

# Análisis por el método de los elementos finitos de las cargas actuantes en los rodillos y engranes de un prototipo de laminador

## Stress analysis by finite element method of acting loads in on rollers and gears of a prototype of a laminator

Beltrán Reyna Roberto F.<sup>1</sup>, Santana Reyes Santiago A.<sup>2</sup>, Álvarez Cabrales Alexis<sup>2</sup>, Ramos Botello Yoan M.<sup>2</sup>, Morales Tamayo Yoandrys<sup>3</sup>, Pino Tarragó Julio C.<sup>4</sup>, Mena Mena Euro R.<sup>1</sup>, Terán Herrera Héctor C.<sup>1</sup>, Bucheli Andrade José G.<sup>5</sup>.

<sup>1</sup>Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica,  
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga- Ecuador.  
<sup>2</sup>Departamento de Ciencias Técnicas. Facultad de Ciencias Técnicas.  
Universidad de Granma, Cuba  
<sup>3</sup>Unidad Académica Ciencia de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA),  
Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná, La Maná- Ecuador.  
<sup>4</sup>Unidad Académica Ciencia de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA),  
Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga- Ecuador.  
<sup>5</sup>Departamento de Eléctrica y Electrónica  
Universidad de las Fuerzas Armadas  
ESPE, Latacunga- Ecuador

[rbeltrnr@espe.edu.ec](mailto:rbeltrnr@espe.edu.ec), [ssantanar@udg.co.cu](mailto:ssantanar@udg.co.cu), [aalvarezc@udg.co.cu](mailto:aalvarezc@udg.co.cu), [yramosb@udg.co.cu](mailto:yramosb@udg.co.cu), [ymoralesta83@gmail.com](mailto:ymoralesta83@gmail.com),  
[julio.pino@utc.edu.ec](mailto:julio.pino@utc.edu.ec), [ermena@espe.edu.ec](mailto:ermena@espe.edu.ec), [hcteran@espe.edu.ec](mailto:hcteran@espe.edu.ec), [jgbucheli@espe.edu.ec](mailto:jgbucheli@espe.edu.ec)

**Recibido:** Agosto 2015, **Publicado:** Diciembre 2015

**Resumen**— Los procesos de manufactura han ocupado en la actualidad gran parte del mercado mundial y de la industria metal mecánica, la obtención de chapas metálicas laminadas no queda exenta de todos estos avances tecnológicos. El objetivo del presente trabajo es determinar el comportamiento tensional de los principales componentes que forman parte de un laminador (rodillos de laminación y engranes de transmisión), a través de la modelación en software profesionales de diseño y su posterior análisis por el método de los elementos finitos (MEF). Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad y viabilidad de fabricación de este tipo de máquinas, basado en el comportamiento de las tensiones y los esfuerzos resultantes, quedando demostrado a través de la distribución isocromática de factor de seguridad (FDS) que los elementos mecánicos resisten las sollicitaciones a las que estarán sometidos durante el cumplimiento de su destino de servicio.

**Palabras Claves**— Elementos finitos, engranes, laminador, rodillos, tensiones.

**Abstract**— The manufacturing processes have now occupied much of the world market and the industries mechanical metal, obtaining laminated sheet metal is not exempted from these technological advances. The aim of this study is to determine the stress behavior of the main components that are part of a rolling mill (mill rolls and gear transmission), through professional modeling design software and subsequent analysis by the method of the elements finite (MEF). The results demonstrate the feasibility and viability of manufacturing these machines, based on the

*behavior of the tensions and the resulting effort, being demonstrated through the isochromatic distribution of safety factor (FDS) that the mechanical elements resist stresses to which they will be subjected during the fulfillment of his destiny of*

**Keywords**— Finite elements, gears, laminator, rollers, stress.

### I. INTRODUCCIÓN

El laminado es una de las operaciones más usadas del conformado de metales debido a la utilización de los perfiles y láminas que se obtienen a partir de él. Más del 90% de los metales conformados son laminados. Por lo general las prácticas modernas tanto de aceración como de fabricación de diversos metales y aleaciones ferrosas y no ferrosas combinan los procesos de colada continua con los de laminación, lo que mejora en gran medida la productividad y disminuye los costos de producción (Kalpakjian, 2010).

En los últimos 20 años, la formulación de análisis matemáticos sofisticados en los procesos de conformado ha favorecido la creación de productos con mejor calidad, así como el aumento considerable de la eficiencia en la industria de la metalurgia.

El metal, conforme a lo expresado por A. Malishev (1987), en estado sólido es un cuerpo policristalino que consta de una gran cantidad de granos de forma geométrica

irregular, denominados monocristales. Para realizar la deformación plástica, el metal se somete a tensiones que rebasan el límite elástico y son inferiores al límite de rotura (Figura 1). La deformación plástica del monocristal se desarrolla, en lo fundamental, a base de traslaciones (deslizamientos) de un grupo de redes cristalógraficas respecto a otro. Las traslaciones tienen lugar, principalmente, siguiendo los planos que están más densamente poblados por átomos. Al aumentar el grado de deformación los granos giran, se trituran y sus fragmentos se orientan en dirección de la deformación formando una estructura fibrosa.

