



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**Modelado de la respuesta
mecánica de multicapas dúctiles durante el
ensayo en un tribómetro coaxial**

TESIS

Que para obtener el grado de

INGENIERO MECÁNICO

Presenta

Miguel Ángel Ramírez Toledo

Director de tesis:

Dr. Rafael Schouwenaars Franssens



México, D. F.

Enero, 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a la Facultad de Ingeniería, por el compromiso y la responsabilidad que tuvieron conmigo para que pudiera culminar esta etapa de mi vida. También a los profesores de nuestra facultad que siempre intentan dejar sus conocimientos y experiencias a través de las aulas. A la Universidad Nacional Autónoma de México, cuya labor para formar profesionistas responsables, dedicados, líderes, éticos y honestos es invaluable y realizada desde hace más de cuatrocientos cincuenta años. Agradezco al jurado de mi examen profesional por sus correcciones, opiniones y consejos que hicieron en mi tesis.

A Karla, por la inspiración que siempre me hace sentir, y por el apoyo incondicional que me brinda desde que nos conocimos.

A mis padres, quienes siempre se han preocupado por guiarme, aconsejarme y apoyarme en todo lo que he realizado. Gracias por hacerme entender que los viajes y desvelos de mi primer semestre de clases en la facultad valían la pena. Esta etapa ha sido la mejor herencia que he podido recibir.

M. A. R. T.

Índice Temático

Objetivos.	1
Capítulo 1. Introducción.	
1.1. Tribología.	
1.1.1. Fricción.	2
1.1.2. Contacto Superficial.	4
1.1.3. Desgaste.	6
1.1.4. . Lubricación.	7
1.2. Capas Multi-metálicas.	9
Capítulo 2. Descripción del Modelo.	
2.1. Módulo de parte.	11
2.1.1. Dimensiones del modelo.	12
2.2. Módulo de propiedades.	13
2.2.1. Comportamiento elástico del acero.	15
2.2.2. Comportamiento elasto-plástico de la aleación Al-Sn.	17
2.3. Módulo de ensamble.	19
2.3.1. . Proceso de ensamble de la placa.	20
2.4. Módulo de paso (step).	22
2.5. Módulo de interacción.	23
2.5.1. Tipo de contacto.	23
2.5.2. Trayectoria de aproximación.	24
2.5.3. Superficie maestra y esclava del modelo.	24
2.6. Módulo de condiciones de frontera.	25
2.6.1. Condición de empotramiento.	25
2.6.2. Condición de desplazamiento y rotación.	26
2.7. Módulo de mallado (mesh).	28

Capítulo 3. Presentación de los resultados.	
3.1. Esquema de las simulaciones.	31
3.2. Presentación de los resultados.	33
3.3. Resultados de las simulaciones.	34
3.3.1. Perno de desgaste de 4 [mm] de radio de curvatura.	35
3.3.2. Perno de desgaste de 1 [m] de radio de curvatura.	53
3.3.3. Gráficas de los resultados.	61
Discusión.	70
Conclusiones.	72
Referencias.	73

Objetivos

1. Simular la prueba de fricción y desgaste que se realiza en un tribómetro coaxial mediante ABAQUS™ a una capa multi-metálica (Aleación Al-Sn/Acero), considerando que durante su realización esta capa sufre deformaciones plásticas y que el perno de desgaste tiene una punta semiesférica.
2. Modelar el comportamiento plástico de la capa multi-metálica (Aleación Al-Sn/Acero) con ABAQUS™ cuando se utilizan pernos de desgaste de diferentes formas al del objetivo uno.
3. Analizar y predecir las condiciones mecánicas sobre la capa multi-metálica que se presentarán durante la prueba con ABAQUS™ para todos los pernos de desgaste simulados.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Tribología.

La tribología tiene sus comienzos como ciencia en el año de 1966 en Gran Bretaña. La palabra proviene de dos raíces griegas: τριβος (tribos) que significa frotar, y λόγος (logos) que quiere decir estudio. Por lo tanto, tribología se refiere al estudio del frotamiento. Se define de manera formal como la ciencia dedicada al estudio de superficies que interactúan en movimiento relativo [1].

Esta ciencia se fundamenta en otras disciplinas de la ingeniería con el fin de sistematizar el estudio. Al tener un contacto entre superficies, es necesario primero analizar la forma en que fueron producidas; es decir, el maquinado sobre estas superficies dejará en ellas un acabado superficial, específicamente una rugosidad. Es por esto que se necesita a la ingeniería mecánica en su división de manufactura para el estudio de la tribología. Cuando ambas superficies se encuentran en contacto sufrirán en su relieve deformaciones elásticas y/o plásticas, lo cual es estudiado con mayor detalle por la mecánica de materiales. La forma en que interactúan las deformaciones plásticas, fractura y estructura cristalina de las superficies es estudiada tanto por la metalurgia física como por la metalurgia mecánica, en un área difusa entre ellas [2]. La corrosión que se presenta en los metales es estudiada por la metalurgia química y es necesaria para un estudio tribológico. Finalmente, la lubricación pertenece al área de la mecánica de fluidos, la cual forma parte de la ingeniería mecánica y que también se requiere para el estudio de contacto en tribología.

La mayor aplicación que posee esta disciplina es en el diseño de cojinetes y en la manufactura, pero en general estudia cualquier caso donde un material deslice o se frote con otro, ya que se presentará un contacto complejo en la superficie [3].

