

# Análisis FEA de Prótesis de Rodilla Policéntrica

Sara Correal Franco, Lía Judith Palacio Delgado y  
Isabel Cristina Salazar Gómez

UNIVERSIDAD EAFIT. Departamento de Ingeniería de Diseño de Producto, Medellín  
{scorreal1 ; lpalaci2 ; isalazar5}@eafit.edu.co

Recibido para revisión May-2006, aceptado Jun-2006, versión final recibida Jun-2006

**Resumen:** En el presente artículo se describe el proceso de análisis estructural de diferentes propuestas de modelos de rodillas policéntricas utilizando el método de Elementos Finitos (FEA por sus siglas en inglés) por medio de Ansys® Workbench 10.0. El objetivo del análisis es seleccionar dentro de los diferentes diseños propuestos la rodilla que cumple con los requerimientos mecánicos a un menor costo de producción.

**Palabras Clave:** Rodilla policéntrica, biomecánica, fatiga, límite elástico de compresión, esfuerzo Von Misses, Elementos Finitos, Análisis Mecánico.

## 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente en Colombia se han incrementado notablemente las amputaciones de miembro inferior por dos causas fundamentales: las minas antipersona [Vicepresidencia-República (2006)] y las complicaciones en úlceras de miembro inferior en personas diabéticas [American-Diabetes-Association (2006)]. En el medio, por sus facilidades de fabricación y sus bajos costos comparativos, se ha difundido el uso de prótesis con rodillas uniaxiales ó monocéntricas. Sin embargo, a nivel funcional este tipo de rodillas presentan limitaciones significativas en la reproducción de los movimientos de una rodilla humana, mientras que las rodillas policéntricas [Smith (2004)] presentan versatilidad a nivel biomecánico reduciendo el gasto energético y mejorando la estabilidad por parte del paciente con amputación por encima de rodilla.

El objetivo fundamental de este artículo es diseñar una prótesis de rodilla policéntrica versátil en cuanto a funcionamiento, peso y costo, la cual pueda ser analizada y corregida computacionalmente antes de fabricar el modelo final.

## 2 DESCRIPCIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL MODELO

El Análisis de Elementos Finitos (FEA por sus siglas en inglés) es un método numérico que permite analizar ciertos prototipos de productos en los cuales se conocen las condiciones de contorno, las propiedades de los materiales y las cargas impuestas, de tal forma que se puede determinar su respuesta a dichas condiciones. El método de los elementos finitos se basa en la división de un

medio continuo en unidades particulares llamadas "elementos", en las cuales es predecible el comportamiento de las variables de estado de acuerdo con las ecuaciones diferenciales que rigen el problema. El ensamblaje de dichos elementos, cumpliendo con ciertas condiciones de continuidad y de contorno que restrinjan el problema, permite analizar el medio completo, haciendo la solución única. El método ha sido ampliamente probado en la solución de diversos problemas de ingeniería. Además, FEA es importante porque reduce el número de pruebas en prototipos y simula condiciones que no son fácilmente reproducibles por medio de ensayos. Los tipos de análisis que se pueden llevar a cabo mediante el método de los elementos finitos son, entre otros: estructural, térmico, de fluidos y electromagnético. En el caso de la rodilla policéntrica se realizó un análisis estructural debido a que era necesario conocer la resistencia que tiene la rodilla con respecto a la carga a la que estará sometida.

Para analizar el prototipo en elementos finitos se realizaron dos pasos: El primero, fue la simulación geométrica en ProEngineer®, software permite modelar tridimensionalmente el producto con precisión; el segundo paso, fue exportar el archivo a ANSYS 10.0 Workbench, el cual es un programa especializado en elementos finitos. Los modelos de rodilla que se muestran en la Figura 1 son el resultado del rediseño de modelos policéntricos existentes. Lo que se hizo fue tomar modelos y adaptarlos según las necesidades y requerimientos del medio.

### 2.1 Tipo de elemento

Para efectuar el análisis de FEA se utilizó un elemento tetraedro sólido de 10 nodos con tres grados de lib-

ertad en desplazamientos. Para simular el mecanismo, se utilizaron elementos de contacto tridimensionales [Zienkiewicz y Taylor (2000)]. Ambos elementos se encuentran disponibles en la librería del programa.

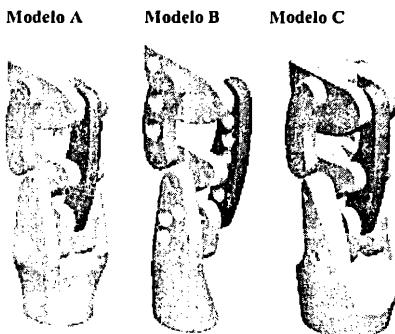


Figura 1: Modelos analizados en ANSYS

## 2.2 Mallado

La malla de elementos finitos se muestra en la Figura 2. El programa realiza por defecto un refinamiento de malla en las zonas próximas a las discontinuidades, permitiendo una aproximación confiable a los valores reales de esfuerzo.