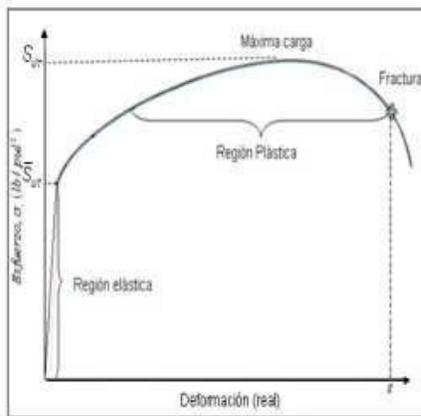


Fig. 1 Curva esfuerzo – deformación. (Mott, 2014)

La plasticidad de los metales, desde el punto de vista de los estados de la materia (líquido, sólido y gaseoso), puede valorarse como una etapa transitoria entre el estado sólido y el líquido (Salueña y Nápoles, 2000). Con la finalidad de aumentar la plasticidad del metal y disminuir la cantidad de trabajo que se consume en la deformación, antes de someter el metal a cualquier operación de conformado es necesario calentarlo hasta una determinada temperatura.

Para otros autores el conformado es un proceso en el que una masa de metal, o una aleación es sometida a fuerzas mecánicas. Bajo la acción de dicha fuerza mecánica, la forma y el tamaño de la pieza metálica cambian (Gupta, et al., 2009).

El laminado es el proceso de reducir el espesor, o modificar la sección transversal, de una pieza mediante fuerzas de compresión aplicadas a través de un juego de rodillos. La laminación, que representa un alto porcentaje de todos los metales producidos usando procesos de conformado, fue desarrollada por primera vez a comienzos del siglo XVI (Kalpakjian, 2010). M. Groveer (1997) plantea que el laminado es un proceso de deformación en el cual el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos opuestos, como se muestra en la figura 2.

En el laminado (Figura 2), de acuerdo con (Kalpakjian, 2010), una cinta metálica de espesor  $H_0$  entra en el espacio de laminación y un par de rodillos giratorios la reducen a un espesor  $H_f$ . La velocidad de la superficie de los rodillos es  $V_r$ . La velocidad de la cinta aumenta desde su valor de entrada  $V_0$  conforme se mueva a través del espacio de

laminación, de la misma manera en que un fluido incompresible debe fluir más rápidamente cuando pasa a través de un canal convergente. La velocidad en la superficie de los rodillos  $V_r$  debe de ser mayor que la velocidad de entrada  $V_0$ . La velocidad de la cinta será mayor a la salida del espacio de laminación y se denota  $V_f$ , el arco de contacto entre los rodillos y el material se denomina  $\alpha$ .

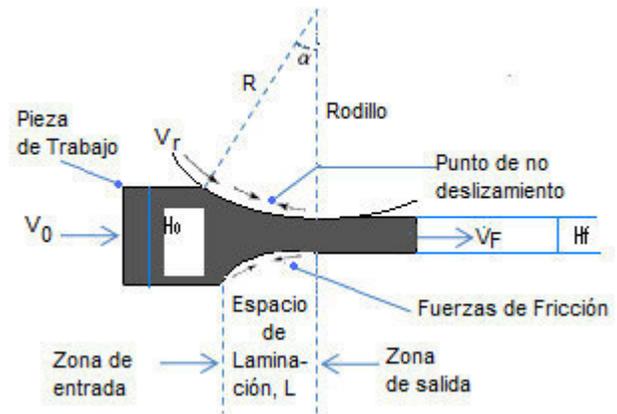


Fig. 2 Esquema de fuerzas y velocidades que actúan en el proceso de laminado (Kalpakjian, 2010)

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Requerimientos funcionales del laminador

Este laminador se diseña con el objetivo de reducir el espesor de cintas de latón tipo UNS C26000 recocido, las propiedades se encuentran en las tablas I y II respectivamente.

TABLA I  
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL LATÓN UNS C26000 RECOCIDO (MATWEB, 2012).

Dureza	125 HB
Resistencia a la flexión	130 MPa
Resistencia a la compresión	350 MPa
Módulo elástico	110 GPa
Coefficiente de Poisson	0,375
Elongación	55 %
Densidad	8,53 g/cm <sup>3</sup>

TABLA II  
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL LATÓN UNS C26000 RECOCIDO (MATWEB, 2012).

Componentes	Proporción
Cobre (Cu)	68,5-71,5 %
Hierro (Fe)	Hasta 0,05 %
Plomo (Pb)	Hasta 0,07 %
Zinc (Zn)	28,5-31,5 %
Otros	Hasta 0,15 %

### B. Características típicas de los rodillos de laminación plana

Los rodillos de un laminador constan de la parte de trabajo, a la que se le une por ambos extremos los llamados cuellos, siendo estas las partes más pequeñas de los mismos, que sirven como sujeción del rodillo en los cojinetes (Malishev, 1987). Según S. Kalpakjian (2010), estos sufren cambios de forma geométrica, durante la laminación debido a las fuerzas que actúan directamente sobre los órganos de

trabajo (rodillos). Las fuerzas del laminado tienden a doblar los rodillos elásticamente durante la laminación, los cuales presentan un comportamiento similar al de una viga recta que se flexiona con una carga transversal. Debido a las deformaciones que experimentan los rodillos durante el cumplimiento de su destino de servicio, la cinta laminada tiende a ser más gruesa en el centro que en los extremos. Para evitar este problema se hace necesario rectificar los rodillos de manera tal que el diámetro en el centro sea un poco más grande que en sus extremos, (Nielsen, 2015).