1.1.1. Fricción.

La fricción se presenta donde existe un contacto entre cuerpos y se emplea de manera constante en muchas actividades que se llevan a cabo todos los días. Para caminar se requiere que exista fricción entre el suelo (pavimento, tierra, azulejo, mármol, etc.) y nuestro calzado, de otro modo no habría desplazamiento. En la industria, toda la maquinaria utilizada presenta una pérdida considerable de energía que se disipa debido a la fricción, la cual produce desgaste en las partes mecánicas de la maquinaria que se encuentran en contacto. Se requiere generalmente de una entrada de energía mecánica necesaria para en un principio vencer a la fricción y después mantener el deslizamiento de las partes en contacto. Esta energía suministrada se convierte principalmente en energía térmica o calor, la cual a su vez debe ser disipada para evitar daños en los demás componentes de la máquina. En

Estados Unidos, el 10% del consumo de aceites y lubricantes están destinados a aminorar estas pérdidas [4]. También, se ha comprobado que los cojinetes de un motor de combustión interna consumen el 3% de su energía mecánica (9% de la potencia mecánica) [5].

A lo largo de la historia se ha intentado medir la fricción entre dos cuerpos sólidos con el fin de evitar la fricción y el desgaste provocados por el contacto entre ellos. Los trabajos de Leonardo da Vinci (1452-1519) y del científico francés Guillaume Amontons (1663-1705) fueron recopilados por el físico francés Coulomb para darle vida a las leyes fundamentales de la fricción seca, en el año de 1875 [6]:

- La fricción estática puede ser mayor o igual que la fricción cinética. Esto se refiere a que la fricción estática alcanza un valor máximo donde el movimiento relativo de las superficies es inminente; cuando se alcanza este punto, comienza el deslizamiento, donde la fricción alcanza un nivel menor y se le denomina fricción cinética.
- La fricción es independiente de la velocidad de deslizamiento.
- La fuerza de fricción es proporcional a la fuerza normal a la superficie.
- La fricción es independiente del área de contacto.

La fricción se define como la resistencia al movimiento de un cuerpo sobre otro; la palabra proviene del latín *fricare*, que significa frotar. Los cuerpos pueden ser: un gas con un sólido, la cual es llamada fricción aerodinámica; o bien un líquido con un sólido, que recibe el nombre de fricción líquida; y también existe la fricción interna, debida a procesos de disipación de energía interna dentro de un cuerpo. La fricción sólida dada entre dos objetos, en particular metales, es el motivo de interés para esta tesis.

En la actualidad, se han refutado las leyes de Coulomb para numerosas condiciones de movimiento relativo entre superficies, a pesar de que siguen siendo útiles para muchas aplicaciones donde esté involucrada la fricción seca. Hoy en día, la fricción entre metales se ve influenciada por otros factores que no consideran las leyes de Coulomb. La adhesión es uno de ellos; se refiere a las fuerzas interatómicas que se presentan en dos superficies que están limpias de películas de óxido y capas superficiales. Este fenómeno se presenta con mayor fuerza en el vacío donde no existen elementos que contaminen a las superficies, lo cual incrementa de manera considerable la fricción. Sin embargo, al formarse películas de óxido en la superficie debido al medio ambiente, este fenómeno no será tan importante. La fricción por adhesión también depende de: la segregación de impurezas de una superficie a otra, el grado de compatibilidad en la estructura cristalina entre superficies, entre otras [6]. Las deformaciones mecánicas que se presentan en las asperezas de la superficie también influirán en la fricción entre metales, ya que algunas son más duras en una superficie que en la otra. Finalmente, la presencia de impurezas ajenas a las superficies influirá también en el comportamiento de la fricción durante el contacto.

1.1.2. Contacto Superficial.

La naturaleza de las fuerzas de fricción que se presentan en las superficies de dos cuerpos en contacto está determinada por otros factores además de la magnitud de dichas fuerzas: el área de contacto de las superficies y las propiedades de ambos materiales, aun cuando exista algún lubricante entre ellas. El área real de contacto superficial es a menudo mucho menor que el área aparente, debido a que ambas superficies no son suaves en sus relieves a nivel atómico. De hecho, la topografía de éstas así como su reactividad química y microestructura hacen que las superficies se consideren un área de estudio importante. Como dijo alguna vez W. Pauli: “Dios hizo a los sólidos, pero las superficies fueron hechas por el Diablo” [7]. Además, si se toman en cuenta que ambas superficies se encuentran en contacto y en movimiento relativo, el problema todavía se vuelve más complejo.

La topografía o forma geométrica de una superficie está determinada por el proceso de maquinado utilizado para su generación. Al llevar a cabo tal proceso generará imperfecciones en la superficie como crestas y valles a niveles atómicos, microscópicos e incluso a niveles comparables con las dimensiones de la pieza. En una superficie plana existirán imperfecciones tales como macrodesviaciones, ondulaciones, rugosidad y microrugosidad. Sus características son las siguientes y se muestran en la figura 1[7]:

- **Macrodesviaciones.** Son desviaciones ocasionadas por falta de precisión y exactitud en el sistema de maquinado.
- **Ondulaciones.** Estas imperfecciones se caracterizan por oscilaciones de la herramienta de corte durante el maquinado. Los picos y valles en estas oscilaciones se denominan asperezas.
- **Rugosidad.** Es la topografía de la superficie que se genera por la geometría de la herramienta de corte y su desgaste, las condiciones del maquinado, la microestructura de la pieza de corte, las vibraciones del sistema de maquinado, entre otros factores.
- **Microrugosidad.** Es una rugosidad más fina que se presenta a nivel atómico y que puede ser ocasionada por imperfecciones internas del material, deformaciones no uniformes de los granos en la superficie, procesos de oxidación y corrosión que ocurren durante la exposición de la superficie al medio ambiente, entre otros.

