

# Simulación de laminado en frío de aceros al carbono usando ABAQUS

Luis Gerardo Díaz Samaniego

LG Electronics Monterrey México, Av. Industrias #180 Fracc. Industrial PIMSA Oriente, Apodaca, N.L., México

Carlos Augusto de la Cruz Fierro

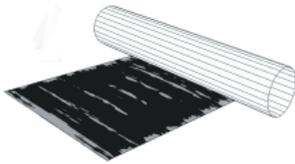
Delphi Automotive Systems, Plutarco Elías Calles #1210 Col. Fobissste Chemizal, Cd. Juárez, Chih., 32310, México,

Martha P. Guerrero Mata, Rafael Colás Ortíz

UANL-FIME, Pedro de Alba S/N, Cd. Universitaria, San Nicolás, N.L., 66450, México.

Ricardo Viramontes Brown, Carlos Javier Lizcano Zulaica

Hylsamex, Ave. Munich #101, San Nicolás, N.L., 66452, México.



## RESUMEN

*Se presenta un modelo de elemento finito para laminación en frío de cintas de acero, el cual fue desarrollado con el paquete comercial computacional ABAQUS<sup>MR</sup>. El modelo considera un comportamiento elástico-plástico del material, usando un análisis explícito. Los resultados obtenidos fueron validados con los datos recabados de un proceso industrial. Las propiedades mecánicas del material usadas para el modelo fueron tomadas de pruebas de tensión realizadas a probetas obtenidas de las diferentes reducciones. El objetivo de este trabajo es validar un modelo capaz de predecir las condiciones finales de la lámina, así como parámetros operacionales.*

## PALABRAS CLAVE

Laminación, fricción, simulación y validación, ABAQUS.

## ABSTRACT

*This work presents a finite element model for the cold rolling process of low carbon steel strip that was achieved with the commercial software Abaqus<sup>TM</sup>. The model was computed considering an elastic-plastic behaviour of the material, using the explicit module. The results obtained were validated by comparing them with those taken from an industrial process. The mechanical properties of the material used for modeling were taken from a set of tensile tests carried out on samples taken at different reductions of the cold rolling process. The aim of this work is to obtain a model able to predict the final conditions in the strip and the required operational parameters.*

## KEYWORDS

Rolling, friction, simulation and validation, ABAQUS.

## INTRODUCCIÓN

Por las actuales preocupaciones de las compañías manufactureras en economizar, es necesario conseguir una eficiencia en sus procesos, esto es difícil porque los procesos de manufactura requieren de conocimiento técnico altamente calificado, el cual suele ser obtenido a través de muchos años de experiencia, también es posible obtener tal experiencia mediante la investigación científica.

Para determinar la influencia de los parámetros del proceso de laminación y poder optimizarlo es necesario un entendimiento fundamental del proceso. Usualmente, los parámetros operacionales tales como la velocidad de rotación del rodillo, la tensión frontal y trasera y la carga aplicada son variados hasta llegar a un proceso estable y económicamente remunerado. Por otro lado, variables tales como el número de pasos de reducción, lubricación, superficie y condiciones finales del producto proveen información concerniente a la eficiencia económica del proceso.

Dicho método es largo y costoso y puede ser únicamente influenciado y acelerado por la experiencia del operador. Por lo tanto encontrar un procedimiento más rápido y menos costoso es fundamental.

El aumento en el poder de cómputo, así como el desarrollo de nuevos y poderosos algoritmos ha hecho posible que los métodos numéricos sean aplicados en tecnología de procesos de manufactura. Un ejemplo de esto es el método del elemento finito (MEF) el cual inicialmente se aplicaba sólo en problemas estructurales y ahora se ha trasladado a aplicaciones de modelado de deformación plástica.

La simulación por elemento finito podría ser usada en varias áreas de la tecnología del proceso de laminado por ejemplo para determinar las cargas mecánicas, la tensión frontal y trasera, el número de reducciones y las condiciones de forma del producto.

