

RELACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE ELEMENTOS MECÁNICOS CON EL CAMBIO DE FORMAS EN LA NATURALEZA COMO CRITERIOS DE DISEÑO

F. Eugenio López Guerrero, Francisco Ramírez Cruz, Carlos I. Romero Martínez, F. Javier de la Garza Salinas, José L. Castillo Ocañas
Cuerpo Académico Sistemas Integrados de Manufactura
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León.
Av. Universidad S/N, Apdo. Postal 9-"F", CP. 66451, San Nicolás de los Garza, N.L., México.
Teléfono: (0052-81) 8329-4020. Fax: (0052-81) 8332-0904
E-mail: elopez@mail.uanl.mx, ramirez@mail.uanl.mx

RESUMEN

La necesidad de mejorar elementos mecánicos así como de acortar sus ciclos de diseño ha llevado a la exploración de alternativas que resuelvan los problemas planteados por las diferentes necesidades. En las últimas décadas, diversos investigadores han observado en la naturaleza la capacidad de las estructuras naturales para resistir las cargas a las que las somete el medio ambiente. En este trabajo se obtiene de la naturaleza un modelo de "optimización geométrica natural" que comprueba su eficacia a través de un caso de estudio, verificando los niveles de esfuerzo antes y después de modificar la geometría. También se valida a los argumentos de C. Mattheck, que establecen que las estructuras biológicas desarrollan geometrías que les permiten tener niveles de esfuerzo uniformes en toda la estructura [MA90].

Palabras clave: Optimización geométrica, formas naturales, diseño geométrico, esfuerzos homogéneos.

ABSTRACT

The need to improve mechanical elements as well as to shorten the cycles of design has led to the exploration of alternatives that solve the problems raised by different needs. In the last decades, diverse researchers have observed in the nature the ability of natural structures to resist the loads to which the environment submits them. In this work it is obtained from nature a model of "geometric natural optimization" which allows us to verify the application efficacy in the design of mechanical elements, verifying the levels of stress before and after modifying their geometry. Also validated are the arguments of C. Mattheck, which establish that the biological structures develop geometries that allow them to have uniform levels of stress in all their structure.

Keywords: Geometric optimization, natural forms, geometric design, homogeneous stress.

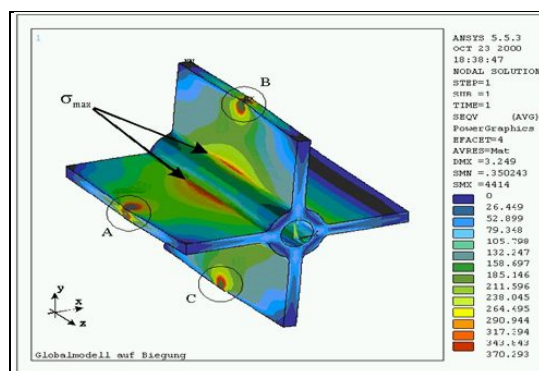


Fig. 1. Componente estructural optimizado usando el modelo presentado en este trabajo.

INTRODUCCIÓN

El mejoramiento de los componentes estructurales se logra bajo criterios funcionales, como lo son los esfuerzos y deformaciones a lo que el componente se ve sometido. Cuando se presentan regiones de intensificaciones de esfuerzos es común modificar la geometría para reforzar la zona y mejorar su desempeño; sin embargo estos cambios geométricos provocan que el máximo del esfuerzo se reubique con una magnitud menor pero aún siendo un intensificador. Estructuras biológicas han demostrado su eficiencia ampliamente dentro de la naturaleza [MA90] en términos de la distribución homogénea de esfuerzos.

En el presente trabajo se simulan los efectos en el cambio de forma al aplicar una carga estática flexionante a geometrías de tallos de árboles durante su crecimiento, así como la redistribución de esfuerzos en los tallos causado por el cambio geométrico con fines de adaptación.

OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo fue encontrar un modelo de crecimiento a partir de reproducir las geometrías del tallo resultantes del crecimiento forzado con carga y libre. Una vez capturada la geometría, es posible validar por medio del método de elementos finitos el estado de esfuerzos a través del tiempo de crecimiento de dichos tallos.

Un caso de estudio se presenta como comprobación. En otros trabajos hemos presentado resultados de análisis más exhaustivos de aplicaciones particulares del método que aquí se presenta.

Los objetivos particulares fueron:

- Replicar geoméricamente la forma del tallo.
- Analizar por medio del método de elementos finitos los tallos obtenidos.
- Determinar el modelo de crecimiento de los tallos.

ANTECEDENTES

Uno de los primeros en investigar los máximos niveles de esfuerzos en las fronteras de los objetos desde un enfoque científico fue R. V. Baud [BA34]. Estableció que el máximo esfuerzo presente en el contorno de los elementos puede ser reducido reformando su geometría de manera que la curva del esfuerzo tangencial a lo largo de su contorno sea constante.

En 1957 H. Neuber describió la ley del decrecimiento [NE57] basándose en los estudios de Baud, que describe el incremento de esfuerzos y cómo éstos afectan las zonas contiguas. Neuber influyó de forma considerable el desarrollo de la descripción matemática de la teoría de la distribución de esfuerzos.

D'Arcy Thompson [TH16] analizó estructuras biológicas y las propiedades mecánicas resultantes de sus formas en 1916. En 1949, Heywood retomó esas consideraciones [HE68], en su libro "Photoelasticity for Designers" analizó mediante métodos fotoelásticos muchos componentes mecánicamente cargados en relación con la influencia de la forma en las regiones de esfuerzo más elevadas.

