazamiento esta limitado a 10 mm. El grado de libertad del conjunto depende de factores como el número de clavos y la distancia entre ellos. Con esta prensa es posible tener los seis grados de libertad entre los fragmentos de hueso aún con una configuración de doble barra tal como se representa gráficamente en la Figura 2.

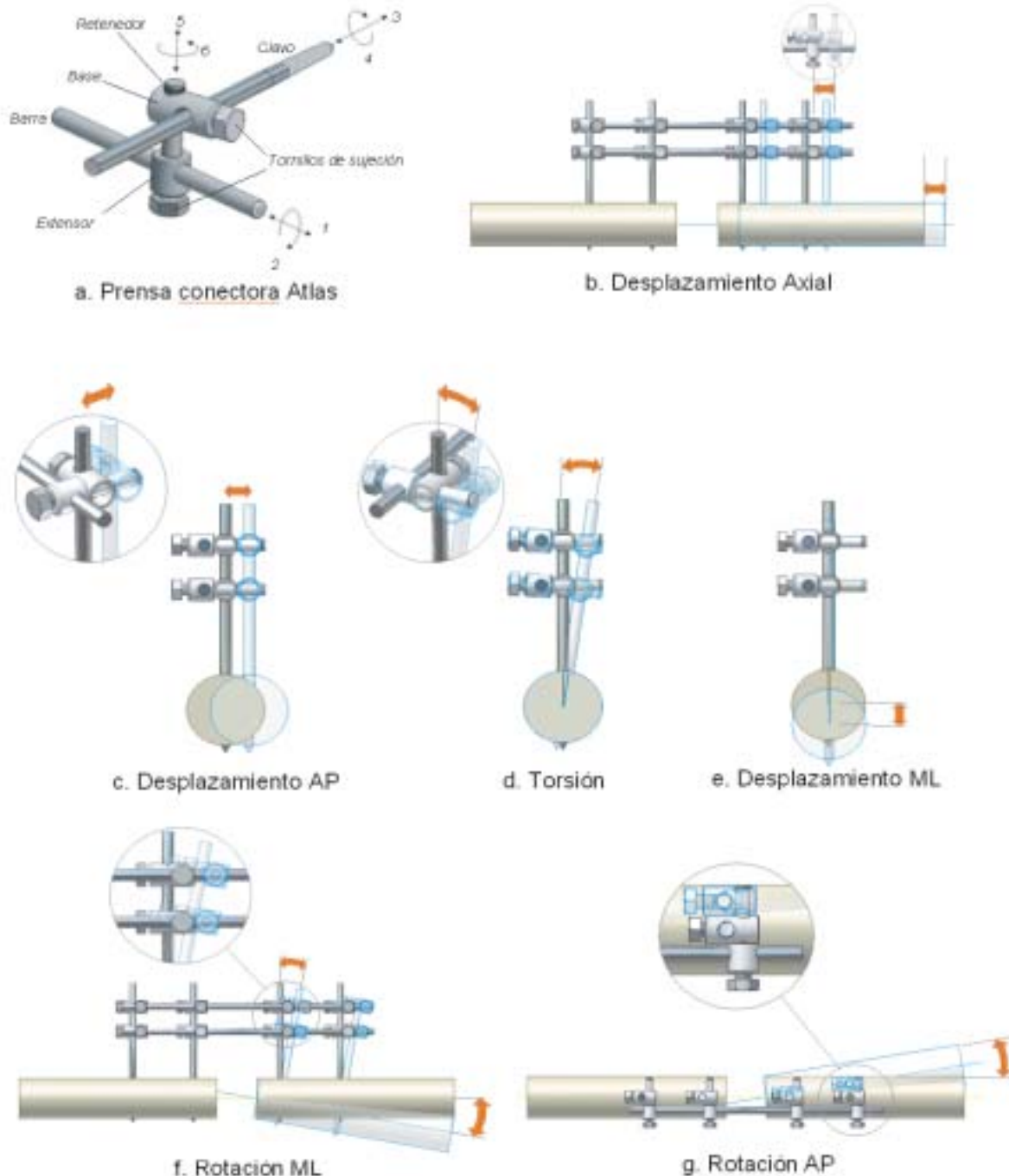


Figura 2. Grados de libertad entre fragmentos mediante el uso de prensas de seis grados de libertad.