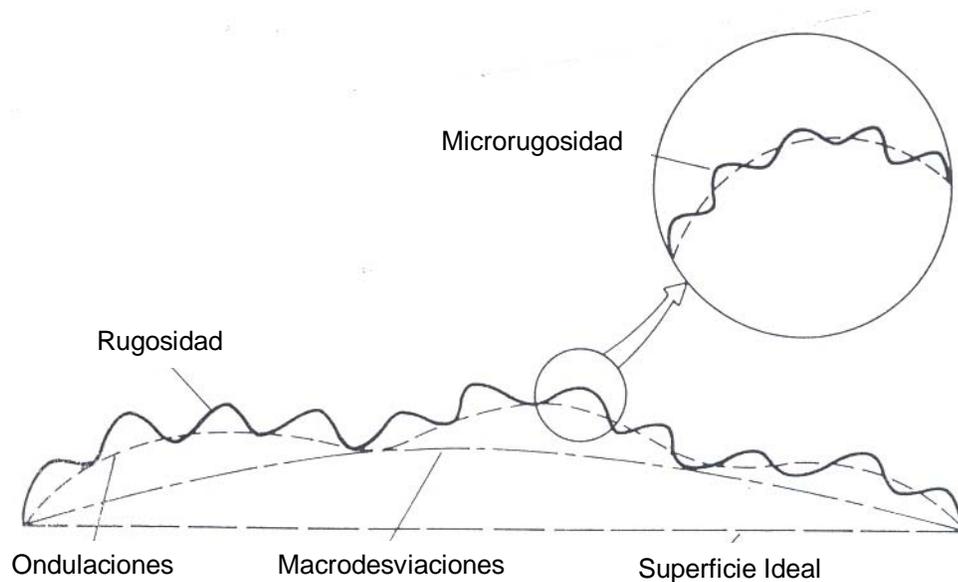


Fig. 1.1 Imperfecciones de una superficie, comparadas con una superficie ideal.

Para poder cuantificar este concepto de rugosidad, se han desarrollado algunas técnicas y equipos experimentales. Se le llama perfilómetro al instrumento capaz de medir el relieve que existe en una superficie. Algunos perfilómetros utilizan una punta de diamante microscópica que mide las variaciones verticales de la rugosidad en la superficie; sin embargo, en algunas partes del relieve la punta será muy grande como para detectar las asperezas demasiado pequeñas con esta técnica. Hoy en día se utiliza instrumentación moderna que permite evaluar el relieve de mejor manera con el perfilómetro y además se emplea alguna técnica estadística que ajuste mejor la distribución de las asperezas en la superficie. En Estados Unidos se utiliza mucho la norma ASME Y14.5M -1996[8] para la notación de algunos conceptos referentes al acabado superficial como rugosidad y ondulaciones en planos de construcción y diseño.

Las superficies en contacto también interactúan con el medio en el cual están inmersas, por lo que se tienen diversos procesos químicos cuando esto ocurre (figura 1.2):

- a) **Segregación.** Ocurre cuando existen elementos aleantes en el medio que se segregan a los límites de grano. Por lo tanto, la fricción dependerá de cuanta segregación se dé en una superficie, ya que influye mucho en sus propiedades mecánicas, la adhesión con otro material, la formación de una capa de óxido, etc.
- b) **Reconstrucción.** Este evento ocurre en la última capa de átomos, y consiste en una modificación de la estructura cristalina de la capa producida por el medio.

- c) **Adsorción química.** Ocurre cuando una superficie limpia entra en contacto con algunos elementos como moléculas de agua del medio ambiente o del lubricante utilizado durante su manufactura; incluso las especies adsorbidas puede ser sales que provengan del contacto humano por parte del operador.
- d) **Formación de compuestos químicos.** Este proceso crea una capa delgada de óxido o hidróxido debido a reacciones con la humedad del ambiente. Cuando entra en contacto con otra superficie, éstas se adhieren en puntos localizados que alcanzan temperaturas altas por la fricción.

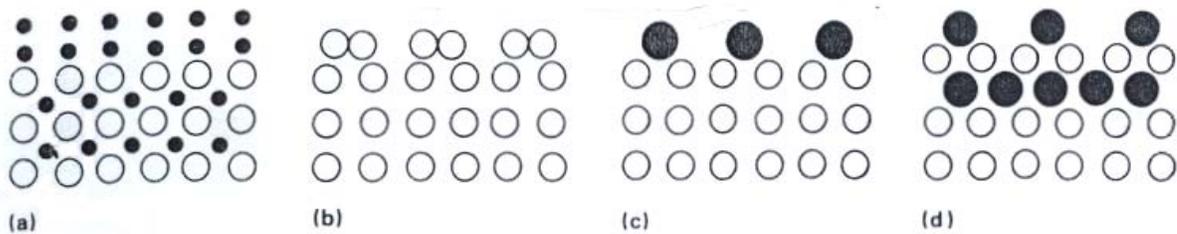


Fig. 1.2. Defectos ocasionados en una superficie por compuestos en el medio.

1.1.3. Desgaste.

El desgaste es una consecuencia de la fricción e implica una pérdida de material de una o ambas superficies en contacto que se encuentran en movimiento relativo. De acuerdo a la ASTM, se define como el daño en una superficie sólida que generalmente involucra una pérdida progresiva de material debido al movimiento relativo entre esta superficie y una sustancia o sustancias [9]. Este movimiento relativo puede ser por deslizamiento, rodamiento e impacto. Se puede manifestar de varias formas: fractura por cortante, extrusión de material en la superficie, formación de viruta, rasgadura en polímeros, fractura frágil en cerámicos, fractura por fatiga, por disolución o difusión y por la interacción entre la corrosión y fractura [10].