Recientemente una nueva rama de la ciencia denominada Biónica ha comenzado a investigar el diseño de estructuras biológicas y su posible transferencia al campo de la tecnología. Al respecto, de especial interés son los trabajos de Nachtigall [NA71], cuya variedad de publicaciones puntualizan muchos fenómenos interesantes en la naturaleza (alas de aves, colmillos de tiburones, garras de tigre, etc.). Metzger presentó los resultados de sus análisis del crecimiento de los árboles y lo relacionó con los

esfuerzos a los que se somete su estructura [ME93].

En 1989, Mattheck retomó esos avances, y formuló el axioma de los esfuerzos constantes a partir de sus estudios de la naturaleza. Después de analizar una gran cantidad de estructuras biológicas mediante el método de elementos finitos (especialmente árboles y huesos) encontró que las estructuras biológicas tienen geometrías libres de características que concentren esfuerzos [MT90]. Si este estado de equilibrio es alterado por cargas externas, la estructura trata de regresar al estado de equilibrio mediante un crecimiento cuidadosamente dirigido, sus estudios lo llevaron a la formulación del axioma de los esfuerzos constantes, a partir del cual es posible aseverar que el único buen diseño mecánico es en el que no existen puntos más propensos a fallar o en el que no existen áreas libres de cargas. En consecuencia, esto significa que para un elemento cargado el esfuerzo tiene que ser totalmente constante en cualquier parte del componente a lo largo de toda su estructura [MA92].

METODOLOGÍA

Varias teorías han sido propuestas para explicar lo que controla la forma de los tallos de los árboles [LA63]. La teoría más aceptada sugiere que la forma está determinada como el crecimiento en respuesta a esfuerzos flexionantes en el tallo, resultantes de las cargas en su follaje debidas al viento; entre más alto sea un tallo mayor será el esfuerzo al que se somete [JA54, LA65, VA92, OS93]. Lo anterior se relaciona directamente con la teoría de que están formados de manera que los niveles de esfuerzo son constantes a lo largo de la longitud completa del tallo [MA90].

En el presente trabajo, se retoman los datos de la investigación de los efectos de los esfuerzos a flexión en el crecimiento de árboles realizada por G.H.R. Osler, P.W. West y G.M. Downes, que estudiaron tanto el engrosamiento radial del tallo como el crecimiento en altura, publicados en el artículo "Effects of bending stress on taper and growth of stems of young Eucalyptus regnans trees" [OS93]. Osler, West y Downes diseñaron su experimentación de manera que en uno de sus arreglos un grupo de árboles fue sometido a una carga estática a flexión durante 8 semanas para analizar el crecimiento radial de los troncos durante el tiempo en el que permaneció la flexión y en las subsecuentes 12 semanas.

Otro arreglo experimental consistió en hacer permanecer verticales a los árboles mediante la utilización de una vara de soporte, mientras que un tercer arreglo consistió en dejarlos crecer libremente durante toda la experimentación. A este tercer grupo lo denominaron “control”. Durante la experimentación los árboles fueron rotados cada dos días para prevenir la formación de madera de reacción y evitar un crecimiento asimétrico, principalmente en los tallos de los árboles sometidos a flexión.

Los árboles fueron mantenidos en condiciones controladas de humedad y temperatura, y aislados de corrientes de aire que pudieran influir en el crecimiento de los tallos de forma considerable. Con el arreglo experimental detallado y mediante todas las consideraciones de control, cada 2 semanas se realizaron mediciones del radio de los tallos a diferentes alturas sobre el nivel de la tierra. Osler y su equipo [OS96] ilustran el cambio de los perfiles de los tallos a través del tiempo reportando los resultados en forma de gráfica, por lo que fue necesario procesar la imagen mediante software para obtener de manera exacta los valores numéricos correspondientes [RO06].

La figura 2 presenta un diagrama a bloques de la metodología.

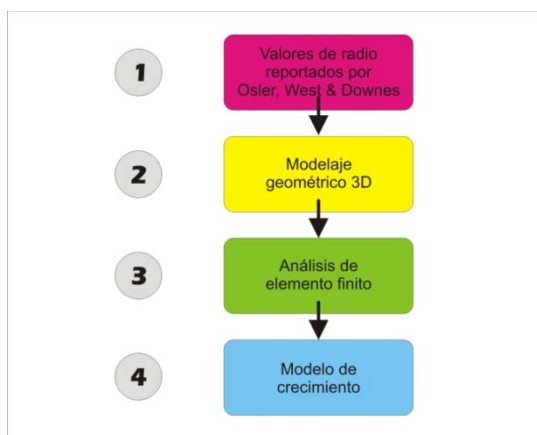


Fig. 2. Esquema de las etapas de la metodología de este trabajo.

A continuación se detallan brevemente cada una de las etapas de la metodología empleada en el presente trabajo. Posteriormente se presenta un caso de aplicación.

1) VALORES DE RADIO DE LOS TALLOS REPORTADOS

Con el promedio de las lecturas de los radios de cada tallo a diferentes alturas se modeló la geometría de los árboles mediante software y por medio del método de elementos finitos se obtuvieron los niveles de esfuerzo a lo largo de la superficie de los tallos en cada semana de crecimiento. La figura 3 muestra los perfiles del tallo obtenidos en lapsos de cada 2 semanas. El perfil extremo izquierdo en cada caso de carga es la medición más temprana.

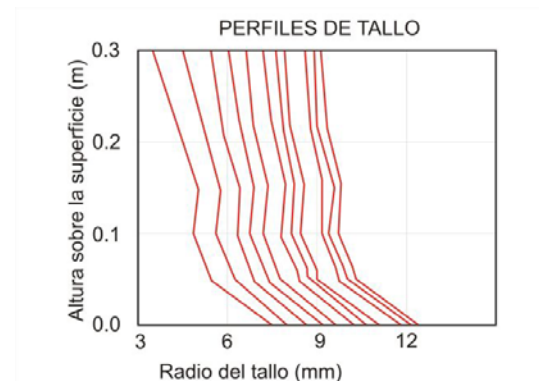


Fig. 3. Perfiles del tallo obtenidos durante el crecimiento y muestreados cada 2 semanas [OS96].

2) RECONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA DE LOS TALLOS

En la reconstrucción de las geometrías se utilizaron los programas de CAD Solidworks y Rhinoceros. Con las lecturas de los radios se construyó un perfil, a partir del cual se generó el tallo del árbol mediante una superficie de revolución (figura 4). Debido a que el interés central del estudio se refirió a la distribución de esfuerzos sobre los tallos de los árboles, el resto de la geometría de los árboles (ramificaciones, forma de la copa, etc.) no se incluyó.

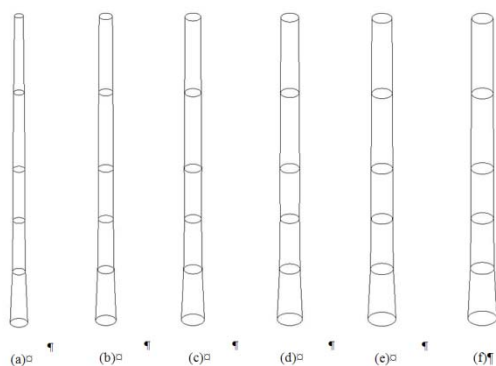


Fig. 4. Modelado geométrico de los tallos que crecieron libremente: (a) semana 0, (b) semana 4, (c) semana 8, (d) semana 12, (e) semana 16 y (f) semana 20.

En las figuras 4 y 5 se muestra la reconstrucción geométrica de los tallos en diferentes semanas de medición, tanto de los que crecieron libremente como de los que fueron flexionados.

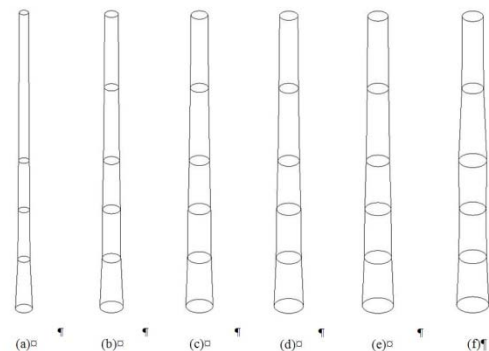


Fig. 5 Modelado geométrico de los troncos que crecieron flexionados: (a) semana 0, (b) semana 4, (c) semana 8, (d) semana 12, (e) semana 16 y (f) semana 20.

3) ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO

El análisis de esfuerzos sobre los tallos se realizó mediante el método de elementos finitos (FEM), para lo cual se utilizó el software Ansys. En la discretización se crearon 61 nodos sobre el perfil de cada tallo espaciados a intervalos de 5mm a lo largo del eje vertical para conocer el nivel de esfuerzos en cada uno de ellos; el tipo de elemento utilizado fue un tetraedro sólido de 10 nodos.

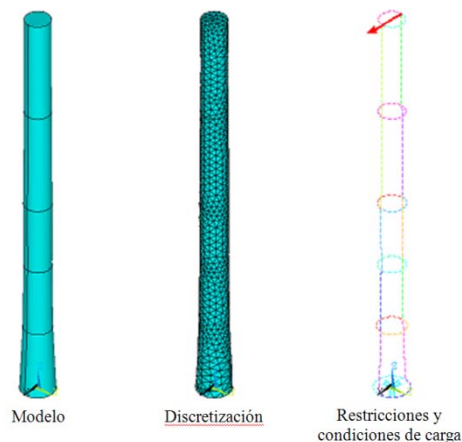


Fig. 6. Condiciones frontera para el FEM.

Se restringió el desplazamiento en cualquier dirección de los nodos pertenecientes a la cara inferior de los modelos y la carga flexionante fue aplicada en uno de los nodos de la parte superior de los tallos; la selección del nodo se realizó considerando el método para aplicar la carga utilizado en [OS96]. En base a la misma investigación, se consideró un material homogéneo de comportamiento lineal y elástico con un módulo de elasticidad de 3×10^9 Pa. En todos los casos la carga aplicada a los troncos fue de 25.0155N.

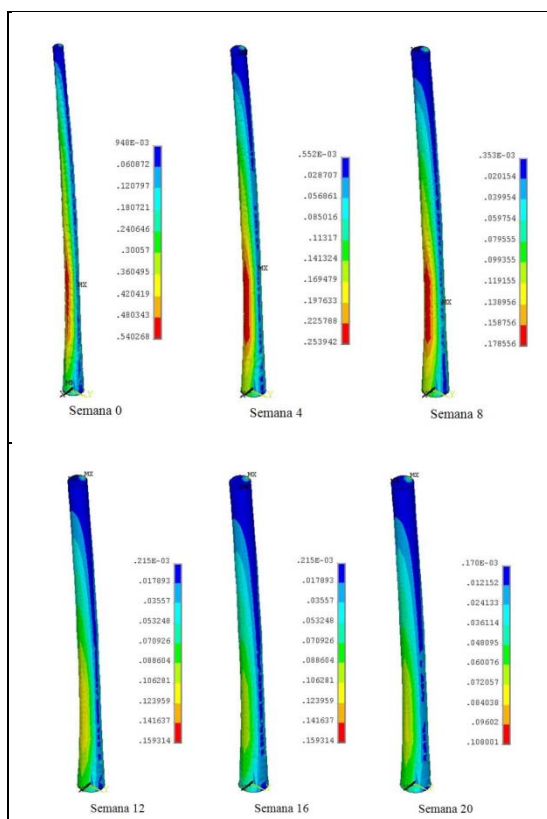


Fig. 7. Nivel de esfuerzos (MPa) en los tallos de crecimiento natural en las diferentes semanas de crecimiento.