### C. Características de los rodillos del laminador

En la figura 3 se muestran los rodillos del laminador con los respectivos engranes acoplados, los cuales aplican presión sobre la lámina en una pequeña área de contacto. Debido a la ley de acción y reacción, esta presión que se le aplica a la lámina es devuelta con la misma magnitud, pero en sentido opuesto sobre los rodillos. Sobre estas piezas también se encuentran aplicadas fuerzas tangenciales y radiales, debido a que son estas las que se encuentran incidiendo sobre los engranes. En el caso del rodillo inferior en uno de sus extremos está sometido a un momento torsor que provoca el movimiento de todo el conjunto. Estas piezas se apoyan en dos cojinetes de deslizamiento, los cuales restringen el movimiento, permitiéndoles solo rotar a una velocidad de  $10^{-1}$  min.

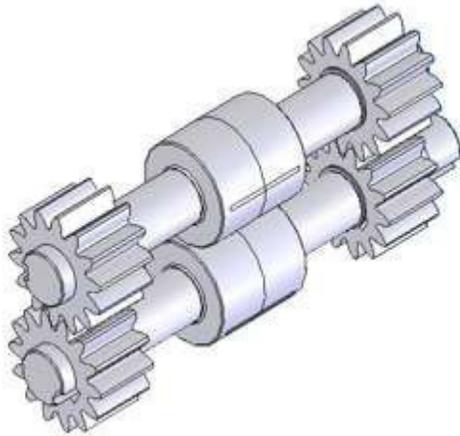


Fig. 3 Representación gráfica de los rodillos y engranes del laminador.

El material de estos rodillos es acero AISI 1040 estirado en frío, las propiedades mecánicas y composición química se encuentran en las tablas III y IV respectivamente.

TABLA III  
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI 1040 ESTIRADO EN FRÍO

Dureza	143 HB
Resistencia a la flexión	450 MPa
Resistencia a la rotura	485 MPa
Módulo elástico	200 GPa
Coefficiente de Poisson	0,29
Elongación	12 %
Densidad	7,845 g/cm <sup>3</sup>

TABLA IV  
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI 1040 ESTIRADO EN FRÍO

Componentes	Proporción
Carbón (C)	0,37 – 0,43 %
Hierro (Fe)	98,6 – 99 %
Manganeso (Mn)	0,60 – 0,90 %
Fósforo (P)	Hasta 0,04 %
Azufre (S)	Hasta 0,05 %

Sin embargo, el material utilizado para los engranes es un acero AISI 4340 normalizado, el cual presenta buen comportamiento durante la aplicación de tratamiento térmico, con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas (usualmente el templado en aceite seguido de un revenido) lo que le permite poseer una buena combinación de ductilidad y dureza. Entre los usos más comunes de este tipo de material se encuentran: pasadores de biela y pistón, engranes, dados extrusores, válvulas, etc. Las propiedades mecánicas y la composición química se exponen en las tablas V y VI respectivamente.

TABLA V  
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO AISI 4340 NORMALIZADO

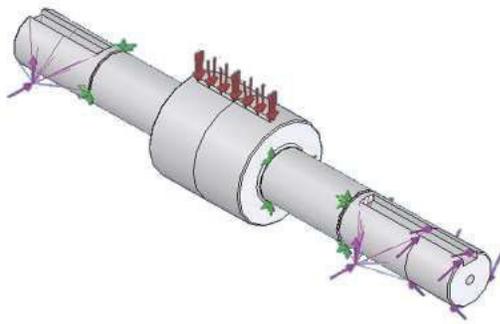
Dureza	321 HB
Resistencia a la flexión	710 MPa
Resistencia a la rotura	1110 MPa
Módulo elástico	205 GPa
Coefficiente de Poisson	0,29
Elongación	13,2 %
Densidad	7,85 g/cm <sup>3</sup>

TABLA VI  
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL ACERO AISI 4340 NORMALIZADO

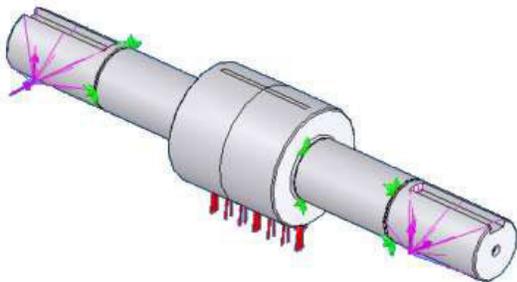
Carbón (C)	0,37 – 0,43 %
Cromo (Cr)	0,70 – 0,90 %
Hierro (Fe)	95,19% – 96,33 %
Manganeso (Mn)	0,60 – 0,80 %
Molibdeno (Mo)	0,20 – 0,30 %
Níquel (Ni)	1,65 – 2,0 %
Fósforo (P)	Hasta 0,035 %
Silicio (Si)	0,15 – 0,30 %
Azufre (S)	Hasta 0,040 %

### D. Análisis por el MEF de los rodillos del laminador

Para iniciar el análisis, utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF), los rodillos se modelaron por medio de un software de diseño mecánico, posteriormente se definió el tipo de material (tabla III). Se aplicó el valor de la presión de  $2,972 \cdot 10^8$  Pa. Los valores de las fuerzas tangencial y radial poseen valores de 2225 N, fuerzas estas que se aplicaron como cargas remotas, puestos que estas son las fuerzas que actúan sobre los engranes, la representación de estas fuerzas se muestra en las figuras 4 y 5 para los rodillos inferior y el superior respectivamente.



