

Tacón de torque. Análisis tensional y deformacional utilizando el Método de Elementos Finitos.

R. A. González Carbonell*, E. Álvarez García**, Y. Campos Pérez**

*Universidad “Ignacio Agramonte” de Camagüey.
Carretera Circunvalación Norte km 5.5. Cp: 74650. Camagüey, Cuba.
Teléfono: 261456, Fax: 261126
E-mail: raide.gonzalez@reduc.edu.cu

**Universidad Central “Martha Abreu” de Las Villas.
Carretera a Camajuaní, km 5.5, Santa Clara, Villa Clara, Cuba
E-mail: ealvarez@fim.uclv.edu.cu, yamillc@fim.uclv.edu.cu

(Recibido el 12 de enero de 2007; aceptado el 25 de abril de 2007)

Resumen

En este trabajo se aborda la problemática del tratamiento en menores que presentan torsión tibial y la necesidad de un dispositivo ortopédico para su corrección. En particular, se presentan los elementos necesarios para el diseño de un tacón de torque. Se estudiaron los fenómenos no lineales presentes en el diseño mecánico de piezas que no cumplen con la ley de Hooke, específicamente para materiales hiperelásticos. El modelo de las cargas que actúan sobre el tacón de torque fue definido teniendo en cuenta la acción dinámica de las cargas producto de la marcha. Para realizar los cálculos de tensiones y visualizar las deformaciones durante su funcionamiento se utilizó el Método de los Elementos Finitos. Finalmente con los resultados obtenidos fue propuesto un diseño del tacón de torque.

Palabras claves: Torsión tibial, dispositivo ortopédico, elastómeros, elementos finitos, tensión, diseño mecánico, análisis no lineal.

1. Introducción.

Durante el embarazo, la cabeza, los brazos y piernas del bebé se mantienen completamente flexionados y esta posición intrauterina puede ocasionar deformaciones de los miembros inferiores en los recién nacidos. Caminar con los pies hacia adentro constituye el problema ortopédico más común de la infancia, afectando al 13% de los niños [1] y [2]; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

El tratamiento varía desde la implementación de ejercicios de manipulación y estiramiento, los cuales se deben realizar en sesiones de 20 a 30 cada vez que se cambia el pañal del niño, hasta el uso de aparatos correctores tipo férula de *Denis Browne*, *Wheaton Brace*, bandas elásticas y calzado ortopédico con aditamentos especiales en el tacón (tacón ortopédico o *Thomas heel* y tacón de torque o circular torque *heel*). Si después de los 9 años persiste la torsión tibial interna anormal y existe incapacidad funcional, estará indicada la corrección quirúrgica [3], [4] y [5]. Este procedimiento implica anestesia general, uso de material de osteosíntesis y hospitalización de uno a tres días en

situaciones normales. El postoperatorio se controla por consulta en forma clínica y con radiografías, en ocasiones puede estar indicada la fisioterapia [6] y [7].

De los dispositivos mencionados en el párrafo anterior, resulta ser uno de los más prácticos el tacón de torque, que es un nuevo aditamento que se coloca en el tacón del zapato, que por su forma geométrica provoca el giro del zapato en la dirección deseada. Debe usarse en pares, y la orientación de los tacones dependerá de la orientación del pie. Este dispositivo tiene como principal ventaja que no afecta el desenvolvimiento del niño y le permite realizar sus actividades normalmente, con la ventaja adicional que mientras más camine el niño se acelerará la corrección de la deformación, pues aumenta la frecuencia de ciclos [8] y [9].

El tacón de torque se fabrica de goma y el tratamiento en el diseño del caucho es muy complejo, debido al comportamiento no lineal ante la solitud de cargas. Los artículos de goma pueden deformarse varias veces su forma original y al finalizar la acción de las cargas recuperar su forma inicial [10], [12] y [13].

Esto ha llevado a que durante muchos años el caucho se ha utilizado mediante el ciclo de prueba y error, es

decir se realizaba la fabricación de una pieza y se probaba para ver si cumplía los requisitos exigidos. Este ciclo de prueba y error, aunque práctico no es económico y se pretende eliminar utilizando técnicas de cálculo por elementos finitos.