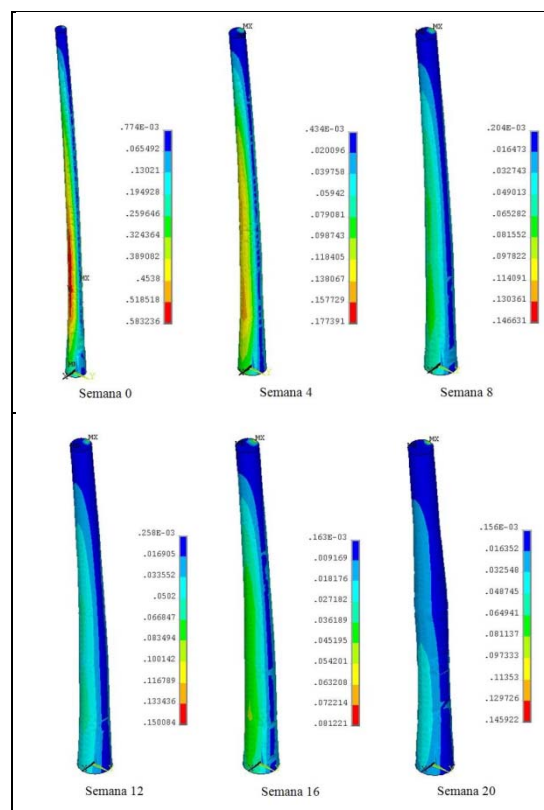


Fig. 8. Nivel de esfuerzos (MPa) en los tallos de crecimiento forzado en las diferentes semanas de crecimiento.

Después de someter los tallos de crecimiento natural y los de crecimiento forzado a las mismas condiciones de carga, se analizó el nivel de esfuerzos a lo largo del contorno de los tallos. En la figuras 7 y 8 se muestran los resultados obtenidos mediante FEM, en ellos se aprecia en escala de colores el cambio en la distribución de esfuerzos ocasionado por el crecimiento adaptativo de los tallos.

En la figura 7 se aprecia el cambio gradual del esfuerzo von Mises a lo largo de las 20 semanas de crecimiento natural obligando a una reducción del estado de esfuerzo como se muestra en los resultados de este trabajo. Un cambio semejante se reconoce en la figura 8 donde se muestran los efectos del crecimiento forzado de los tallos

4) MODELO DE CRECIMIENTO

Al ajustar una curva a las mediciones de cada uno de los dos arreglos experimentales considerados es posible calcular el radio esperado en el tronco de los árboles a diferentes alturas con un alto grado de aproximación para una edad comprendida dentro del período de crecimiento en el que fueron obtenidas las lecturas de los radios. El modelo de las curvas de ajuste presenta la siguiente forma:

$$y = a(1 - e^{-bx}) \quad (1)$$

Donde:

- y Radio del tallo esperado.
- a Constante de saturación, radio al que se detendrá el crecimiento del tallo.
- b Radio del tallo en la semana 1 de crecimiento dividido entre la constante de saturación a .
- x Semana de crecimiento en la que se requiere conocer el radio.

Se utilizará el subíndice n para referirse a mediciones en los árboles que crecieron libremente y f para las realizadas en los forzados. Si se conocen los modelos que describen el crecimiento natural y_n y el forzado y_f , es posible calcular el modelo de optimización geométrica natural (O) desarrollado por los árboles mediante la siguiente ecuación:

$$O = y_f - y_n \quad (2)$$

Puesto que los árboles del crecimiento forzado fueron sometidos a flexión durante 8 semanas solamente, la ecuación (2) describe el mecanismo de crecimiento desarrollado por los árboles durante ese período de tiempo.

RESULTADOS DEL CRECIMIENTO

Tanto en el caso de los árboles de crecimiento natural como en el de los de crecimiento forzado se obtienen niveles de esfuerzo notablemente más altos en la zona cercana a la altura de 300mm sobre el nivel de la tierra; sin embargo, estas condiciones de esfuerzo son intrascendentes para el análisis de acuerdo al principio de Saint Venant, ya que son la consecuencia de la aplicación de la carga puntual aplicada a esa altura.

Se obtuvo el valor de esfuerzo von Mises correspondiente a los 61 puntos localizados sobre el contorno de los tallos en cada una de las semanas de medición (figuras 9 y 10).

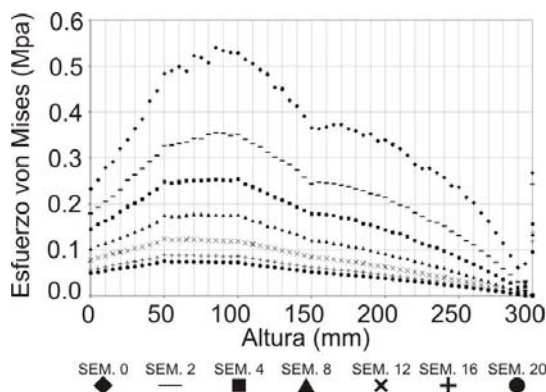


Fig. 9. Distribución de esfuerzos en los tallos de los árboles de crecimiento natural.

Es evidente que los niveles máximos de esfuerzo sobre los tallos se reducen conforme transcurren las semanas. El mayor cambio en la distribución

de esfuerzos se presentó durante las primeras 8 semanas de crecimiento. Durante ese período los árboles de crecimiento natural redujeron en un 39.51% los esfuerzos máximos en sus troncos, además, la desviación estándar de los valores de esfuerzo se redujo en un 64.19%, con lo que se demuestra que los árboles crecen de manera que su geometría tiende a homogenizar los niveles de esfuerzos a lo largo de su estructura, de acuerdo a la teoría de C. Mattheck [MA90].