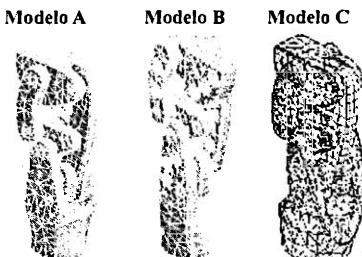


Figura 2: Modelos analizados en ANSYS

## 2.3 Procedimiento

Para realizar el análisis en ANSYS se importaron los tres modelos de Pro-E en formato IGES sólido para que ANSYS hiciera una lectura tridimensional de los modelos.

Luego de la importación, se aplicaron las cargas y las condiciones de contorno y se llevó a cabo el análisis estructural.

## 3 DESCRIPCIÓN DE LA PRUEBA

### 3.1 Material

Los materiales utilizados para el análisis fueron Aluminio, para las barras (piezas grises); y Acero estructural para los ejes (piezas amarillas). Las Tablas 1 y 2 muestran las propiedades de ambos materiales.

Tabla 1: Propiedades del Aluminio

Propiedades del Aluminio	
Nombre	Valor
Módulo de elasticidad	70,000.0 MPa
Módulo de Poisson	0.28
Densidad de masa	2.77x10 <sup>3</sup> kg/mm <sup>3</sup>
Coef. de expansión térmica	2.3x10 <sup>-5</sup> 1/°C
Conductividad térmica	0.11 W/mm°C
Calor específico	875 J/kg °C
Límites de esfuerzo	
Nombre	Valor
Límite elástico a la tensión	280 MPa
Resistencia última a la tensión	310 MPa
Límite elástico a la compresión	280 MPa
Resistencia última a la compresión	0 MPa

Tabla 2: Propiedades del Acero Estructural

Propiedades del Acero estructural	
Nombre	Valor
Módulo de elasticidad	200,000.0 MPa
Módulo de Poisson	0.3
Densidad de masa	7.85x10 <sup>3</sup> kg/mm <sup>3</sup>
Coef. de expansión térmica	1.2x10 <sup>-5</sup> 1/°C
Conductividad térmica	0.06 W/mm°C
Calor específico	434 J/kg °C
Límites de esfuerzo	
Nombre	Valor
Límite elástico a la tensión	250 MPa
Resistencia última a la tensión	460 MPa
Límite elástico a la compresión	250 MPa
Resistencia última a la compresión	0 MPa

### 3.2 Cargas

La carga es aplicada en la parte superior de los modelos, que es en donde el usuario se apoya, y por ende, en donde se descarga el peso.

A los modelos A y B se les aplicó una carga vectorial de 980 N, equivalente al peso máximo del usuario planteado. Al modelo C, se le aplicó una carga vectorial con una magnitud de 2,058 N, que es equivalente al esfuerzo máximo que soportaría la rodilla durante su uso, y es mayor que en los análisis anteriores porque durante ensayos ulteriores se evidenció la importancia de considerar la fuerza máxima producida en la marcha normal.

La zona de aplicación y la dirección de las cargas para los diferentes modelos se presentan en la Figura 3.

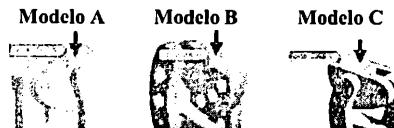


Figura 3: Aplicación de la carga

### 3.3 Restricciones

Las restricciones de movimiento se ubicaron en la parte inferior de los modelos asignando cero grados de libertad a la base con el fin de evitar rotaciones y desplazamientos indeseados al aplicar las cargas. Vease Figura 4.

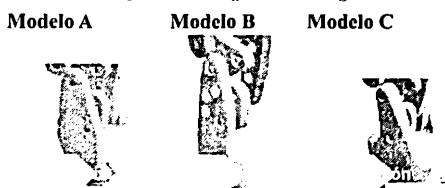


Figura 4: Restricción de movimiento

## 4 RESULTADOS

En los tres modelos se analiza el esfuerzo Von Misses como criterio de falla del material, o sea, el esfuerzo máximo admisible de compresión. Este valor se evalúa sobre 280 MPa, el cual es el límite elástico de compresión del aluminio.

En la Tabla 3 se presentan los valores arrojados por el análisis y la diferencia con el límite elástico de compresión del aluminio, es decir, la fuerza en MPa que aún puede ser aplicada al modelo sin afectar su estructura.