Ante la necesidad de un diseño apropiado para fabricar el tacón de torque, bajo las condiciones de las industrias nacionales y utilizando el material elastomérico obtenido en investigaciones anteriores, se decidió utilizar el Método de los Elementos Finitos para predecir el comportamiento del tacón de torque durante la acción de las cargas.

2. Desarrollo.

Para la fabricación el tacón de torque fue necesario realizar transformaciones a la forma geométrica del tacón, debido a las limitaciones tecnológicas en la fábrica encargada de la producción. En su forma original, los tacos inclinados del tacón de torque tienen forma cuadrada en sus extremos y se cambió a redondeada. Por otra parte los tacos (que sirven de apoyo cuando el tacón inclinado se encuentra completamente flexionados), originalmente tienen 2 mm de ancho y esta cavidad era imposible obtenerse en los talleres previstos, por lo que fue necesario aumentarla.

El nuevo diseño se modeló utilizando el Método de los Elementos Finitos, que permite obtener resultados sobre el funcionamiento de la pieza en cuestión.

El diseño de un nuevo componente exige que su obtención sea de forma rápida y válida. A diferencia de lo que ocurre en los metales, que requieren relativamente pocas propiedades para caracterizar su comportamiento, el tratamiento del caucho es complejo y requiere que sean enfrentados problemas con no linealidad de geometría y de material.

En el análisis de una pieza es necesario conocer el modelo mecánico de la misma, el cual se compone por las características del material, el modelo de cargas y el modelo geométrico [11]. Mientras más se aproximen a la realidad estos modelos, se obtendrán resultados más confiables.

Para caracterizar el comportamiento mecánico de los materiales elastoméricos se han desarrollado múltiples modelos teóricos (Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh, etc.), los cuales se basan en el estudio de geometrías y solicitaciones sencillas (compresión uniaxial, tracción uniaxial, cortante, etc.). Algunos de estos modelos han sido implementados en programas de cálculo por elementos finitos que permiten poder realizar el estudio y la optimización de una pieza para obtener la curva de fuerza-desplazamiento deseada, sin necesidad de llegar a fabricar un prototipo real [10]. En el caso objeto de estudio, fue seleccionado el modelo Mooney-Rivlin por demandar menos recursos computacionales y menor tiempo de cálculo según se refiere en la literatura

especializada [17], [18], [19] y [20]. Este modelo requiere de la introducción de propiedades mecánicas adicionales, como son las constantes Mooney-Rivlin, las cuales se obtienen partiendo las curvas de ensayos a tracción uniaxial, cortante puro y extensión biaxial [14], [15] y [20].

De las distintas fases del ciclo de marcha, el apoyo con extensión completa de rodilla es donde se encuentran los mayores valores de fuerza sobre la pierna con un valor de 3 a 4 veces el peso corporal, comparadas con 0.5 veces el peso, cuando la persona está parada estáticamente sobre sus dos piernas [21].

Este incremento es producido en parte por la acción de las fuerzas de inercia y el pequeño impacto del talón con el suelo cuando se apoya. Resulta de gran interés tomar en consideración este incremento de las fuerzas para obtener modelos que pretenden simular el comportamiento del tacón de torque.

En el modelo descrito en el presente trabajo se evaluarán las condiciones extremas de cargas.

El peso de los niños se obtiene a partir de valores establecidos y normalizados internacionalmente [9].

Para seleccionar los pesos máximos es necesario acceder a la franja de "sobrepeso", en el rango de edades entre 2 y 9 años que es cuando es aplicable el dispositivo en estudio. Como se puede apreciar el peso varía para este caso entre 14 y 40 Kg. aproximadamente. Se seleccionará el valor de peso máximo 40 Kg. \cong 400 N.

Las fuerzas a analizar actúan como una presión o fuerza distribuida sobre los tacos inclinados que sobresalen, por lo que será dividido por la cantidad de tacos. En la bibliografía consultada existen dos variantes de tacos de torque, una con 5 y otra con 6 tacos inclinados [8].

Respecto a las condiciones de contorno, se definieron tomando en cuenta que los tacos inclinados no se deslizan sobre la superficie, solo se deslizan en la horizontal, y en la superficie de unión con el tacón del zapato se le permite rotar, pues es aquí donde hace el efecto corrector de la enfermedad, rotando el pie en la dirección deseada.