El desgaste no es una propiedad del material, sino una respuesta al sistema en contacto que involucra los procesos de adhesión, abrasión, fatiga superficial y deformación plástica acumulada [2]. Aun cuando no exista contacto, el desgaste puede presentarse debido a la corrosión y la degradación de los materiales.

Hoy en día se requiere de un monitoreo del desgaste con el fin de prevenir y evitar este fenómeno en cualquier maquinaria. El desgaste siempre se presentará sin importar cuanto mantenimiento se le realice a una máquina. El mantenimiento preventivo se encarga únicamente de prolongar la vida útil de la maquinaria para que su rendimiento sea mayor y no se produzcan paros repentinos en la producción por defectos que se presentan durante su operación.

1.1.4. Lubricación.

Los lubricantes líquidos convencionales han ido evolucionando a través del tiempo. Las grasas animales y vegetales son un ejemplo histórico que se han utilizado desde siempre. Como se ha mencionado, su principal función es la de aminorar el desgaste que se produce durante el contacto entre dos superficies. Sin embargo, su selección depende de otros factores que se mencionan aquí de manera breve [11]:

Para aminorar el desgaste por abrasión e impacto durante la operación de una máquina, se han utilizado materiales tribológicos que funcionan como lubricantes en la zona de contacto. Para seleccionar dicho lubricante, se necesita conocer el ambiente de trabajo en el cual estará presente el contacto (temperatura, medio químico reactivo, vacío, etc.). Una manera de clasificar a los lubricantes es mediante su estado; es decir, estado sólido o líquido. Por lo tanto, el uso de un lubricante sólido o líquido dependerá también de las condiciones del contacto y operación a las que estará sujeto.

- a) **Condiciones del ambiente de trabajo.** Generalmente en esta parte se considera el rango de temperatura al cual estará sujeto el lubricante durante el contacto, así como la atmósfera de trabajo como algún medio reactivo (H_2 , N_2 , medio químico reactivo, vacío, atmósfera, etc.). Mientras el lubricante líquido se encuentre más aislado de impurezas e inerte de la atmósfera de trabajo, mejor será su desempeño. También el lubricante líquido puede funcionar como refrigerante y así ayudar a mantener la temperatura del contacto en niveles adecuados.
- b) **Viscosidad y capa lubricante.** La viscosidad del fluido lubricante es una propiedad física muy importante a considerar porque permite acotar los niveles adecuados de su operación. La temperatura de operación mínima del lubricante será aquella donde la viscosidad es máxima y todavía se puede recircular a través de la zona de contacto adecuadamente; mientras que la temperatura de operación máxima será aquella donde la viscosidad del lubricante es mínima y la capa lubricante formada entre las superficies es adecuada para aminorar el desgaste. Además, la relación entre la presión y la viscosidad es una consideración importante que debe tomarse en cuenta. Aquí se debe considerar que se presentan dos condiciones durante la lubricación líquida en un contacto: la formación de una capa lubricante y la frontera de lubricación. La condición ideal es tener siempre una capa lubricante ya que el desgaste se aminoraría enormemente. Sin embargo, la condición de frontera de lubricación no puede ser evitada porque se presenta durante la operación un contacto directo entre superficies, a pesar de la presencia del lubricante. Por lo tanto, para seleccionar un lubricante, es necesario considerar el ancho de la capa lubricante y sus propiedades físicas.

- c) **Rendimiento de la frontera de lubricación.** A menudo el contacto de dos superficies metálicas se ve beneficiado en esta condición. La razón está en que cuando las superficies entran en contacto, las asperezas de ambas superficies se desprenden, y las superficies expuestas reaccionan con el lubricante para formar capas delgadas protectoras que disminuyen el desgaste. Para ayudar a la formación de estas capas se le añaden aditivos anti-desgaste al lubricante.
- d) **Estabilidad del lubricante.** Se refiere al grado de exposición del lubricante a su medio de trabajo sin verse afectado en su rendimiento. Hay tres tipos de estabilidad: térmica, óxido-térmica e hidrolítica. El medio en el cual está inmerso el contacto define que tipo de estabilidad debe considerarse o bien cual es despreciable para la aplicación.
- e) **Resistencia al fuego.** La resistencia al fuego debe considerarse porque hay muchos lubricantes líquidos resistentes y otros no lo son, por lo que este rango de flamabilidad es muy amplio. Esta resistencia se vuelve importante en aplicaciones hidráulicas donde se requiere de una lubricación líquida y de altas presiones, lo cual podría generar una probable ignición del lubricante.
- f) **Compatibilidad.** Esta propiedad de los lubricantes líquidos explica que es importante que sean compatibles con todos los materiales involucrados en el contacto. Es decir, que el lubricante se mantenga inerte ante la presencia de las superficies, además de que no reaccione cuando tenga que sustituir a un lubricante ya usado en la zona de contacto.
- g) **Biodegradación y toxicidad.** Estas propiedades están relacionadas porque ambas están involucradas con el ambiente de trabajo. Un lubricante biodegradable es más amigable con el ambiente, con lo cual se evita la contaminación del agua en los mantos acuíferos. Por otra parte, el grado de toxicidad de un lubricante es importante para la salud del usuario que esté trabajando con él; por esta razón define el grado de protección que se debe de usar mientras se encuentre trabajando cerca del lubricante.
- h) **Susceptibilidad a los aditivos.** La mayoría de los lubricantes líquidos son reforzados con aditivos que aumentan algunas de sus propiedades físicas y químicas. Algunos de estos aditivos son típicamente inhibidores de oxidación, lubricantes, anticorrosión, entre otros. La susceptibilidad de un lubricante se refiere a cuan solubles son los aditivos de éste en su componente principal.