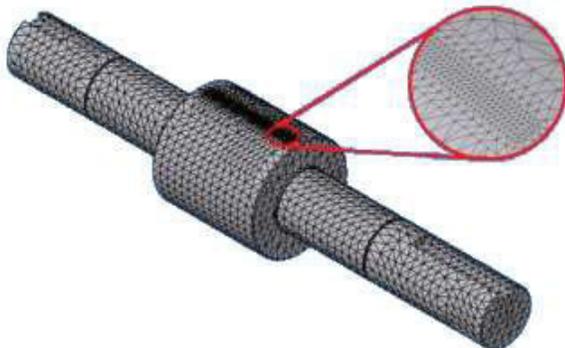
**Fig. 4 Representación gráfica de las restricciones del rodillo inferior (RI).**



**Fig. 5 Representación gráfica de las restricciones del rodillo superior (RS).**

Las restricciones que se establecieron en cada pieza solamente permiten el movimiento rotacional, imposibilitando otro tipo de traslación, como muestra en las figuras 4 y 5, el rodillo inferior (RI) tiene la particularidad de estar sometido además a un momento torsor con un valor igual a 85,65 J.

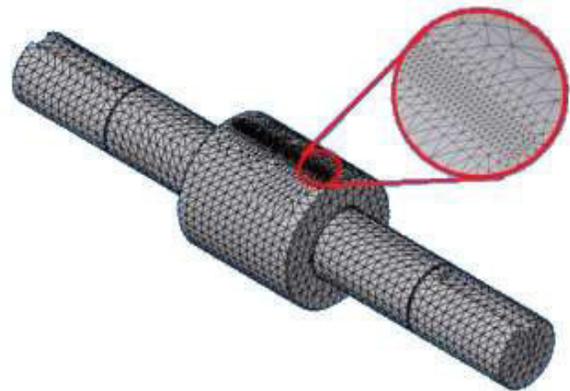
Para el mallado se escogió un elemento sólido tetraédrico de alto orden (10 nodos) con 3 grados de libertad por nodo con un tamaño global de 5,8 mm y una tolerancia de 0,29 mm, para ambos rodillos a calcular, aspectos estos que fueron preestablecidos por el software atendiendo a las características del modelo CAD. Para garantizar precisión en los resultados en la zona de contacto de ambos rodillos se realizó un control del mallado, con un tamaño de elemento de 1 mm para ambos rodillos. La malla del rodillo inferior (RI) tiene 56125 elementos y 80617 nodos. La malla del rodillo superior (RS) tiene 48802 elementos y 71133 nodos como se puede observar en las figuras 6 y 7 respectivamente.



**Fig. 6 Representación gráfica del mallado de rodillo inferior (RI)**

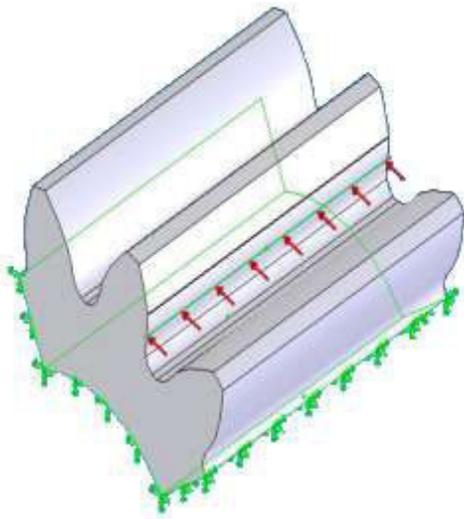
*E. Análisis por el MEF del engrane para los esfuerzo de contacto*

Con la finalidad de simular las condiciones de operación real se toma el punto más crítico de funcionamiento, cuando un solo par de dientes recibe toda la carga (punto de contacto único inferior) según lo establecido por (Carro, et al., 2012). Debido a que el RS se desplazará cierta distancia del RI, lo que traerá como consecuencia un aumento en la longitud existente entre los centros de los engranes, por tanto la circunferencia primitiva ajustada se desplazará a la mitad de la distancia entre los centro de los engranes y a partir de esta posición se establecen los puntos de contacto único inferior y superior, muy cerca de la circunferencia primitiva. Esta circunferencia primitiva ajustada sirve también como eje de simetría para el área de contacto. En este estudio sobre el área establecida se aplicará la presión cuyo valor es  $4,636 \cdot 10^8$  Pa.