Para los cálculos se utilizará el software COSMOS DesignStar, por la interacción que posee con sistemas CAD, además de poseer el módulo de cálculo no lineal.

El programa posibilita definir las curvas de tiempo, donde se afectará el valor de la fuerza por la acción dinámica del movimiento.

Una vez realizada la ejecución del análisis para el prototipo de 6 tacos inclinados, se obtuvo como resultado que cuando los mismos se encuentran completamente flexionados, se incrustan con los tacos que sirven de apoyo, este fenómeno no debe ocurrir porque limitaría el funcionamiento del tacón del torque. (Fig. 1)

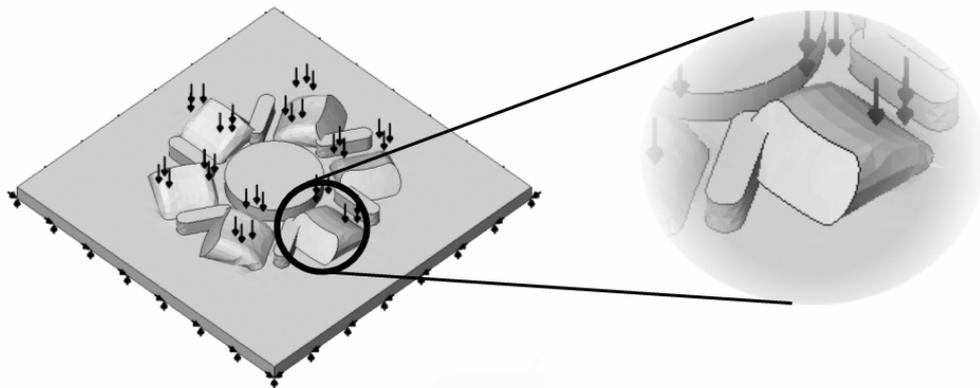


Figura 1 - Resultados del análisis del tacón de torque con 6 tacos.

El siguiente paso fue comprobar el prototipo de tacón de 5 tacos inclinados. En este caso se obtuvo que las tensiones máximas se localizaron en la base de los tacos inclinados (Fig. 4). Los resultados evidenciaron las mayores tensiones en el tacón de torque de 5 tacos (1.838 MPa), siendo ligeramente mayores que las localizadas en el tacón de torque de 6 tacos (1.531 MPa). Finalmente, pudo ser corroborado que ambas son menores que la tensión máxima que puede soportar el material (3.700 MPa), por lo que el modelo resiste para estas condiciones y trabaja con un coeficiente de seguridad de 2, valor aceptable en el rango entre 1.8 y 3 declarado por los especialistas [22] y [23].

Los desplazamientos máximos se observan en el extremo libre del tacón inclinado, sin que ocurra la flexión axial (pandeo), esto posibilita que cumpla el principio de funcionamiento del tacón de torque, pues con la flexión transversal de los tacos inclinados, provoca la rotación de la base cuadrada, esta última va acoplada al tacón del zapato del paciente. Las máximas deformaciones ocurren en la base, siguiendo cierta proporcionalidad con el comportamiento de las tensiones.