Anillos de aluminio

Estos anillos son construidos con barra cuadrada de 1/2" de lado doblada en frío y con orificios para la sujeción de elementos de conexión. Tanto la rigidez como el peso de estos anillos es comparable con la de los anillos de acero utilizados comercialmente.⁽¹²⁾ Adicionalmente, la rigidez del conjunto de los anillos más los alambres tensionados es similar a la obtenida con los anillos de acero.⁽¹¹⁾ La otra característica de estos anillos, vital para la aplicación en nuestro medio, es que son de muy bajo costo. El procedimiento para construir la configuración unilateral de doble barra se describe detalladamente en otro artículo.⁽¹³⁾

Procedimiento para hallar la rigidez del ensamble

Se llevaron a cabo seis pruebas experimentales con aplicación de carga en las direcciones axiales y transversales AP y ML. El procedimiento se aplicó a una configuración uniplanar de cuatro clavos, dos en cada fragmento (Figura 3). En la dirección axial se aplicó una fuerza máxima de 70 Kg. (Figura 4a). Los desplazamientos obtenidos en estas pruebas permitieron calibrar un modelo por computador de elementos finitos generado con el programa comercial Algor (ALGOR, Inc., Pittsburgh, PA, USA). En este modelo (Figura 4b) se utilizaron 1296 elementos ladrillo para representar los fragmentos de Nylon que simulan los huesos y 123 elementos viga que representaron las barras, los clavos y los conectores.

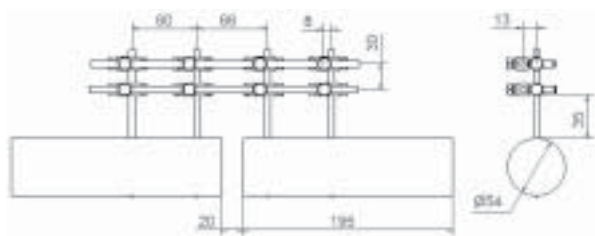


Figura 3. Configuración del fijador Atlas

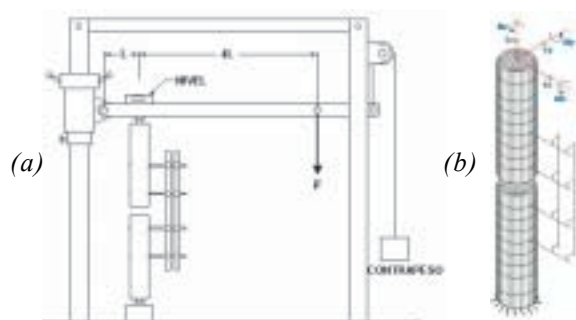


Figura 4. (a) Marco de prueba para la prueba axial. (b) Modelo computacional

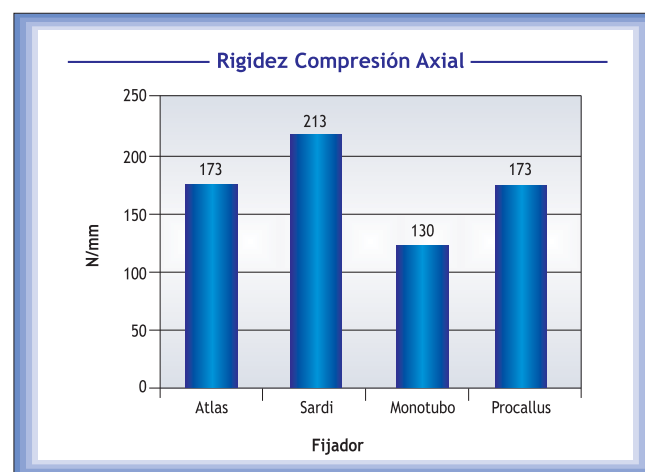
El cambio sucesivo de las propiedades geométricas de los elementos que representaron los conectores permitió calibrar el modelo en la computadora. Con el modelo calibrado fue posible determinar las matrices de flexibilidad y de rigidez tridimensional ínter fragmentarias. Con estas matrices se pueden estimar los desplazamientos ínter fragmentarios dado cualquier caso de carga.