Lo que llevaría a un entendimiento del proceso de laminado más profundo y que podría ser usado para una optimización sistemática.

La laminación en frío de cintas es un proceso basado en deformación plástica, donde el espesor del material es reducido por fuerzas de compresión aplicadas sobre el material por dos rodillos opuestos.

Los rodillos rotan para jalar la cinta de metal y simultáneamente presionar el material entre ellos,<sup>1,2</sup> figura 1.

En este proceso la uniformidad dimensional del espesor final de la lámina es de gran importancia. En la práctica se ha mostrado que la forma final de la pieza deformada depende de la forma de la herramienta y las propiedades del material.

En el proceso son usados varios pases para obtener el espesor final deseado de la lámina, por lo que el objetivo de este trabajo es obtener un modelo del proceso que al utilizarlo reproduzca la realidad y sea posible usarlo para una posterior optimización numérica del proceso.

Para crear el modelo numérico se requiere la ecuación constitutiva del material, las relaciones constitutivas son usadas para describir el comportamiento en el cambio de resistencia observado cuando un material está siendo deformado.

Estas formulaciones son empíricas y relacionan cambios en la resistencia producida por la variación en deformación, temperatura o velocidad de deformación, las cuales son usadas para predecir las fuerzas, distorsiones, esfuerzos, etc., y que pueden ser encontradas durante el procesado de material. Por lo tanto si se quiere desarrollar un modelo numérico que prediga las condiciones de procesamiento, es necesario tener estas ecuaciones para conocer el comportamiento del material y predecir la respuesta de éste, además de ganar y profundizar en el conocimiento de aspectos fundamentales en el procesado de materiales.

Las formulaciones más comunes para describir el comportamiento de los materiales al ser deformados

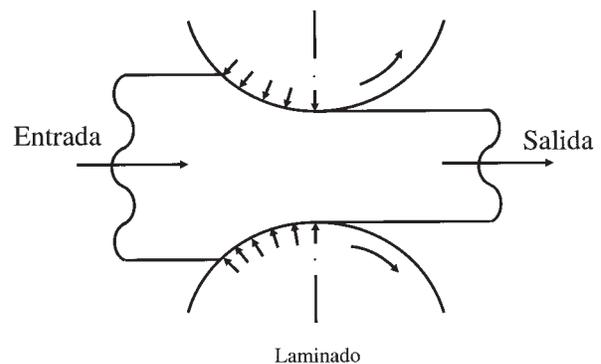


Fig. 1. Esquema del proceso de laminación.