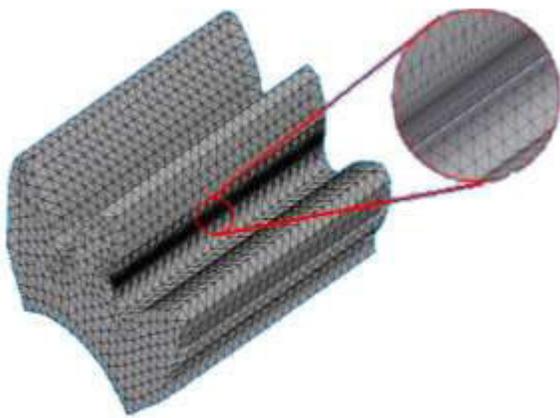
**Fig. 7 Representación gráfica del mallado de rodillo superior (RS).**

Las restricciones no le permiten al engrane rotar ni moverse en ningún eje de traslación (el engranaje rota a medida que lo hace el rodillo), por lo que las restricciones del modelo son fijas sin ningún grado de libertad y se establecen en la zona donde el engrane se monta con el rodillo y en las caras adyacentes, a donde se hizo el corte del engrane para simplificar el modelo, como se muestra en la figura 8.



**Fig. 8** Representación gráfica de las restricciones del engrane para los esfuerzos de contacto.

El tipo de malla utilizado es el mismo que se empleó en los rodillos superior e inferior, tiene un tamaño general de 2 mm con una tolerancia de 0,09 mm, para obtener un resultado más exacto, en el área de contacto se emplea una malla fina con elementos de un tamaño de 0,3 mm, atendiendo a todas estas características la malla tiene 43101 elementos y 63683 nodos, aspectos estos que fueron preestablecidos por el software atendiendo a las características del modelo CAD; como se puede observar en la figura 9.

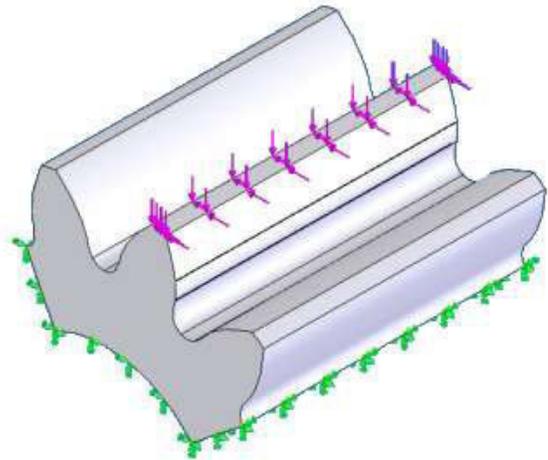


**Fig. 9** Representación gráfica del mallado del engrane para los esfuerzos de contacto.

*F. Análisis por el MEF del engrane para el esfuerzo de flexión*

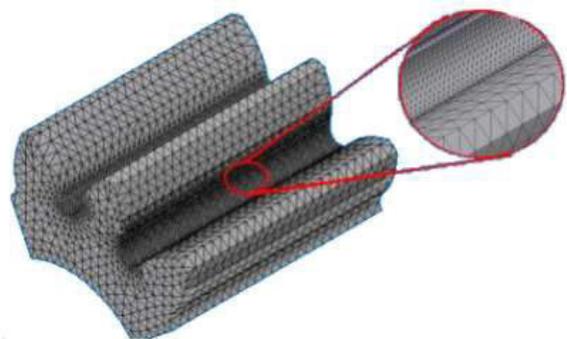
Las cargas actuantes que determinan la falla del diente son la fuerza tangencial y fuerza radial, ambas son componentes de la carga normal. Para la AGMA estas fuerzas actúan en la cabeza del diente, además de considerar la carga distribuida uniformemente a lo largo de toda la línea de contacto, estudios realizados por J. Carro (2011) han tomado como basamento este principio. Por lo tanto como se muestra en la

figura 10 las componentes radial y tangencial de la fuerza normal se sitúan en la cabeza del diente y las restricciones en la zona donde se ensambla en el rodillo, en las caras adyacentes a donde se hizo el corte.



**Fig. 10** Representación gráfica de las restricciones del engrane para los esfuerzos a flexión.

En este estudio el tipo de malla utilizado es igual a la empleada para el análisis de los engranes para los esfuerzos de contacto; el tamaño global de la misma fue de 2 mm, una tolerancia de 0,1 mm. Debido a que el área de especial interés en este tipo de análisis es la base de los dientes, fue en esta zona donde la densidad del mallado fue más pequeña, el tamaño del elemento de la malla fue de 0,6 mm. La cantidad de elementos y de nodos fue de 154917 y 28196 respectivamente, aspectos estos que fueron preestablecidos por el software atendiendo a las características del modelo CAD, como se evidencia en la figura 11.



**Fig. 11** Representación gráfica del mallado del engrane para los esfuerzos de contacto.

**III. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS**

Para desarrollar el presente estudio y obtener los resultados que se muestran a continuación, se utilizaron software de Ingeniería y Diseño Asistido por Computadora (CAD - CAE) empleando el Método de los Elementos Finitos como herramienta de simulación.

Las cargas que actúan sobre los rodillos generan tensiones internas en el material, por lo que se hace necesario determinar las tensiones de von Mises- Hencky o criterio de

fallo elástico, estas tensiones se expresan como un valor escalar proporcional a la energía de deformación elástica de distorsión, además de ser las resultantes de las componentes de las tensiones máximas en los tres ejes de coordenadas.

La teoría del fallo elástico establece que los materiales comienzan a ceder en una cierta ubicación una vez que el valor de las tensión de von Mises se iguala al límite de tensión del material en cuestión.