1.2. Capas Multimetálicas.

El propósito de las capas multimetálicas es mejorar alguna propiedad mecánica de un metal agregando otro. Generalmente estas propiedades mecánicas incluyen resistencia a la fricción, alta dureza, alta resistencia al desgaste y corrosión, etc. El tamaño de estas capas puede ser desde nanómetros hasta algunas micras. Pueden estar constituidas por varias capas metálicas adheridas una con otra a través de un proceso de laminación; o bien para nano-multicapas metálicas con un proceso más avanzado de depósito en la superficie.

En la aeronáutica el titanio es un material muy utilizado por su baja densidad y excelentes propiedades mecánicas. Sin embargo, sus propiedades tribológicas resultan ser pobres. Se ha encontrado que capas metálicas de carburo de silicio amorfo adheridas a piezas de titanio aumentan su resistencia a la fricción [12]. En herramientas de acero utilizadas bajo condiciones severas de maquinado (sin lubricación y altas velocidades de corte), se ha observado que las nano-multicapas metálicas de TiAlCrN/NbN aumentan su vida útil y elevan sus propiedades mecánicas [13]. La fricción y el desgaste durante la operación de la herramienta disminuyen por la formación de tribo-óxidos sobre la nano-multicapa, los cuales sirven como lubricante en la zona de corte y disipan energía.

Las capas multimetálicas anteriores están formadas por aleaciones muy duras que tienen como propósito aumentar la resistencia mecánica, así como la disminución de la fricción y el desgaste. Sin embargo, en los cojinetes de deslizamiento también se tienen capas multimetálicas formadas con aleaciones blandas que minimizan solamente la fricción y el desgaste. Estas aleaciones blandas tribológicas han sido desarrolladas desde la primera mitad del siglo XX, antes de que la teoría de las dislocaciones y la microscopía electrónica tuvieran una participación importante en la metalurgia.

Los babbitts son el ejemplo más antiguo y se basan en el sistema binario plomo-estaño, el cual forma un eutéctico simple y tiene una solubilidad limitada de ambos elementos en el otro [3]. Esta fue la primera aleación blanda tribológica que se diseñó en 1839 por Isaac Babbitt [14]. Sus ventajas son la conformabilidad, incrustabilidad y compatibilidad. Pero al estar formados por aleaciones blandas, se tiene una resistencia mecánica baja y son muy sensibles a la fatiga. Es por lo anterior que los babbitts tienen una muy limitada aplicación en los cojinetes empleados para los motores de combustión interna, debido a las altas cargas cíclicas involucradas.

Las aleaciones típicas que forman a los babbitts son a base de plomo y estaño, además de poseer otros elementos que le brindan mejores características. De acuerdo a la SAE, la tabla 1.1 muestra un esquema de las especificaciones que deben tener los babbitts en su composición:

Tabla 1.1. Composiciones de los babbits [15].

Elemento	Babbits a base de estaño		Babbits a base de plomo		
	SAE 11	SAE 12 (ASTM 2) Composición, ^a %	SAE 13	SAE 14 (ASTM 7)	SAE 15 (ASTM 15)
Estaño	86.0 min.	88.25 min.	5.0-7.0	9.25-10.75	0.9-1.25
Antimonio	6.0-7.5	7.0-8.0	9.0-11.0	14.0-16.0	14.0-15.5
Plomo	0.50	0.50	El resto	El resto	El resto
Cobre	5.0-6.5	3.0-4.0	0.50	0.50	0.50
Hierro	0.08	0.08	-	-	-
Arsénico	0.10	0.10	0.25	0.60	0.80-1.20
Bismuto	0.08	0.09	0.10	0.10	0.10
Zinc	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Aluminio	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
Cadmio	-	-	0.05	0.05	0.02
Otros, total	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

Además de las aleaciones utilizadas en los babbits, se encuentran también otras aleaciones blandas hechas a base de aluminio utilizadas también en los cojinetes. Estas aleaciones de aluminio proporcionan una mayor resistencia a la fatiga, a la corrosión, al desgaste y permiten una mayor temperatura de operación. En los cojinetes de deslizamiento generalmente se emplea un cuerpo de acero que le brinda mayor resistencia. Al tener este cuerpo, las aleaciones de aluminio muestran una mayor compatibilidad con el acero que la que se tiene con los babbits; esto quiere decir que la unión entre las capas multimetálicas del cojinete de deslizamiento será mejor cuando se empleen aleaciones de aluminio y acero. Aun cuando la unión entre el cuerpo de acero y los babbits sea de menor compatibilidad, las aleaciones blandas a base de aluminio no son mejores comparadas con los babbits en incrustabilidad.

Capítulo 2

Descripción del modelo

En este capítulo se explicarán las consideraciones que se utilizaron para el modelo de elemento finito. El programa de elemento finito utilizado es ABAQUS ®. Este programa facilita la creación del modelo porque está dividido en módulos, los cuales permiten definir aspectos como inercia, geometría, contacto entre superficies, mallado y otras opciones más. Por lo tanto, la descripción del modelo de esta tesis será a través de cada uno de estos módulos del programa.

2.1. Módulo de parte.

Este módulo hace referencia a la geometría del modelo. Aquí es donde se definen las dimensiones de todos los objetos involucrados durante el modelado. El modelo proviene de la prueba experimental que se realiza en un tribómetro coaxial. Un tribómetro es el nombre general que se le asigna a una máquina o prototipo utilizado para llevar a cabo pruebas y simulaciones de fricción, desgaste y lubricación los cuales son objetos de estudio para la tribología [16]. En este caso, se le llama coaxial porque posee dos pernos de desgaste en la flecha que hace girar el motor de la máquina por lo que el eje del perno y el eje de rotación coinciden, contrario al ensayo perno sobre disco, donde el perno es excéntrico (Figura 2.1).