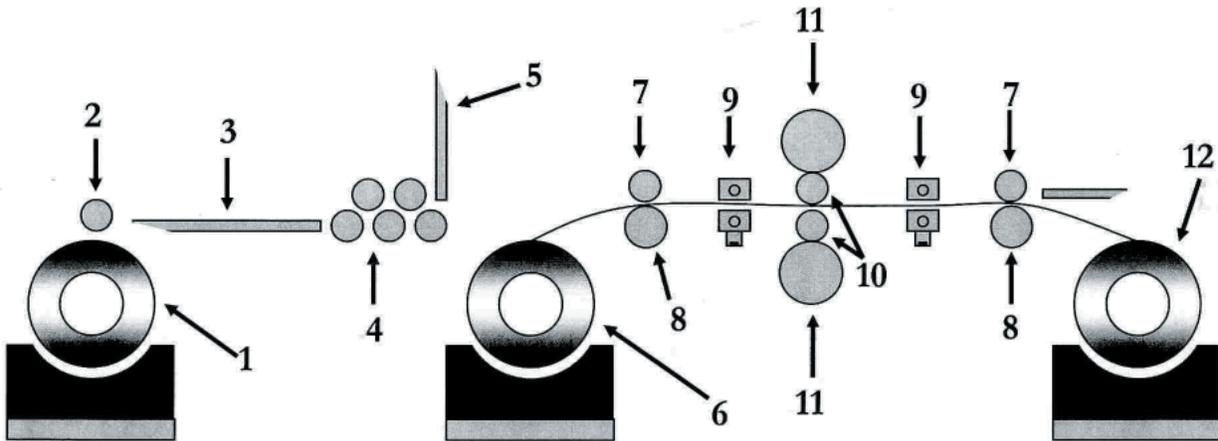


Fig. 2. Esquema<sup>6</sup> de un molino reversible: 1. Entrada, 2. Rodillo apisonador, 3. Mesa desplegada, 4. Nivelador, 5. Mesa de paso, 6. Enrollador poniente, 7. Rodillo apisonador, 8. Rodillo deflector, 9. Rayo Gamma, 10. Rodillo de trabajo, 11. Rodillo de apoyo, 12. Enrollador oriente.

son derivadas de la ley de potencia propuesta por Ludwik:<sup>3,4</sup>

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n$$

donde  $\sigma$  y  $\varepsilon$  son, respectivamente, los valores instantáneos verdaderos de esfuerzo y deformación,  $\sigma_0$  es el esfuerzo de cedencia,  $K$  el coeficiente de resistencia y  $n$  el exponente de endurecimiento por deformación.

Una mejor predicción a valores altos de deformación puede ser obtenida por medio de la ecuación exponencial propuesta por Voce:<sup>5</sup>

$$\sigma = \sigma_s - (\sigma_s - \sigma_0) \exp(-\varepsilon / c)$$

Donde  $\sigma_s$  es el esfuerzo de saturación y  $c$  es un coeficiente que se obtiene de la experimentación y que representa la forma en que envuelve la exponencial.

**PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

Las ecuaciones constitutivas del acero fueron obtenidas del acero de análisis mediante la caracterización de las propiedades mecánicas por pruebas de tensión.

Una vez seleccionado el acero las muestras fueron obtenidas del material procesado en los molinos en forma de rollitos, que quedan en la punta y cola en su procesado en un molino reversible. Uno de los

rollitos fue obtenido inmediatamente terminado el proceso de laminación ya que éste se queda en el enrollador-tensionador y el otro fue obtenido en la zona de lavado, ya que éste se queda en el rollo para trabajos posteriores, figura 2.

La lámina es fabricada de cintas de acero de bajo a medio carbono proveniente de cinta procesada mediante laminación en caliente.

El material obtenido de las puntas y colas se preparó para ser maquinado y obtener así las probetas para ensayos de tensión en la dirección de la laminación, a 45° y perpendicular a la dirección de laminación, figura 3. La obtención de las probetas se realizó bajo las recomendaciones de la norma ASTM E-8,<sup>7</sup> las dimensiones de los especímenes se muestra en la figura 4.

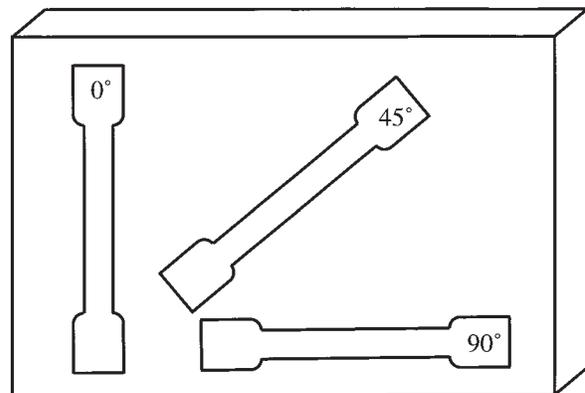


Fig. 3. Direcciones de obtención de probetas.