El efecto sobre la distribución de esfuerzos en los tallos de crecimiento forzado es aún más notable (figura 10), ya que la distribución de esfuerzos alcanzada por los tallos de crecimiento natural hasta la semana 20, prácticamente la igualaron en tan sólo 8 semanas de crecimiento. En ese período la reducción de los niveles máximos de esfuerzo fue del 74.85% y la reducción de la desviación estándar de los esfuerzos en el contorno fue del 85.53%.

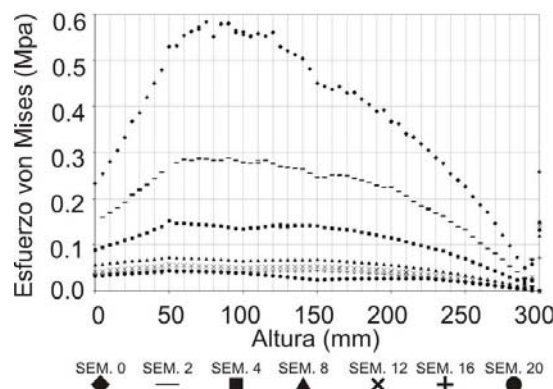


Fig. 10. Distribución de esfuerzos en los tallos de los árboles de crecimiento forzado.

CASO DE ESTUDIO

En trabajos anteriores se ha investigado la factibilidad de reproducir las condiciones de forma de estructuras biológicas y su posible utilización en el diseño de componentes mecánicos [RA03, RA04, RA05, SA91a, SA91b]. Este artículo presenta la implementación de los resultados hechos en trabajos anteriores [RA01a, RA01b, SC01] para optimizar una unión T bajo condiciones de flexión y una distribución de esfuerzos mejorada en un ambiente de elementos finitos usando MSC-Construct de la casa MSC.Software [MS01].

La metodología para la optimización de forma ha sido expuesta utilizando como base el crecimiento biológico y el método de los elementos finitos. En este trabajo se presenta una aplicación para validar la implementación de la metodología expuesta. El objeto de estudio comprende un elemento estructural de máquinas que contiene una transición geométrica que alteran el flujo de fuerzas uniforme. La detección de la región de intensificación de esfuerzo es la zona donde se definen las restricciones de movimiento de los nodos. Incluye la descripción tecnológica de la situación inicial, las condiciones geométricas iniciales, el mallado de elementos finitos, las condiciones de frontera, las condiciones de esfuerzo iniciales y las restricciones impuestas.

Esta información se resume en la siguiente tabla.

Tabla I.- Información técnica de las condiciones de entrada.			
Caso	Nombre	Descripción	Parámetros de diseño
1	Transición tipo "T"	Unión entre paredes de una misma estructura. Generalmente utilizada en bancadas y soportes estructurales.	Radio de la unión, longitud de la base, longitud de la costilla.

APLICACIÓN EN UNA TRANSICIÓN TIPO "T"

Las uniones entre paredes sirven como refuerzo en estructuras mecánicas y son también transiciones geométricas que originan concentraciones de esfuerzo. Existe un espectro amplio de uso de esta unión "T", por lo que los tipos y las condiciones de carga son muy variados. Se seleccionó el caso de flexión para el presente estudio y se consideró la geometría inicial de acuerdo a los estándares recomendados por la VDG-Verein Deutsche Gisserei (por sus siglas en alemán "Asociación de Fundidores Alemanes").

En la figura 11a y 11b se muestran los diseños estandarizados para una base con espesor menor a 25mm y un espesor mayor a 25mm respectivamente. En el diseño se busca una transición geométrica suave desde la pared a la costilla.

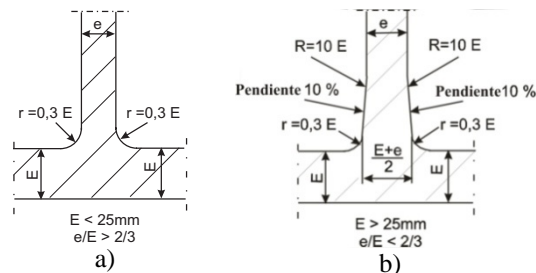


Figura 11.- Transición tipo "T" a) con espesor de pared menor de 25mm y b) con espesor de pared mayor de 25mm.

La geometría usada para el análisis y optimización se realizó considerando los parámetros de diseño mostrados en la tabla II en un ambiente de diseño asistido por computadora (CAD) y es mostrado en la figura 12.

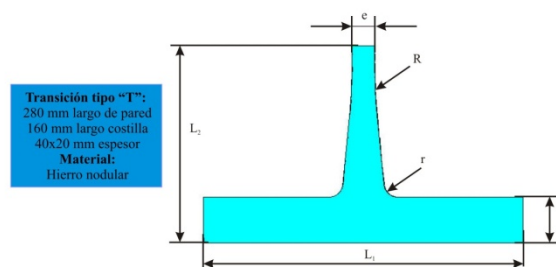


Figura 12.- Condiciones geométricas iniciales del caso.

CONDICIONES INICIALES

La unión tipo "T" con espesor de pared mayor a 25mm figura 12, presenta un diseño robusto por su elaborada forma. Los parámetros de diseño se presentan en la siguiente tabla.

Tabla II.- Parámetros de diseño transición "T"		
Descripción	Nom.	Parámetro (mm)
Espesor de pared	E	40
Espesor de costilla	e	20
Longitud de pared (sobre la base)	L1	280
Longitud de costilla (sobre la vertical)	L2	160
Radio menor (transición pared-pendiente)	r	12
Radio mayor (transición pendiente-costilla)	R	200

MALLADO DE ELEMENTOS FINITOS Y SUS PROPIEDADES

La discretización se realizó empleando una geometría construida en un ambiente de CAD procesada como superficie para usar elemento

cuadrilátero tipo cáscara (Shell Element). La figura 13 muestra la malla usando elementos tipo cuadrilátero de cuatro nodos. El espesor de cada elemento es constante a 1mm.