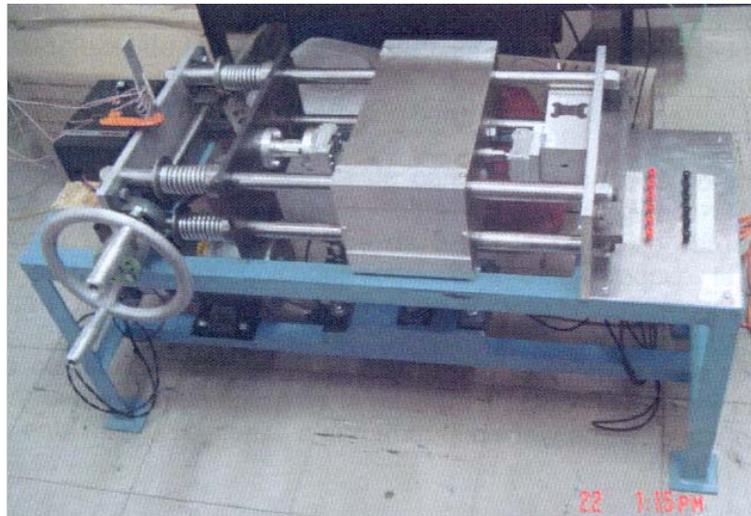


Fig. 2.1. Fotografía del tribómetro coaxial [17].

Sin embargo, para esta tesis donde se está simulando un contacto entre superficies, sólo es importante una parte de toda la máquina, la cual está relacionada con los pernos de desgaste y el porta-muestras donde se coloca a la multicapa metálica (Figuras 2.2 y 2.3).

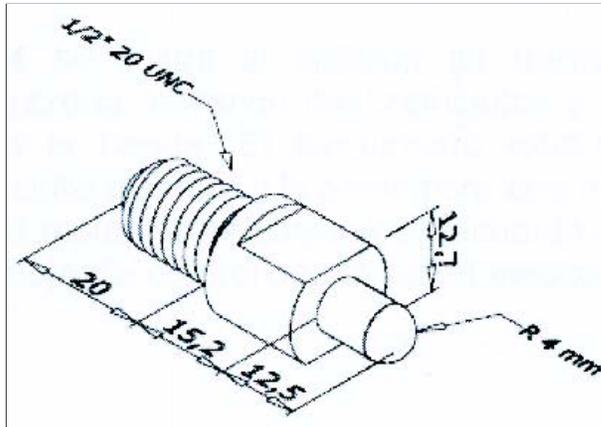


Fig. 2.2. Perno de desgaste semiesférico.

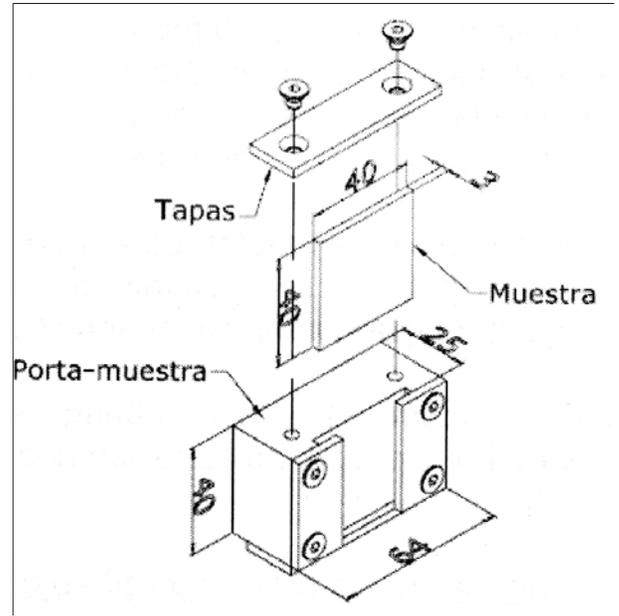


Fig.2.3. Sistema porta-muestra.

2.1.1. Dimensiones del modelo.

Se consideraron dos pernos de desgaste: uno semiesférico de 4 mm de radio de curvatura (el cual ya está fabricado) y un perno semiesférico de 1 m de radio de curvatura que todavía no se manufactura. Los pernos de desgaste fueron simulados para la paquetería como superficies rígidas de tres dimensiones, ya que en la prueba se requiere que éstos no sufran ningún tipo de deformación, sino que la placa multi-metálica sea la que se deforme (figuras 2.5 y 2.6).

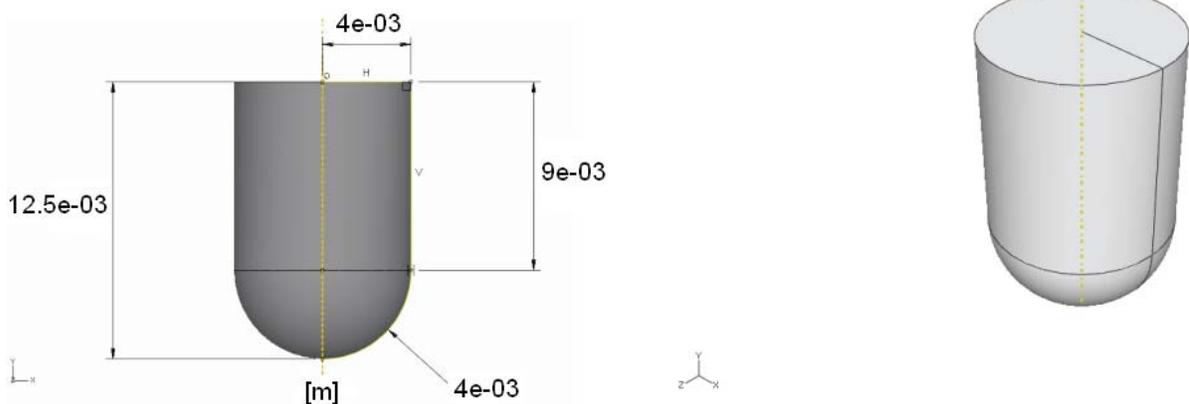


Fig. 2.5. Perno de desgaste de 4 mm de radio de curvatura: perfil y superficie final.