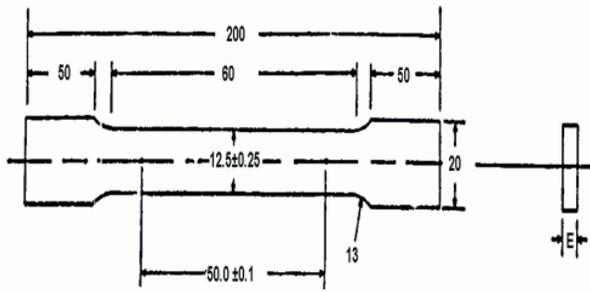


Fig. 4. Dimensiones de probetas en mm.

Los ensayos fueron realizados en una máquina universal marca INSTRON modelo 8501 a una velocidad constante del cabezal de 50 mm/min, figura 5.

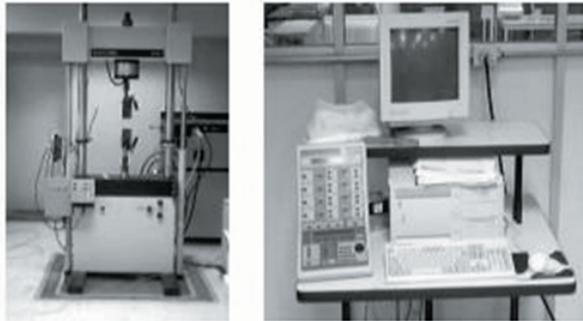


Fig. 5. Máquina universal de pruebas mecánicas marca INSTRON modelo 8501.

El resultado de las pruebas fue promediado y usado en el modelo numérico. Los valores de las diferentes reducciones fueron aproximados a una curva maestra propuesta para predecir el endurecimiento, como se muestra en la figura 6.

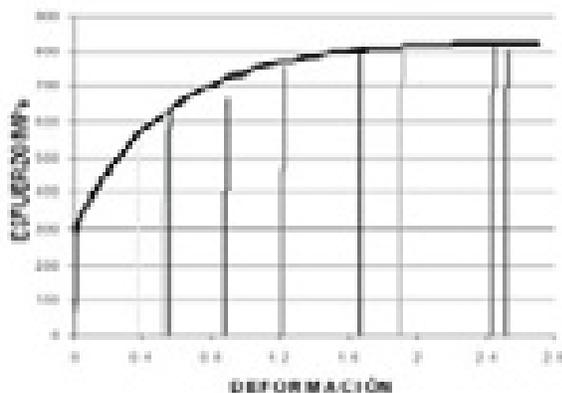


Fig. 6. Curva maestra de endurecimiento obtenido a partir de ensayos en probetas con diversos grados de deformación.

## PROCEDIMIENTO NÚMÉRICO

Para crear el modelo numérico fue utilizado el paquete computacional ABAQUS<sup>MR</sup>. El modelo fue desarrollado en tres dimensiones usando un análisis explícito, en el cual sólo la mitad de la geometría fue modelada debido a simetría. La geometría de la cinta y el rollo fueron creadas en ABAQUS/CAE, figura 7, la tabla I muestra las dimensiones de las tres reducciones que se modelaron en este trabajo.

Las condiciones a la frontera fueron impuestas de acuerdo a la información obtenida del proceso en planta. Entre las que están la tensión frontal y trasera, la velocidad de rotación del rodillo para cada reducción y la fricción, tabla II.

La tabla III muestra los valores obtenidos de la curva maestra para las tres reducciones planteadas en