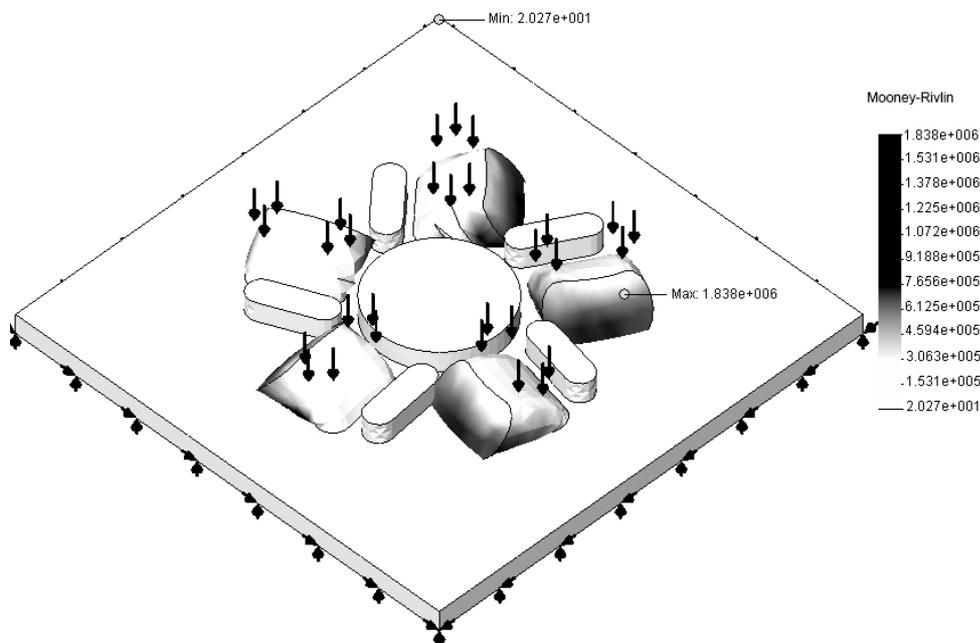


Figura 2 - Resultados del análisis del tacón de torque con 5 tacos

3. Conclusiones.

- El tacón de torque con 6 tacos transformado no debe ser utilizado por no cumplir con su principio de funcionamiento.
- El tacón de torque con 5 tacos esta sometido a mayores tensiones que el de 6 tacos, pero no rebasa el limite de rotura, por lo que resulta y puede ser utilizado.
- El tacón de torque con 5 tacos funciona acorde al principio de funcionamiento, por lo que es el diseño propuesto para usar.
- El material elastomérico modelado resiste las condiciones de carga a la que trabajará.

4. Referencias.

1. Díaz. Problemas ortopédicos [en línea] <http://www.tupediatra.com/temas/tema73.htm>, En: *Tu pediatra.com* [s.l, s.n, s.a], [Consulta: enero/2003]
2. Desviaciones axiales y rotacionales de miembros inferiores en niños. [en línea] <http://www.geocities.com/HotSprings/Spa/9784/ortoped.htm>, En: *Geocities.com* [s.l, s.n, s.a], [Consulta: enero/2003]
3. V. Calzadilla, I. Castillo, J. Estrada. Desviaciones torsionales de los miembros inferiores en niños y adolescentes. *Revista Cubana de Medicina General Integral* 10(5), 2002.
4. Fernández. Anomalías rotacionales de los miembros inferiores. [en línea] <http://www.traumazamora.org/ortoinfantil.htm> En: *Cirugía Ortopédica Zamora* [s.l, s.n], 1998. [Consulta: enero/2003]
5. Orthopaedic Topics: Internal Tibial Torsión. [en línea] <http://www.orthoseek.com/articles/inttibtor.html>, En: *Orthoseek.* [s.l, s.n, s.a], [Consulta: enero del 2003]
6. D. Díaz. Torsión tibial. [en línea] www.tupediatra.com/temas/tema118.htm En: *Tu pediatra.com* [s.l, s.n, s.a], [Consulta: enero/2003]
7. Guías Protocolos de manejo miembros inferiores. [en línea] <http://www.institutoroosevelt.org.co/DirMed-Ortoped-Inferior.htm>. Instituto Roosevelt, [s.n, s.a], [Consulta: enero/2003]
8. Footwear & Podiatry [en línea] <http://www.ketteringsurgical.com/foot/insoles/cth.htm> *Kettering Surgical Appliances* [s.l, s.n, s.a], [Consulta: febrero del 2004]
9. R. González., E. García, O. Gamboa. Problema del tratamiento del Síndrome torsional de miembros inferiores en Cuba. [en línea] <http://www.monografias.com/trabajos15/sindrome-torsional/sindrome-torsional.shtml> En: *Monografias.com* [s.l, s.n], 2004, [Consulta: febrero del 2005]
10. Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers. [en línea] http://www.axelproducts.com/downloads/MARC_FEA_ELA *STOMERS_2000.pdf* En: MSC. Software Corporation, [s.n]: Axel Product, Inc, 2000, [Consulta: abril 2006]
11. F. Beltrán. Teoría general del Método de los Elementos Finitos. [en línea] <http://www.idom.es/ada/Download/TeoriaMEF.pdf>. Collado-Villalba, 1999, [Consulta: enero, 2004]
12. Diseño de componentes elastoméricos por método de los elementos finitos. [en línea] <http://revista.robotiker.com/articulos/articulo12/> *Revista Robotiker, 2003*, [Consulta: diciembre, 2003]
13. Fundamentos teóricos del comportamiento mecánico del caucho. [en línea] <http://revista.robotiker.com/articulos/articulo12/pagina2.jsp> *Revista Robotiker, 2003*, [Consulta: Enero, 2004]
14. COSMOS DesignStar Nonlinear User's Guide. Version 3.0. SRAC, USA, 2003.
15. COSMOS/M 2.85 Advanced Modules (NSTAR) Nonlinear User's Guide. SRAC, USA, 2003.
16. DUNCAN, BRUCE. Characterisation of Flexible Adhesives for Design [en línea] http://www.npl.co.uk/adhesives/documents/gpg_45.pdf. Crown Copyright: NPL Materials Centre of Teddington, 2001, [Consulta: abril 2006]
17. DUNCAN, BRUCE. Test methods for determining hyperelastic properties of flexible adhesives. [en línea] http://www.npl.co.uk/adhesives/documents/cmmt_mn_54.pdf Crown Copyright: NPL Materials Centre of Teddington, 1999, [Consulta: abril 2006]
18. CROCKER, L.E. The application of rubber material models to analyse flexible adhesive joints [en línea] www.npl.co.uk/adhesives/documents/Add99_ruber_paper.pdf. Crown Copyright: NPL Materials Centre of Teddington, 1999, [Consulta: abril 2006]
19. CROCKER, L E. Hyperelastic Modelling of Flexible Adhesives [en línea] http://www.npl.co.uk/adhesives/documents/cmmt_a_183.pdf. Crown Copyright: NPL Materials Centre of Teddington, 1999, [Consulta: abril 2006]
20. J. Uthuppan. Hyper Elastic Material Testing. COSMOS DesignStar User Group Meeting, September 30, 2003.
21. Análisis y simulación de las condiciones de carga a las que esta sometida la rodilla durante la marcha normal / Rodríguez. R... [et al]. *Biomecánica V CIDIM, IV CONIM 75-82*.
22. J. E. Shigley. *El proyecto de Ingeniería Mecánica*. McGraw Hill Book Company, Inc. Nueva York, 1976
23. G. S. Pisarenko, A. P. Yákovlev y V. V. Matvéev. *Manual de Resistencia de Materiales*. Editorial Mir, Moscú, 1985.