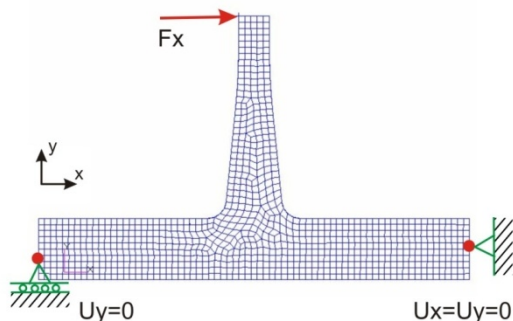


Fig. 13.- Condiciones frontera y malla de elementos finitos.

La tabla III muestra los datos de los parámetros utilizados en el programa de elementos finitos, así como también las propiedades mecánicas del material.

Tabla III.- Datos usados en el programa de FEM.	
Tipo de análisis	Estático
Tipo de elemento	Cuadrilátero de 4 nodos, tipo cáscara (Shell)
Número de elementos	896
Número de nodos	1007
Coefficiente de Poisson.	0.28
Módulo de elasticidad (GPa)	175
Densidad (kg/m ³)	7200

CONDICIONES DE FRONTERA

Los empotramientos de la estructura en un sistema de coordenadas cartesiano son para el extremo lateral derecho de la pared los grados de libertad transitorios iguales a cero ($u_x=u_y=0$) mientras que en la pared lateral izquierda únicamente esta restringido el grado de libertad en dirección y ($u_y=0$), como lo muestra la figura 13. La carga de flexión actúa sobre la cúspide de la costilla en dirección de x . La transmisión de los empotramientos se realiza a través de los nodos presentes sobre las paredes y en el caso de la carga de flexión es directamente aplicada sobre el vértice formado en el extremo superior de la costilla. La tabla IV presenta las magnitudes de las cargas usadas en este caso de estudio.

Tabla IV.- Datos usados en la definición de la fuerza (N).			
Lugar	Fx	Fy	Fz
Extremo superior costilla	500	0	0

CONDICIONES DE ESFUERZO INICIAL

El efecto de las condiciones de frontera del caso de estudio es expuesto en términos de la distribución del tensor de esfuerzos von Mises.

El análisis de la distribución de esfuerzos muestra el máximo sobre la región de la transición radio-pendiente con un valor de $\sigma_{\max}=60.6 \text{ N/mm}^2$ y es presentado en la figura 14.

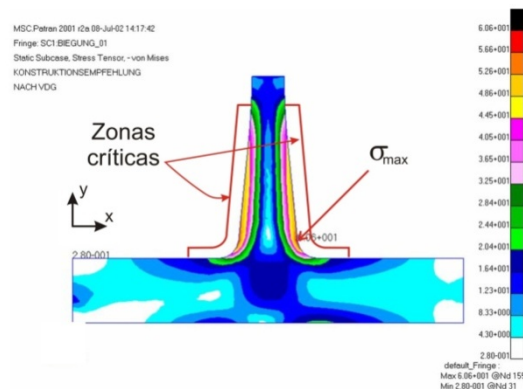


Figura 14.- Condiciones iniciales de distribución del tensor de esfuerzos von Mises.

RESTRICCIONES DE OPTIMIZACIÓN

La simulación del comportamiento inicial del esfuerzo permite establecer las restricciones que prevalecerán durante la fase de optimización. Para el presente caso se consideran los siguientes objetivos: La región a optimizar son las paredes de la costilla mostradas como la zona crítica en la figura 14. El objetivo de optimización es la minimización del esfuerzo von Mises máximo a un valor de referencia $\sigma=40 \text{ N/mm}^2$. Los nodos maestros tienen capacidad de movimiento en los grados de libertad x y y con desplazamiento normal a la superficie.

RESULTADOS DEL CASO DE ESTUDIO

En el resultado de la optimización se observa la influencia del cambio de la forma como consecuencia de la minimización del esfuerzo. Se analiza también la distribución de esfuerzos y los cambios geométricos producto de las simulaciones realizadas.

En la figura 15 se presenta la distribución de esfuerzos resultado de la optimización geométrica. Se observa una distribución homogénea del tensor de esfuerzo von Mises a lo largo de la zona crítica presentada en la figura 14. Se exhibe un máximo de $\sigma_{\max}=48 \text{ N/mm}^2$ a lo largo de la región crítica de la misma geometría.

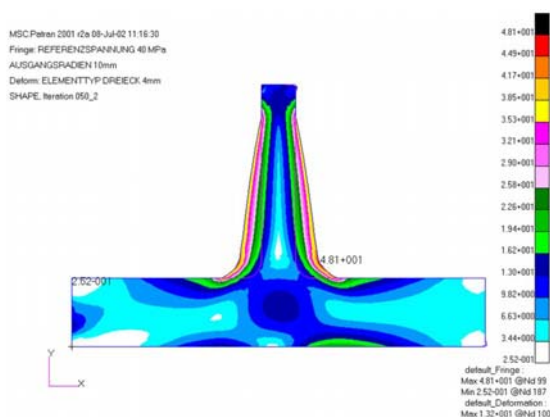


Figura 15.- Optimización geométrica con esfuerzos homogéneos.

Basados en la optimización de la forma se realizó el procedimiento de optimización alcanzando después de 50 iteraciones una distribución homogénea a lo largo de la transición pared-costilla.