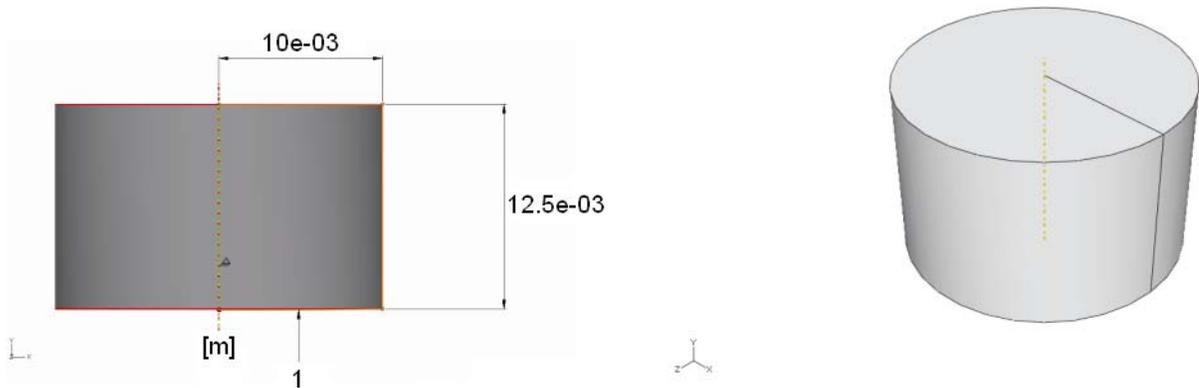


Fig. 2.6. Perno de desgaste de 1 m de radio de curvatura: perfil y superficie final.

Aunque a simple vista los pernos parecen cuerpos sólidos, no debe olvidarse que en realidad no lo son porque no necesita definirse la densidad del material de los pernos, así como la inercia que puedan presentar durante la prueba experimental. Por otra parte, la placa multi-metálica está dividida en dos secciones. La sección superior representa a la capa hecha de una aleación aluminio-estaño (Al-Sn); mientras que la parte inferior se refiere al cuerpo o base de acero. Para los modelos propuestos, se ocuparán dos espesores para la placa de aleación aluminio estaño: 180 $[\mu\text{m}]$ y 240 $[\mu\text{m}]$, por lo que el espesor de la base de acero estará sujeto al valor del espesor de la aleación en cada modelo. Empero, en todos ellos el espesor total de la placa multi-metálica será de 2 $[\text{mm}]$. La figura 2.7 muestra esta placa multi-metálica:



Fig. 2.7. Placa multi-metálica y sus dos secciones.

2.2. Módulo de propiedades.

Aquí se definieron las propiedades de los materiales que se utilizaron en el modelo. Como ya se mencionó, los pernos fueron modelados como superficies analíticamente rígidas; esto significa que no se les asigna ningún material. Sin embargo, la placa multi-metálica si lo hace, y está compuesta de dos materiales diferentes: una

aleación de Al-Sn y un acero AISI 1008 (se desprecia una pequeña capa de aluminio que sirve para permitir la unión entre ambas aleaciones). Estas placas multi-metálicas de aleación Al-Sn y Acero se utilizan como cojinetes de deslizamiento para motores de combustión interna. A continuación se muestra una metalografía de una capa multi-metálica de aleación Al-Sn (figura 2.8).

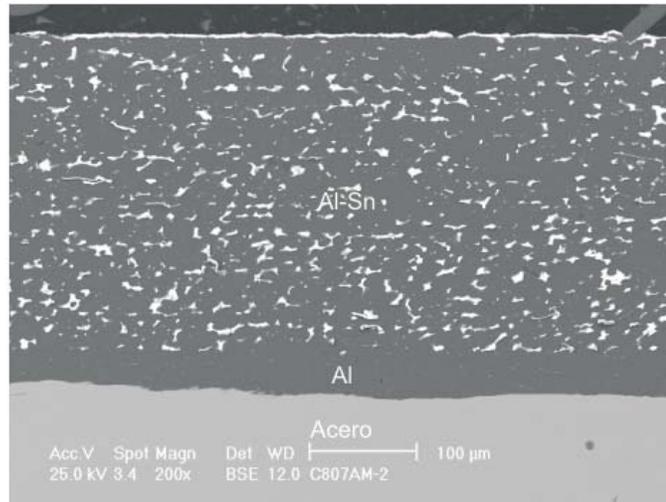


Fig. 2.8. Metalografía de la microestructura de una aleación Al 20%-Sn. Se observan tres capas diferentes que conforman a la placa[18].

Se observa en la metalografía que la placa multi-metálica consiste de tres capas. La capa en medio de la aleación Al-Sn y el acero es una delgada capa de aluminio puro. Para la simulación se puede omitir puesto que su espesor es pequeño (aproximadamente de 30 [µm]), además de que su resistencia mecánica es similar a la del Al-Sn. Esta omisión de la placa pura de aluminio también se ha hecho en otros trabajos de simulación por elementos finitos [19].