Configuraciones típicas

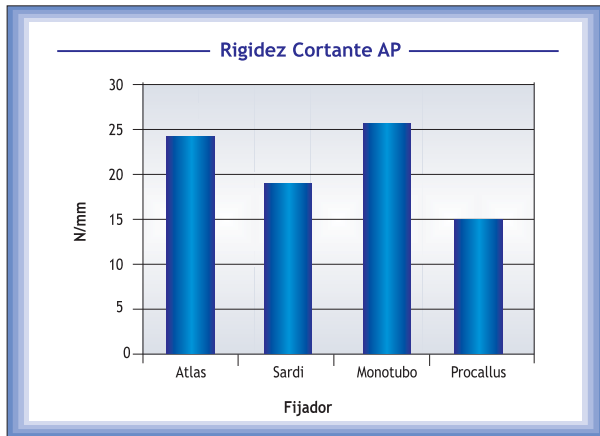
Con el fin de ilustrar algunas posibilidades del sistema, se armaron tres configuraciones típicas, la primera en un modelo de fractura diafisaria con una alineación aceptable de los clavos, la segunda con el mismo modelo de fractura diafisaria con los clavos desalineados y la tercera en un modelo de fractura del patillo tibial.

Resultados

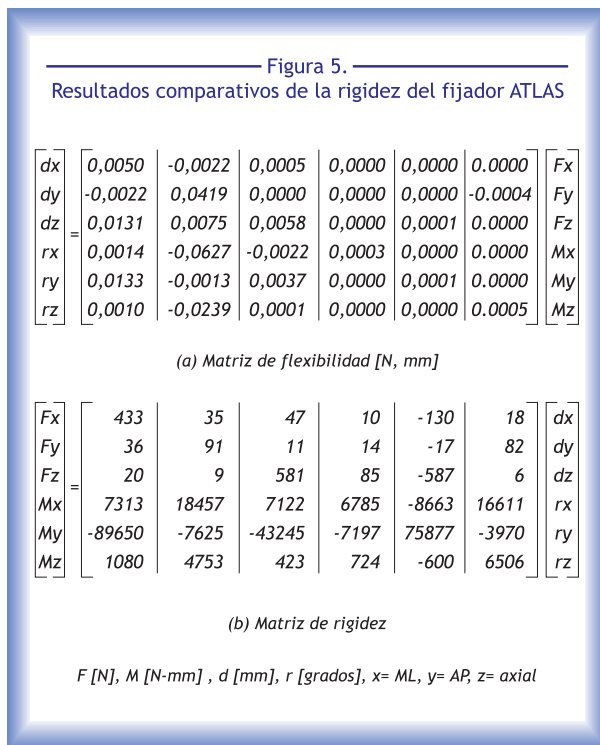
Durante todas las pruebas de carga el fijador mantuvo su estabilidad y no se apreció aflojamiento de las prensas conectoras. Se observó además un comportamiento marcadamente lineal en las curvas carga vs deflexión ($R^2=0.9953$). Cuando se repitieron las pruebas para cada configuración se observó un desplazamiento residual de aproximadamente 0.5 mm para la carga axial. La rigidez del fijador ATLAS (gráfica 1) fue similar a la de otros fijadores reportados en la literatura.



Gráfica 1a. Resultados comparativos de la rigidez del fijador ATLAS. Rigidez compresión axial.



Gráfica 1b. Resultados comparativos de la rigidez del fijador ATLAS. Rigidez cortante AP.



Ecuación 1. Matrices de (a) flexibilidad y (b) rigidez del fijador ATLAS.

En las matrices de flexibilidad y rigidez (ecuación 1) se observa un acoplamiento entre los desplazamientos en cada dirección. Por ejemplo, según la matriz de flexibilidad (ecuación 1a) si se produce una fuerza axial unitaria de 1 N, se ocasiona, además del desplazamiento axial de 0.0058 mm (término de la fila tres, columna tres de la matriz de flexibilidad) un desplazamiento transversal ML de 0.0005 mm (término de la fila uno, columna tres de la matriz de flexibilidad).

Se observó un fácil ensamble del conjunto para el modelo de fractura diafisaria, tanto en la configuración con los

clavos alineados como si no lo estaban. (Figuras 5 y 6). Las prensas de seis grados de libertad permitieron hacer el montaje de una mala alineación de los clavos en el plano del fijador (Figura 6a) y una desalineación menor en la dirección perpendicular al mismo, representada en la Figura 6b por el ángulo formado entre el clavo del frente y los del fondo.