La gráfica mostrada en la figura 16 presenta la distribución de esfuerzos tanto en la geometría inicial y el resultado de la optimización dejando evidencia de la mejora sustancial de la homogeneidad en la estructura optimizada y minimización del esfuerzo von Mises máximo.

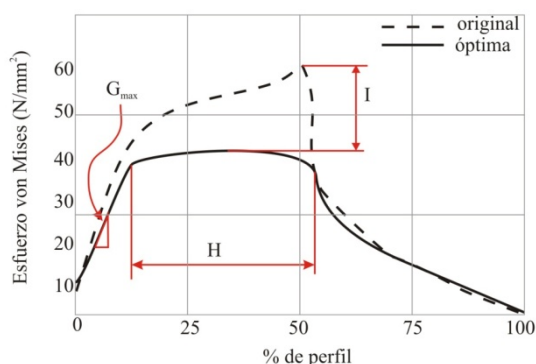


Figura 16.- Esfuerzo a lo largo de la transición T.

Los esfuerzos homogéneos se logran en el rango H (aproximadamente del 15 al 50% del perfil de la región crítica). El gradiente del esfuerzo local G_{\max} más brusco se presenta al inicio del perfil, permitiendo con ello que en casi toda la zona haya un cambio menor y por lo tanto más suave de esfuerzo.

La curva final resultado de la optimización tiene una mejor distribución de esfuerzos y hasta el 75% de la región un valor local sustancialmente

menor a la original. El índice de mejora I ocurre al 50% del perfil; el valor se presenta en la tabla V.

Tabla V.- Resultados de la optimización geométrica.				
Caso	Nombre	Esfuerzo von Mises máximo (N/mm ²)		Índice % de mejora
		Antes	Después	
1	Transición tipo "T"	60.6	48.1	21

También se debe considerar que la zona crítica fue sometida solo a crecimiento y no a reducción según las restricciones impuestas de tal manera que el comportamiento de la estructura es el resultado de las restricciones impuestas.

CONCLUSIONES FINALES

En este trabajo se presentó un análisis de validación de investigaciones de Osler, West y Downes [OS93] que utilizan el crecimiento biológico de tallos de árboles como criterio de diseño de componentes y productos.

Los resultados de los análisis mediante FEM en los tallos de los árboles concuerdan con la teoría de los esfuerzos constantes, ya que en todos los casos la mejora en la distribución de esfuerzos aumentó con el transcurso del tiempo debido al crecimiento adaptativo de los árboles.

Se presentó el caso de estudio de un componente estructural tipo "T", en donde por medio de la modificación geométrica usando el modelo de crecimiento biológico se comprobó que es posible obtener una distribución de esfuerzos mejorada, lo cual da como resultado una mayor vida útil del componente.

La implementación de los mecanismos de crecimiento biológico en el diseño de elementos mecánicos representa una importante alternativa para obtener componentes mejorados como lo demuestran los resultados de este trabajo, en los que se redujeron de forma significativa los valores máximos de esfuerzo además de homogenizarse los niveles a lo largo de sus geometrías.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado en el marco de la línea de generación y aplicación de conocimiento LGAC L2: "Optimización geométrica de productos" del Cuerpo Académico Sistemas Integrados de Manufactura de la Facultad de

Ingeniería Mecánica y Eléctrica, UANL con el apoyo financiero de la misma.

REFERENCIAS

[BA34]	Baud, R.V. (1934). Beiträge zur Kenntnis der Spannungsverteilung in prismatischen und keilförmigen Konstruktionselementen mit Querschnittsübergängen, Report 29, Schweiz. Verband für Metallprüfung in der Technik (Bericht 83 der Eidgen. Mat. Prüf.-Anstalt), Zürich.
[JA54]	Jacobs M. R. (1954). The effect of wind sway on the form and development of Pinus radiata. D. Don. Aust J Bot, 2, 35-51.
[LA63]	Larson P. R., (1963). Stem form development of forest trees. For Sci, Monograph 5.
[LA65]	Larson P. R. (1965). Stem form of young larch as influenced by wind and pruning. For Sci , 11, 412-424.
[HE68]	Heywood, R.B.: Photoelasticity for Designers, Prensa Pergamon. Oxford, 1968.
[MA90]	Mattheck, C. (1990). Engineering components grow like trees. VCH Verlagsgesellschaft, D-6940, 143-168.
[MA90a]	Mattheck, C.; Moldenhauer, H.: An intelligent CAD-Method based on Biological Growth, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. Vol 13, No. 1, 41-51, 1990.
[MA90b]	Mattheck, C.: Design and growth rules for Biological structures and their application to Engineering, Fatigue Fract. Engng Mater. Struct. Vol 13, No. 5, 535-550, 1990.
[MA92]	Mattheck, C.(1992) Design in der Natur – Der Baum als Lehrmeister. Freiburg im Breisburg: Rombach.
[MA02]	Mattheck C.; Tesori J; Karlson.: Konstruieren wie die Natur-Bauteile, Waxsen “wie Bäume and Knähen. Z6V-zentrale für Gussverwendung, 2002.
[ME93]	Metzger, K. (1893). Der Wind als maßgeblicher Faktor für das Wachstum der Bäume. Mündener Forstliche Hefte. Springer Verlag.
[MT90]	Mattheck, C. (1990). Design and