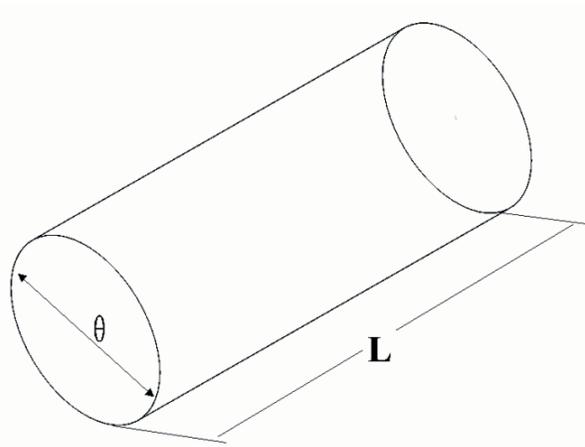
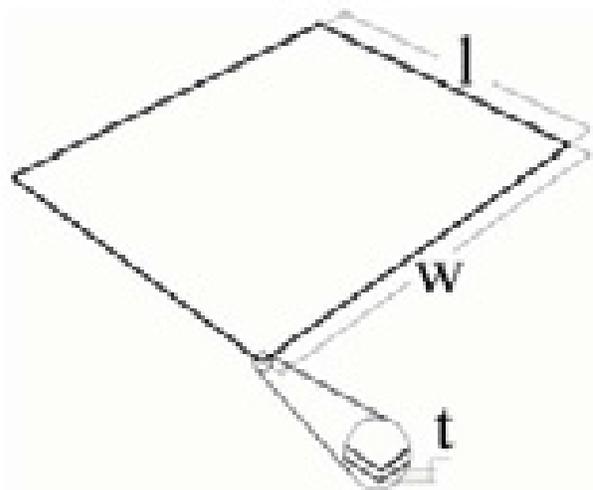


Fig. 7. Geometría de la cinta y el rodillo.

Tabla I. Dimensiones de la cinta y rodillos para las tres reducciones en el modelo numérico.

Cinta			
	Primera reducción	Segunda reducción	Tercera reducción
Longitud l (m)	0.2	0.2	0.2
Ancho w (m)	1.0033	1.0033	1.0033
Espesor t (m)	0.001016	0.0007366	0.000559
Rodillo			
Longitud L (m)	1.3033		
Diámetro $\theta$ (m)	0.40513		

Tabla II. Condiciones a la frontera impuestas al modelo.

	Primera reducción	Segunda reducción	Tercera reducción
Tensión Frontal (N)	112318	96654	103640.5
Tensión trasera (N)	133.5	88288	80322.5
Velocidad de rotación (rad/s)	23.32	29.5924	39.122
Fricción	0.08	0.08	0.08

este trabajo. Los esfuerzos, deformaciones y fuerzas de reducción fueron analizadas durante todo el proceso así como la forma de la cinta. La temperatura no fue tomada en cuenta para la realización del análisis numérico.

El tipo de elemento usado en el modelo fue el C3D8R (elemento sólido lineal de 8 nodos con integración reducida) para la cinta con una cantidad de 21000 elementos para simular un sólido deformable, mientras que el rodillo fue modelado como una superficie rígida analítica<sup>8</sup>, la Figura 8 muestra la malla para la cinta antes de la deformación. Los cambios de temperatura asociados al proceso de laminación, aunque son importantes, fueron despreciados, ya que las temperaturas que se alcanzan al laminar en frío se encuentran por debajo de los 150°C y esas temperaturas no se producen cambios estructurales en los materiales involucrados.

Tabla III. Propiedades utilizadas en el modelo.

Primera reducción		Segunda Reducción		Tercera reducción	
$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon$	$\sigma$	$\epsilon$	$\sigma$
	MPa		MPa		MPa
0.000	295	0.000	532	0.000	650
0.018	314	0.028	547	0.002	650
0.028	323	0.078	571	0.052	666
0.038	333	0.128	594	0.077	673
0.048	341	0.178	614	0.102	680
0.058	350	0.228	633	0.127	687
0.068	359	0.278	650	0.152	693
0.078	367	0.328	666	0.177	699
0.088	376	0.378	680	0.202	705
0.098	384	0.428	693	0.227	711
0.118	400	0.478	705	0.252	716
0.138	415	0.528	716	0.277	721
0.158	430	0.578	726	0.302	726
0.178	444	0.628	735	0.327	730
0.198	458	0.678	743	0.352	735
0.248	490			0.377	739
0.298	520			0.402	743
0.348	547				
0.398	571				
0.448	594				
0.498	614				
0.548	633				
0.598	650				