Para el caso del rodillo inferior (RI) las tensiones de von Mises alcanzan el valor máximo de  $2,969 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$  como se muestra en la figura 12; donde se puede apreciar que la máxima concentración de las tensiones se encuentra en el área de contacto de la lámina con el rodillo, este resultado se debe al alto valor de las cargas concentradas en esta zona cuando se laminan las cintas. Otra importante zona de concentración de las tensiones es el área de cambio de sección transversal del rodillo, producto a la propia geometría de esta pieza. Para disminuir el valor de las tensiones en esta región se han considerado radios que permitirán un suave cambio de sección transversal y un alivio de dichas tensiones.

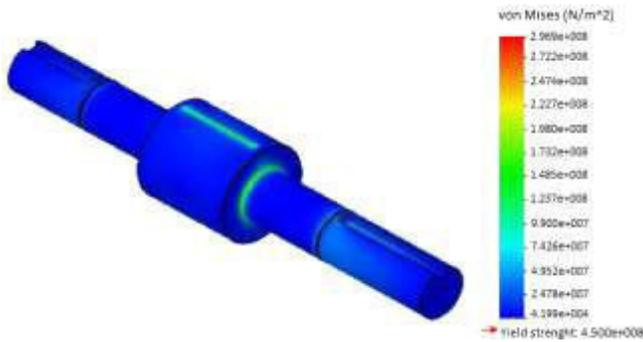


Fig. 12 Representación gráfica de tensiones de von Mises en el rodillo inferior (RI).

En la figura 13 se puede apreciar la forma en que progresan las tensiones en el rodillo inferior (RI), al actuar las cargas sobre la pieza estas generan esfuerzos internos prematuros en las zonas de contacto y cambio de sección y luego sobre las demás áreas de la pieza.



Fig. 13 Representación gráfica del progreso de las tensiones de von Mises en el rodillo inferior (RI).

El factor de seguridad en el RI es de 1,3 como se muestra en la figura 14, el valor numérico es mayor que 1 por lo que

se puede expresar que las máximas tensiones internas en la pieza producto de las cargas actuantes no sobrepasan el límite elástico, por lo que las deformaciones no serán permanentes.

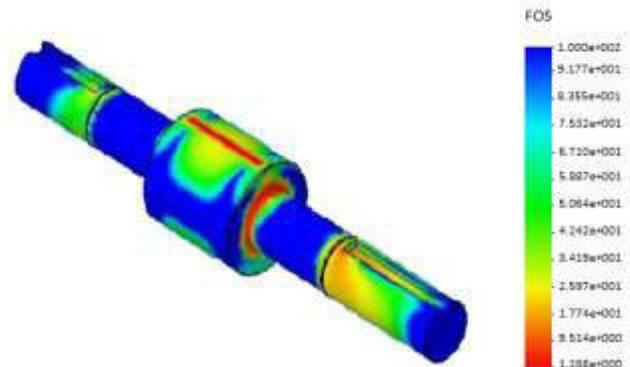


Fig. 14 Representación gráfica de la distribución del factor de seguridad en el rodillo inferior (RI).

Como se muestra en la figura, las zonas más peligrosas en este rodillo se encuentran en las áreas de laminado y cambio de sección transversal, en la zona donde se aplica el momento torsor existe una lógica distorsión en el estado tensional la cual no es significativa, igualmente ocurre en las zonas donde se encuentran ubicados los engranes.

En el rodillo superior (RS) las tensiones de von Mises tienen un comportamiento similar al RI, con un valor máximo de  $2,796 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ , como se muestra en la figura 15.

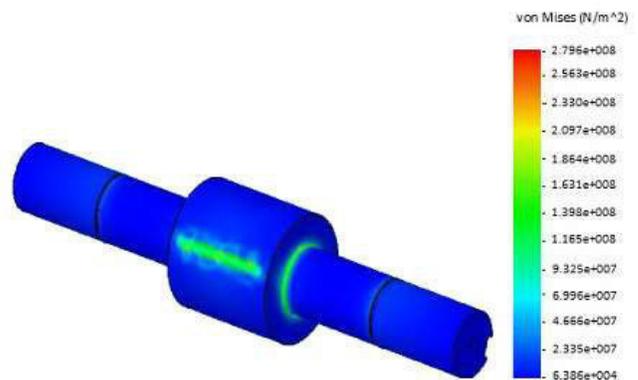


Fig. 15 Representación gráfica de tensiones de von Mises en el rodillo superior (RS).

Como en el RI, el progreso de las tensiones internas ocurre de manera similar en el RS solo que en esta pieza no existe, un valor significativo de los esfuerzos internos en el extremo ya que la transmisión de momento torsor no ocurre en esta zona sino a través de los engranes. Producto de la acción de las cargas, las tensiones internas se producen de forma prematura, debido a la configuración de la pieza y a la acción de las cargas sobre la misma como se observa en la figura 16.

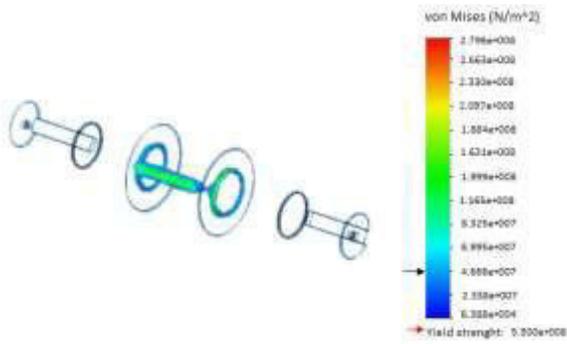


Fig. 16 Representación gráfica del progreso de las tensiones de von Mises en el rodillo superior (RS).