	growth rules for biological structures and their application to engineering. Fatigue and Fracture of Engineering Materials Structures, 13, 535-550.
[MS01]	MSC.Construct Version 4.0 Users Manual, MSC.Software Corporation, Santa Ana California, 2001
[NA71]	Nachtigall, W. (1971). Biotechnik. Heidelberg: Quelle & Meyer.
[NE57]	Neuber, H. (1957). Kerbspannungslehre, Grundlagen für genaue Festigkeitsberechnung. Springer Verlag, 2.
[OS93]	Osawa A. (1993). Effects of mechanical stresses and photosynthetic production on stem form development of Populus maximowiczii. Ann Bot, 71, 489-494.
[OS96]	Osler, G.H.R. , West, P.W. y Downes, G.M. (1996). Effects of bending stress on taper and growth of stems of young Eucalyptus regnans trees. Springer-Verlag, 10, 239-246.
[RA01a]	Ramírez, F. “Validating of optimization models for the Bio-Cast-Design”. Master Thesis, Technische Universität Hambrug-Harburg, 2001.
[RA01b]	Ramírez, F., “Konstruktions-elemente in grossen Sandgussteilen”. Interner Bericht, Technische Universität Hambrug-Harburg, 2001.
[RA03]	Ramírez, F., López, E. Ortiz, U., Guzmán, R. “Reducción de la concentración de esfuerzos para piezas de fundición por medio del método de elementos finitos utilizando algoritmos de crecimiento biológico”. IX Congreso Anual SOMIM 2003 vol. VI, pág. 25, Sept. 2003.
[RA04]	Ramírez, F., López, E. Ortiz, U. “Diseño óptimo de elementos mecánicos usando algoritmos de crecimiento biológico”. Revista Ingenierías Vol. VII, No. 22, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Enero-Marzo 2004.
[RA05]	Ramírez, F., López, Romero, I. “Optimización geométrica con criterio de crecimiento biológico para la reducción de la concentración de esfuerzos en placas

	con perforaciones transversales”. XI Congreso Internacional Anual SOMIM 2005 vol. VI, pág. 471, Sept. 2005.
[RO06]	Romero C.: Relación de la geometría de elementos mecánicos con el cambio de formas en la naturaleza como criterios de diseño, Tesis, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2006.
[SA91a]	Sauter, J. Beanspruchungsminimierung von Bauteilen durch Gestaltoptimierung mit biologischer Intelligenz, ANSYS Users` Meeting, Tagungsband, 23.-25. Oktober 1991, Bamberg.
[SA91b]	Sauter, J. CAOS oder die Suche nach der optimalen Bauteilform durch eine effiziente Gestaltoptimierungsstrategie, XX. Internationaler Finite Elemente Kongress, Tagungsband, 18.-19. November 1991, Baden-Baden, 1991.
[SC01]	Schmidt, Th., “Kerbwirkung in rotationssymmetrischen Bauteilen”. Interner Bericht, Heidenreich & Harbeck, 2001.
[TH16]	Thompson, D’Arcy (1916). On growth and form. Prensa de la Universidad de Cambridge.
[VA92]	Valinger, E. (1992). Effects of wind sway on stem form and crown development of Scots pine (<i>Pinus sylvestris</i> L.). Aust For , 55, 15-21.

AUTORES

López Guerrero, Francisco Eugenio

Ingeniero Mecánico Electricista e Ingeniero en Control y Computación de la UANL, Maestro en Ciencias de la Administración con especialidad en Sistemas por la misma Universidad, durante estos estudios participó en la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania en donde desarrolló su tesis de maestría. Doctor en Ingeniería de materiales en la Universidad Autónoma de Nuevo León trabajando en conjunto con el Departamento de Materiales y Automatización de la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania. Profesor de tiempo completo de la División de Ingeniería Mecánica de la FIME. Miembro del Cuerpo Académico “Sistemas Integrados de Manufactura”, así como también de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica SOMIM. elopez@mail.uanl.mx

Ramírez Cruz, Francisco

Ingeniero Mecánico Electricista, Maestro en Ciencias de la Mecatrónica en la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania. Dirigió el Departamento de Somatoprótesis de la Facultad de Medicina de la UANL. Doctor en Ingeniería de Materiales en la Universidad Autónoma de Nuevo León trabajando en conjunto con el Departamento de Materiales y Automatización de la Universidad Técnica de Hamburgo, Alemania. Profesor de tiempo completo de la División de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Miembro del Cuerpo Académico “Sistemas Integrados de Manufactura”. ramirez@mail.uanl.mx

Carlos Iván Romero Martínez

De la Garza Salinas, Fco. Javier

Ingeniero en Control y Computación egresado de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En la misma institución realizó sus estudios de maestría en el área de Eléctrica con especialidad en Electrónica. Tiene especialización en Sistemas Distribuidos en la Universidad Técnica de Hamburgo en Alemania. Miembro del Cuerpo Académico “Sistemas Integrados de Manufactura”.

Profesor de tiempo completo de la División de Ingeniería Mecánica de la FIME. Actualmente es Jefe del Dpto. de Mecatrónica e imparte cátedras a

nivel licenciatura y maestría en las áreas de robótica, automatización e inteligencia artificial. Ha participado en proyectos industriales implantando sistemas de automatización y control entre los que destacan sistemas de tratamiento de agua industrial, reactores químicos y calderas entre otros.

Castillo Ocañas, José Luis

Ingeniero Mecánico Electricista egresado de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. En la misma institución realizó sus estudios de Maestría en Ciencias con especialidad en Diseño Mecánico. Miembro del Cuerpo Académico “Sistemas Integrados de Manufactura”.

Profesor de tiempo completo de la División de Ingeniería Mecánica de la FIME. Actualmente es Coordinador de la Maestría en Ingeniería con orientación en Manufactura y Mecatrónica e imparte cátedras a nivel licenciatura y maestría en las áreas de máquinas-herramienta, metrología y robótica. Ha participado en la implantación de programas académicos en FIME entre los que se cuentan la carrera de Ingeniero en Manufactura, la Maestría en Ingeniería de la Mecatrónica y la Maestría en Ciencias de la Manufactura.