Del mismo modo, se estimó el factor de seguridad ( $FS$ ), el cual se pondera sobre 2, como:

$$FS = \sigma_y / \sigma_{vm}$$

donde  $\sigma_y$  es el límite elástico de compresión del material y  $\sigma_{vm}$  es el esfuerzo Von Misses calculado. Ver tabla 4.

Tabla 3: Resultados de análisis de esfuerzo máximo

Criterio Modelo	Esfuerzo máximo Von Misses (MPa)	Diferencia (MPa)
Modelo A	25.54	254.46
Modelo B	93.90	186.10
Modelo C	137.38	142.62

Tabla 4: Factor de seguridad de los modelos

Criterio Modelo	Factor de seguridad (?) 2
Modelo A	10.96
Modelo B	2.98
Modelo C	2.03

ANSYS 10.0 en su análisis gráfico, dispone de una escala de colores, la cual va desde el azul indicando que el material está intacto, hasta el rojo indicando mayor concentración de esfuerzos y posible cedencia del material.

Después de realizar el análisis gráfico, se observa que ninguno de los modelos tuvo un cambio de color significativo, lo cual apoya los resultados numéricos. Ver Figura 5.

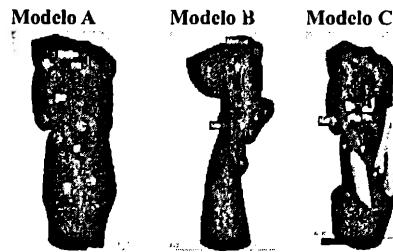


Figura 5: Modelos analizados gráficamente

El esfuerzo máximo Von Misses fue evaluado respecto al límite elástico de compresión del material (280 MPa), y los tres modelos obtuvieron resultados inferiores a este valor. Esto indica que los modelos soportarán las cargas a las que estarán sometidos. También significa que en condiciones normales de uso, cualquiera de los modelos estará lejos de presentar deformación o fractura del material.

En cuanto al modelo A se observa que presentó un esfuerzo máximo muy bajo (25.54 MPa) y un factor de seguridad muy alto (10.96). Sin embargo esto denota

que el modelo puede estar sobredimensionado y deberfa ser mejorado.

Por su parte el modelo B tuvo la calificación esperada, pero no es adecuado para ser utilizado como prótesis funcional por un paciente real, debido a que los diseños de prótesis de rodilla externas deben ser simétricos bilateralmente para evitar problemas de estabilidad. Ver Figura 1, Modelo B.

El modelo C es una evolución del modelo A, que se logró con la reducción del tamaño y peso por tanteo. Con este se obtuvieron a unas condiciones de esfuerzo y factor de seguridad ideales para una prótesis de rodilla.

## 5 CONCLUSIONES

Según los resultados del análisis FEA, los tres modelos se pueden considerar aprobados; sin embargo, para poder hacer una selección definitiva del diseño, será necesario tener en cuenta factores adicionales, diferentes a la resistencia mecánica a la compresión.

No obstante, el modelo B será descartado por ser un diseño potencialmente inestable, y debido a que el modelo A evolucionó directamente en el C, será el modelo C el punto de partida para el desarrollo de mejoras y modelos futuros.

## 6 TRABAJO FUTURO

Conjunto a los avances en el diseño desde el punto de vista estructural, se espera realizar un análisis dinámico, donde se consideren las fuerzas de acción y reacción durante la marcha normal del usuario, ya que el análisis anteriormente presentado fue únicamente estático.

Además, debe realizarse un análisis por pandeo no lineal para descartar este modo de falla en los miembros sometidos a compresión.

Con todo esto se espera encontrar un punto óptimo en las condiciones del modelo, las cuales permitan desarrollar una rodilla policéntrica baja en peso, funcional y económica.

## AGRADECIMIENTOS ESPECIALES

Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA  
Colciencias

Alcaldía de Medellín

Semillero HECAS-ID, Herramientas de Cálculo y Simulación en Ingeniería de Diseño de producto, Universidad EAFIT.

Andrés Torres, Facultad de Ingeniería Biomédica, Escuela de Ingeniería de Antioquia.

## REFERENCIAS

American-Diabetes-Association (2006), 'Diabetes statistics'.

\*En Línea: <<http://www.diabetes.org/diabetes-statistics.jsp>> C05/06

Smith, D. (2004), 'Inmotion 1', *Amputee Coalition of America / Above knee amputation* 14(2).

Vicepresidencia-República, . (2006), 'Observatorio de minas antipersona de la vicepresidencia de la república'.

\*En Línea: <<http://www.derechoshumanos.gov.co/.../index.php?newsecc=minas>> C05/06

Zienkiewicz, O. y Taylor, R. (2000), *The Finite Element Method Volume 1: The Basis*, Butterworth-Heinemann, Oxford.