El factor de seguridad en esta pieza es de 1,9 como se evidencia en la figura 17, al igual que el rodillo inferior las tensiones máximas que se generan no comprometen el desempeño del rodillo, porque las cargas no alcanzan valores que causen deformaciones plásticas en el material. Las zonas más peligrosas son las se encuentran en contacto con la cinta a laminar, el cambio de sección transversal.

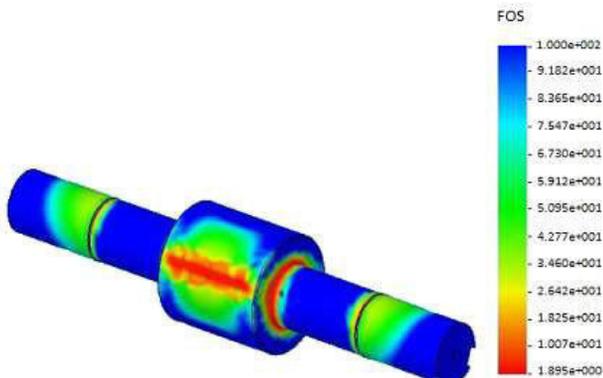


Fig. 17 Representación gráfica de la distribución del factor de seguridad en el rodillo superior (RS).

Al realizar el análisis usando el MEF las tensiones que se generan en los engranes producto al esfuerzo de contacto son de  $3,689 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ , como se muestra en la figura 18. Claramente se demuestra que la concentración de las máximas tensiones se encuentra localizada en el área de contacto (según Hertz), en las otras regiones del engrane los esfuerzos internos no son significativos.

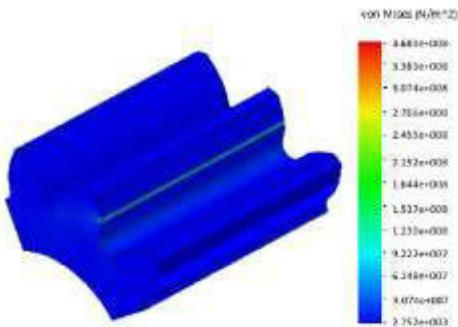


Fig. 18 Representación gráfica de las tensiones de von Mises causadas por los esfuerzos de contacto en los engranes.

El valor del factor de seguridad es de 1,925 lo que está en

concordancia con el tipo de material asignado al engrane, por lo que se puede afirmar que las cargas actuantes no deformarán permanentemente el diente del engrane durante su funcionamiento, como se puede observar en la figura 19.

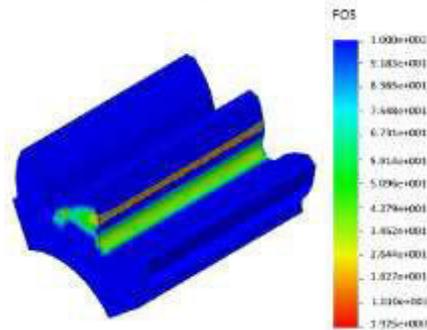


Fig. 19 Representación gráfica del factor de seguridad causado por los esfuerzos de contacto en los engranes.

Las tensiones máximas, para el esfuerzo de flexión, son de  $3,971 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ , como se evidencia en la figura 20, y se encuentran ubicadas en la base del diente, lo cual demuestra que estas tensiones quedan por debajo del límite elástico del material, por lo que la pieza en cuestión podrá cumplir con su destino de servicio.

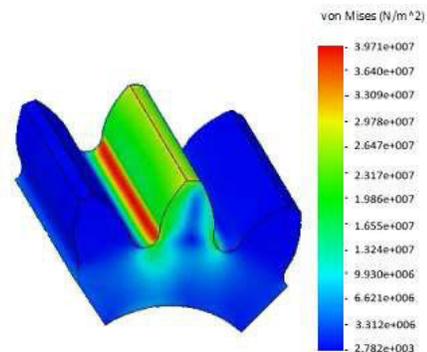


Fig. 20 Representación gráfica de las tensiones de von Mises causadas por los esfuerzos de flexión en los engranes.

El valor del factor de seguridad alcanza el valor de 11 quedando por encima de 1, esto se debe a que los esfuerzos de flexión no son los principales a los que está sometido un engrane, y por tanto se puede afirmar que las fuerzas actuantes en este estudio no deformarán plásticamente el diente del engrane durante su funcionamiento, como se observa en la figura 21.

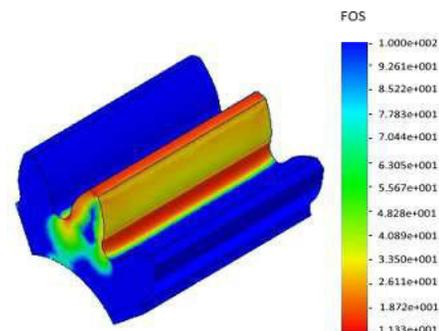


Fig. 21 Representación gráfica del factor de seguridad causado por los esfuerzos de flexión en los engranes.