Figura 5. Modelo de fractura diafisaria, clavos aceptablemente alineados



Figura 6 a y 6b. Modelo de fractura diafisaria, clavos desalineados

La configuración para el platillo tibial (*Figura 7*) se pudo armar fácilmente con la doble barra y elementos conectores para el anillo. Además con la misma prensa conectora se colocaron elementos adicionales de refuerzo como clavos y barras (*Figura 7*).

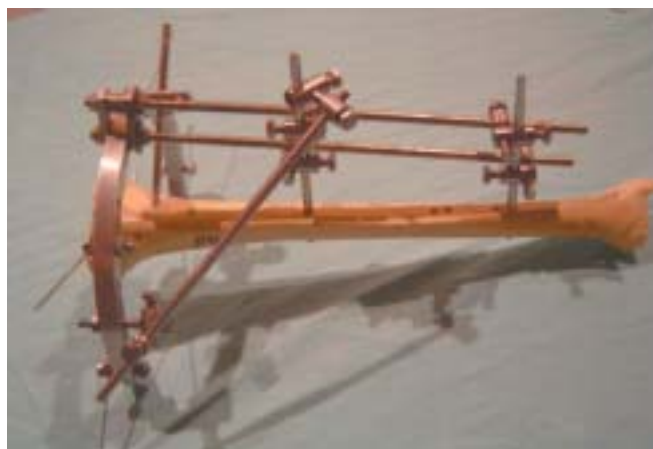


Figura 7. Configuración para el platillo tibial con clavo y barra de refuerzo.

Discusión

Se describió el sistema de fijación ATLAS que permite tratar una variada gama de fracturas de huesos. Parte fundamental del sistema es la prensa conectora de seis grados de libertad entre los fragmentos de hueso en una configuración de doble barra, utilizando dos o más clavos en cada fragmento. El sistema mostró una buena estabilidad para las cargas probado en el modelo de fractura diafisaria. Además la rigidez obtenida en todos los casos de carga fue comparable con la reportada para otros fijadores de uso común.

El cálculo de la matriz de flexibilidad ínter fragmentaria tridimensional mediante procedimientos por computadora, calibrados experimentalmente, permite estimar desplazamientos ínter fragmentarios para cargas complejos. El acoplamiento observado en las matrices de flexibilidad y rigidez obtenidas para el montaje de fractura diafisaria es típico de los sistemas unilaterales, y no se presenta en configuraciones simétricas como la del fijador Ilizarov.⁽¹¹⁾ Otros procedimientos⁽¹⁴⁾ muestran este acoplamiento de una manera parcial mediante el cálculo de la denominada flexibilidad de angulación (angulation compliance) la cual se define como la relación entre el ángulo de giro y el desplazamiento axial ínter fragmentarios en la prueba axial. El valor de acoplamiento máximo obtenido para el fijador ATLAS (0.64) corresponde a la relación entre la rotación en el

plano ML y el desplazamiento axial, es decir entre las componentes 5,3 y 3,3 de la matriz de flexibilidad, respectivamente, y se encuentra en el rango 0.59 - 0.67 reportado para fijadores unilaterales.⁽¹⁴⁾

Sistemas tradicionales de fijación utilizan prensas conectoras de cinco grados de libertad con las cuales es posible activar cuatro grados de libertad entre los fragmentos si se usa una barra conectora. Esos grados de libertad son la translación axial, la translación transversal en dirección de los clavos, la translación transversal perpendicular a los clavos, la cual se activa mediante la rotación respecto a la barra conectora y finalmente el giro en el plano del fijador. La configuración con una barra conectora no es suficientemente estable y generalmente se prefiere unir los clavos mediante dos barras. En este caso, si se utilizan prensas de cinco grados de libertad se pierde la translación en dirección perpendicular al plano de los clavos y sólo se pueden tener tres grados de libertad entre los fragmentos de hueso. Además, si se instalan clavos adicionales en los fragmentos, estos deben coincidir con la posición de la barra de conexión. Por el contrario, con la prensa de seis grados de libertad del sistema ATLAS se mantienen todos los grados de libertad entre los fragmentos de hueso. Tres de ellos, la rotación respecto al eje de los fragmentos, el desplazamiento transversal AP, y la flexión en el plano AP, con limitaciones. No obstante, dada una desviación razonable de los clavos, como la observada en las configuraciones mostradas, el fijador permitiría una adecuada reducción de la fractura. Además de las configuraciones mostradas el sistema tiene otras posibilidades que permitirían por ejemplo hacer uniones entre montajes de fijadores que forman un ángulo de 90°.