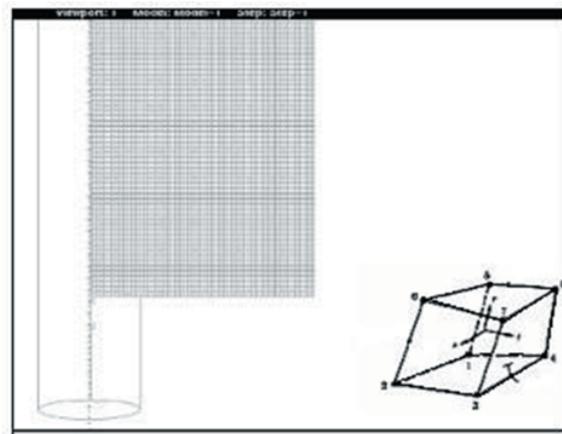


Fig. 8. Muestra el aspecto de la malla antes de la deformación, también se muestra el elemento utilizado en la modelación para la lámina.

## RESULTADOS

Se obtuvieron varias gráficas en las que se presentan los esfuerzos generados mientras se lleva a cabo el proceso de laminación, también se muestran los valores de la deformación plástica equivalente.

Las figuras 9 y 10 muestran los esfuerzos equivalentes de Von Mises para la lámina mientras que las figuras 11 y 12 presentan los valores de deformación plástica equivalente.

La tabla IV presenta los valores obtenidos de las dimensiones finales de la hoja para las tres reducciones, se presentan las dimensiones promedio así como la carga requerida para el proceso, también

se reporta el error. Aunque los resultados obtenidos para la primera reducción sobreestiman los valores reales del proceso, las subsecuentes reducciones están más cerca de los valores reales.



Fig. 9. Distribución de esfuerzos equivalentes de Von Mises sobre la lámina después de la primera reducción.

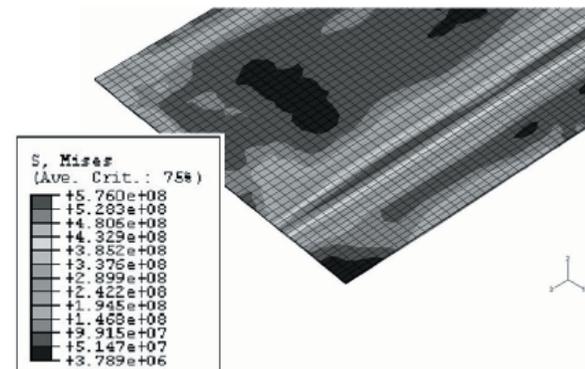


Fig. 10. Acercamiento de la distribución de esfuerzos equivalentes de Von Mises.

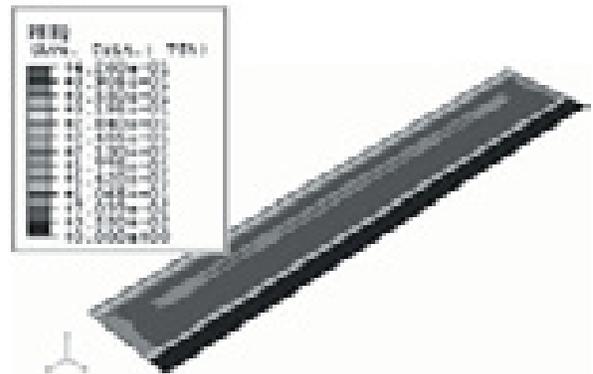


Fig. 11. Distribución de deformación plástica equivalente después de la primera reducción.