Torque heel: Tensional and deformational analysis using the Finite Elements Method.

Abstract:

In this work a problem of treatment of the internal tibial torsion and the necessity of an orthopedic device were studied. The needed knowledge for design the torque heel was mentioned. The study of non lineal phenomena in mechanical design of elastomers was carried out. The load model of the torque heels was defined taken into account the action of dynamic loads. The Stress and Strain of the torque heel were obtained using the Finite Elements Method. Finally, the results were analyzed and the definitive design of the torque heel was obtained.

Key words: Tibial torsion, orthopedic device, elastomers, finite elements, stress, mechanic design, non linear analysis.

INGENIERÍA MECÁNICA

ISSN 1029-516X.

Revista Ingeniería Mecánica (On Line):

<http://www.cujae.edu.cu/ediciones/Mecanica.asp>

La Revista Ingeniería Mecánica se encuentra referenciada en las bases de datos:

1. Periódica
(<http://dgb.unam.mx/periodica.html>)
2. Latindex
3. Cambridge Scientific Abstracts
(<http://www.csa.com/>)
4. Directory of Open Access Journals
(<http://www.doaj.org>)
5. Ulrich's Periodical Directory
(<http://www.ulrichsweb.com>)
6. Registro Cubano de Publicaciones Seriadadas
(<http://www.cubaliteraria.com/publicacion/ficha.php?id=55>)

La publicación ha sido aceptada con los requerimientos exigidos por el Tribunal Nacional Permanente para Grados Científicos en Ingeniería Mecánica como publicación de referencia.

Las contribuciones con artículos a publicar en Ingeniería Mecánica pueden remitirse al Consejo de Redacción, para iniciar proceso con revisores, a las direcciones:

Email: jwellesley@mecanica.cujae.edu.cu

Email: cidim@mecanica.cujae.edu.cu