El sistema ha sido desarrollado con la idea de que su costo debe ser razonablemente bajo. Esto implica que los elementos mecánicos son sencillos, fáciles de maquinar y construidos con materiales que se consiguen fácilmente en nuestro medio. Con base en lo anterior se puede anticipar que el precio estimado del sistema debe ser significativamente menor al de otros sistemas utilizados en nuestro medio.

El montaje del fijador híbrido aún está en proceso de una completa evaluación con pruebas mecánicas para determinar su rigidez y estabilidad. Sin embargo, los estudios pilotos realizados a algunos componentes del sistema han sido satisfactorios.

Referencias

- 1 Duda G, Kirchner H, Wilke H, Claes L. A method to determine the 3-D stiffness of fracture fixation devices and its application to predict inter-fragmentary movement, *Journal of Biomechanics* 1997 Dic 19; 31 (3): 247-252.
- 2 Marmolejo J. Evaluación biomecánica de fijador externo para hueso largo, *Tesis de Grado de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle*, 1992.
- 3 Ortiz DF, Molina MJ, Matta JE, Gamarra RF. Fijación interna de la articulación sacroiliaca inestable. *Revista Colombiana de Ortopedia y Traumatología* 2000 Dic; 14 (3):193-217.
- 4 Paley D, Chaudray M, Pirone AM, Lentz P, and Kautz D. Treatment of malunions and malnon-unions of the femur and tibia by detailed preoperative planning and the Ilizarov technique. *Orthop. Clin. North Am.* 1990; 21 (4):667-691.
- 5 Chao EYS, Neluheni EVD, Hsu RWW, Paley D. Biomechanics of malalignment. *Orthopaedic Clinic of North America* 1994; 25 (3): 379-386
- 6 Yoon HK, Nozomu I, Edmund YS. Kinematic simulation of fracture reduction and bone deformity correction under unilateral external fixation. *Journal of Biomechanics* 2002 Abr 16; 35:1047-1058.
- 7 Moorcroft CI, Thomas PBM, Ogrodnik PJ, Verborg SA. A device for improved reduction of tibial fractures treated with external fixation. *Proc Instn Mech Engrs* 2000; 214 (H): 449-457.
- 8 Gardner, TN, Simpson H, Kenwright J. Rapid Application fracture fixation - an evaluation of mechanical performance. *Clinical Biomechanics* 2001 Feb; 16 (2):151-159.
- 9 Krischak GD, Janousek A, Wolf S, Angat P, Kinsi L, Claes L. Effects of one-plane and two-plane external fixation on sheep osteotomy healing and complications, *Clinical Biomechanics* 2002 Jul 14; 17 (6): 470 – 476.
- 10 Gardner TN, Weemaes M. A mathematical stiffness matrix for characterising mechanical performance of the Orthofix DAF. *Medical Engineering & Physics* 1999 Abr 12; 21:65-71.
- 11 Galvis E, Lasso P, Machado A, García JJ. Computational determination of the 3-D stiffness matrix of an Ilizarov fixator. *Advances in Bioengineering ASME* 2001; BED – 51.
- 12 Lasso PA. Diseño, Construcción y evaluación de un fijador externo Ilizarov para tratamiento de trauma de tibia. *Tesis de Grado de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle*, 1991.
- 13 Leyton A, García JJ, Machado A, Echeverry AA. Caracterización Mecánica del Fijador Externo “Atlas” para Fracturas de Huesos. *Ingeniería y Competitividad* 2003 Oct 17; 5 (1):7-15.
- 14 Yang L., Nagayam S., Saleh M., Stiffness characteristics and interfragmentary displacements with different hybrid external fixators. *Clinical Biomechanics* 2003 Ene 20; 18 (2):166-172.