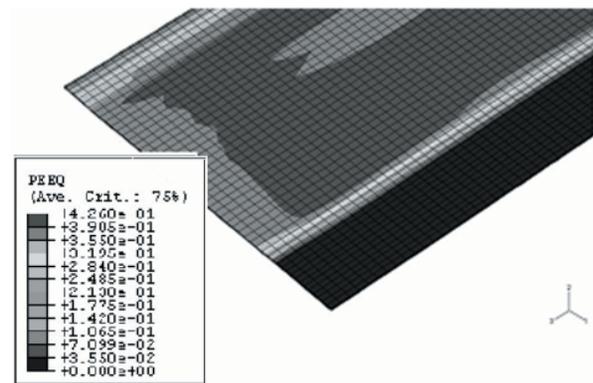


Fig. 12. Acercamiento de la distribución de deformación plástica equivalente.

Tabla IV. Resultado promedio para las tres reducciones.

	1 <sup>a</sup> Reducción	2 <sup>a</sup> Reducción	3 <sup>a</sup> Reducción
Espesor promedio(mm)	0.7455	0.5645	0.441
% error	1.209	1.029	2.1379
Ancho promedio(m)	1.0038	1.0031	1.0037
% error	0.051	-0.014	0.041

## CONCLUSIONES

Los resultados indican que es posible obtener un modelo numérico por elementos finitos que sea capaz de predecir los parámetros operacionales del proceso, los resultados obtenidos son alentadores ya que se obtuvieron porcentajes de error bajos, por lo cual los resultados están muy cercanos al proceso real. El uso del endurecimiento por deformación hace posible obtener un buen modelo del proceso de laminación y, entonces a partir de éste, predecir las cargas mecánicas, tensión frontal y trasera así como el número de reducciones requeridas para alcanzar el espesor objetivo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a CONACYT, Paicyt-UANL, FIME-UANL e Hylsamex S.A. de C.V por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

1. G.E. Dieter, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Co., Londres, 1988.
2. B. Avitzur, Metal Forming Processes and Analysis, Mc Graw-Hill, EUA 2000.
3. P. Ludwik, Elemente der Technologischen Mechanik, Springe-Verlag OHG, Berlin, 1909.
4. J.H. Hollomon, Tensil Deformation, Trans. AIME, vol. 162 1945, p 268.
5. E. Voce, J. Inst. Met. 74 537 (1948).
6. ASTM, "E 8M Standard Test Methods of Tension Testing of Metallic Materials [Metric]," Annual Book or ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 3.01.
7. Empresa Hylsamex División Molinos Planos.
8. Abaqus Explicit, User's Manual, Abaqus Inc., EUA 2000.



## EL INSTITUTO MEXICANO DE ACÚSTICA

Invita al

### 11° CONGRESO INTERNACIONAL MEXICANO DE ACÚSTICA

5, 6, 7 y 8 de Octubre de 2004

MORELIA, MICHOACAN., MEXICO

#### Instituciones colaboradoras:

Cenidet, Colegio de Ingenieros en Comunicaciones y Electrónica, Centro Nacional de Metrología, Instituto Politécnico Nacional, Tecnológico de Veracruz, Universidad Autónoma de Nuevo León, Universidad de Guadalajara, Universidad de Guanajuato, Universidad Tecnológica Vicente Pérez Rosales

**Temáticas:** Audio, Acústica Arquitectónica, Música, MIDI, Vibraciones Mecánicas, DSP, Bioacústica, Acústica Física, Ruido, Comunicaciones, Standards, Etc.

**Conferencias, Posters, Cursos, Exhibición.**

#### INFORMACIÓN

Coordinador General M.C. Sergio Beristain; [sberista@hotmail.com](mailto:sberista@hotmail.com)  
Apartado Postal 12-1022, Col. Narvarte 03001 México D. F.  
Tel. (01 55) 5682-2830, 5682-5525, Fax (01 55) 5523-4742.  
Región Norte: M.C. Fernando Elizondo Garza; [fjelizon@hotmail.com](mailto:fjelizon@hotmail.com)  
Región Occidente: Dra. Martha G. Orozco M.; [morozco@maiz.cucba.udg.mx](mailto:morozco@maiz.cucba.udg.mx)