#### IV. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que es posibilidad fabricar el laminador, teniendo en cuenta las condiciones de diseño, las tensiones que intervienen durante el funcionamiento, los esfuerzos máximos tanto los de contacto como los de flexión para el caso de los engranes. Se puede afirmar que los elementos presentan un factor de seguridad aceptable para el cumplimiento de su destino de servicio, por lo cual la fiabilidad de trabajo de cada una de las piezas se encuentra dentro de los valores preestablecidos.

#### REFERENCIAS

- [1] S. Kalpakjian, "Manufactura, ingeniería y tecnología", Vol. II La Habana: Ed. Félix Valera, 2010.
- [2] A. Malishev, "Tecnología de los metales", Moscú: Ed. Mir, 1987.
- [3] Robert MOTT, "Diseño de elementos de máquinas", Vol. II La Habana: Ed. Félix Valera, 2010.
- [4] X. Salueña y A. Nápoles, "Tecnología mecánica", Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 2000.
- [5] H. N. Gupta, R. C. Gupta, y A. Mittal, "Manufacturing Processes", Secon Edition ed. New Delhi New Age International (P) Ltd, 2009.
- [6] M. Groveer, "Fundamentos de la Manufactura Moderna", Naucalpan de Juárez. Estado de México: Pretince-Hall Hispanoamericana, S. A., 1997.
- [7] Matweb, "Cartridge Brass, UNS C26000 (260 Brass), OS025 Temper flat products", (Disponible en: www.matweb.com), (Consultada el, 8 de mayo 2015).
- [8] J. Carro, "Propuesta metodológica para el análisis de engranes rectos aplicando ingeniería asistida por computadora", en 10º Congreso Nacional de Mecatrónica Puerto Vallarta, Jalisco: Universidad Politécnica de Tlaxcala 2011.
- [9] J. Carro, F. Flores, e I. Flores, "Análisis de esfuerzo de contacto en engranes rectos aplicando el criterio de Hertz con ingeniería asistida por computadora", en Científica. Vol. 16 México: ESIME Instituto Politécnico Nacional México, 2012, pp. 25-32.
- [10] K.L. Nielsen, "Rolling induced size effects in elastic-viscoplastic sheet metals", European Journal of Mechanics – A/Solids, Volumen 53, September – October 2015, Pages 259-267.



**Beltrán Roberto.** Nació en Manzanillo provincia de Granma en Cuba. Es graduado de la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Holguín – Cuba en Ingeniería Mecánica en el año 2009 y cuenta con un masterado en Diseño y Manufactura Asistida por Computadoras (CAD-CAM) de la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Holguín – Cuba. Actualmente es docente del departamento de Ciencia de la Energía y

Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" en la ciudad de Latacunga Ecuador.



**Álvarez Alexis.** Nació en Bayamo provincia de Granma en Cuba. Es graduado de la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Holguín – Cuba en Ingeniería. Actualmente es docente del departamento de Ciencias Técnicas de la Universidad de Granma en la ciudad de Bayamo Cuba.



**Ramos Yoan.** Nació en Bayamo provincia de Granma en Cuba. Es graduado de la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Holguín – Cuba en Ingeniería Mecánica en el año 2008 y cuenta con un masterado en Diseño y Manufactura Asistida por Computadoras (CAD-CAM) de la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Holguín – Cuba. Actualmente es docente del departamento de Ciencias Técnicas de la

Universidad de Granma en la ciudad de Bayamo Cuba.



**Morales Yoandrys.** Nació en Manzanillo provincia de Granma en Cuba. Es graduado de la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Holguín – Cuba en Ingeniería Mecánica en el año 2007, cuenta con un masterado en Diseño y Manufactura Asistida por Computadoras (CAD-CAM) de la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Holguín – Cuba. Y además posee un Doctorado en

Ciencias relacionado con la manufactura de metales obtenido en la Universidad Politécnica de Madrid, España en el 2014. Actualmente es docente de la Unidad Académica, Ciencia de la Ingeniería y Aplicada (CIYA) de la Universidad Técnica de Cotopaxi en la ciudad de La Man – Ecuador.



**Pino Julio.** Nació en Holguín provincia de Holguín en Cuba. Es graduado de la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Holguín Cuba en Ingeniería Mecánica en el año 1993 y cuenta con un masterado en Maquinaria Agrícola en la Universidad de Holguín "Oscar Lucero Moya", Doctor en Ciencias Técnicas en la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente es docente de la Unidad Académica, Ciencia de la Ingeniería y Aplicada (CIYA) de la Universidad

Técnica de Cotopaxi en la ciudad de Latacunga – Ecuador.



**Mena Euro.** Nació en Quevedo provincia de Los Ríos en Ecuador. Es graduado de la Universidad de las Fuerzas Armadas, en Ingeniería Automotriz en el año 1997. Actualmente es docente del departamento de Ciencia de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" en la ciudad de Latacunga Ecuador.



**Terán Héctor.** Nació en New York, Estados Unidos. Es graduado Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador en el año 2008, de Ingeniero Electromecánico, y cuenta con diplomado en Redes Industriales. Máster en Gestión de Energías y en Seguridad Industrial y Riesgos del trabajo. Actualmente es docente del departamento de Ciencia de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas

Armadas "ESPE" en la ciudad de Latacunga Ecuador.