Dentro del módulo de propiedades existen una gran cantidad de opciones que simulan un rango muy vasto de materiales metálicos, cerámicos, poliméricos y compuestos. Utilizan como marco teórico modelos matemáticos y físicos, de los cuales el usuario tiene que definir sus parámetros más representativos en el programa, que generalmente son experimentales, para poder modelar el material adecuadamente. Al entrar en contacto la placa multi-metálica con otra superficie más dura, se han observado diversos fenómenos que le ocurren a la capa de la aleación provocados por microesfuerzos localizados (ya que el contacto a nivel microscópico se da de manera localizada). La formación de fases metaestables y su orientación en la placa multi-metálica debido a un mezclado mecánico es uno de ellos [20]. Por esta razón es que la capa de Al-Sn se modeló como un material elasto-plástico, ya que el perno de desgaste gira a una velocidad angular e indenta a la placa con una fuerza. En el módulo de condiciones de frontera se hablará más al respecto.

2.2.1. Comportamiento elástico del acero.

Para todos los modelos no fue necesario modelar a la placa de acero como un material elasto-plástico. Se consideró que esta placa se comporte como un sólido elástico, homogéneo, lineal e isotrópico. Esto quiere decir que las deformaciones que se presenten serán totalmente recuperables y que el sólido puede volver a su forma original; el acero tendrá propiedades idénticas en todos sus puntos; siempre habrá una relación uno a uno entre el estado de esfuerzos y el estado de las deformaciones para una temperatura dada; además de que las propiedades a través de todas las direcciones del sólido serán iguales. En esta teoría no se incluye fluencia a carga constante o relajación de esfuerzos a deformaciones constantes, además de despreciar la variación de las constantes elásticas y en el estado de esfuerzos debido a la temperatura.

La descripción del comportamiento macroscópico a través del comportamiento interno del material se realiza con las ecuaciones constitutivas elásticas clásicas, o ley generalizada de Hooke, en Abaqus®. Esta ley se representa a través de nueve ecuaciones que expresan las componentes del esfuerzo como funciones homogéneas lineales de las nueve componentes para la deformación, siempre que se tomen como variables de campo constitutivas del estado natural del material al tensor de deformaciones finitas Lagrangiano (E) y al segundo tensor de esfuerzos Piola-Kirchhoff (\tilde{T}).

$$\tilde{T}_{IJ} = c_{IJKS} E_{RS} \quad (2.2.1)$$

Cuando los gradientes del desplazamiento son pequeños en todas las direcciones (no sólo deformaciones pequeñas, sino también rotaciones pequeñas) comparados con la unidad, entonces no habrá diferencia entre la posición inicial (X_I) y la posición espacial deformada (x_i) para la misma partícula del cuerpo. Por lo anterior es que la ley de Hooke puede expresarse con bastante exactitud como:

$$T_{ij} = c_{ijrs} E_{rs} \quad (2.2.2)$$

Donde T_{ij} es el tensor de esfuerzos de Cauchy, E_{rs} el tensor de deformaciones pequeñas y c_{ijrs} un tensor de cuarto orden. Las nueve ecuaciones (2.2.2) contienen 81 constantes, pero al ser tensores simétricos T_{ij} y E_{rs} , se concluye que c_{ijrs} debe ser un tensor simétrico de cuarto orden por tener sólo seis ecuaciones independientes, lo cual da por resultado una reducción de 81 a 36 constantes elásticas.

Al realizar la siguiente enumeración:

$$\begin{array}{cccccc}
 T_1 = T_{11} & T_2 = T_{22} & T_3 = T_{33} & T_4 = T_{23} & T_5 = T_{31} & T_6 = T_{12} \\
 E_1 = E_{11} & E_2 = E_{22} & E_3 = E_{33} & E_4 = 2E_{23} & E_5 = 2E_{31} & E_6 = 2E_{12}
 \end{array} \tag{2.2.3}$$

En forma matricial, se tiene lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{56} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \\ 2E_{23} \\ 2E_{31} \\ 2E_{12} \end{bmatrix} \tag{2.2.4}$$

Como se despreciaron los efectos térmicos, y si se supone la existencia de una función potencial elástica (W), se puede demostrar [21] que la ley generalizada de Hooke que utiliza la matriz de esfuerzos de Cauchy y la matriz de deformaciones pequeñas toma la siguiente forma.

$$\begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & c_{15} & c_{16} \\ c_{12} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & c_{25} & c_{26} \\ c_{13} & c_{23} & c_{33} & c_{34} & c_{35} & c_{36} \\ c_{14} & c_{24} & c_{34} & c_{44} & c_{45} & c_{46} \\ c_{15} & c_{25} & c_{35} & c_{45} & c_{55} & c_{56} \\ c_{16} & c_{26} & c_{36} & c_{46} & c_{56} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \\ 2E_{23} \\ 2E_{31} \\ 2E_{12} \end{bmatrix} \tag{2.2.5}$$

Esto quiere decir que la matriz c reduce su número de constantes elásticas independientes de 36 a 21.

Cuando las constantes elásticas en un punto dado muestran los mismos valores para cada par de sistemas coordenados los cuales son imágenes espejo uno a otro en un cierto plano, se le llama plano de simetría elástica para el material en ese punto. Esto

quiere decir que existe una simetría direccional en el punto del plano. Para un material isotrópico como el que se utilizó, las 21 constantes elásticas se reducirán a sólo 2 constantes independientes de la orientación del sistema coordenado; esto quiere decir que cualquier plano que pase a través de un punto del material será un plano de simetría elástica. En forma matricial, esto se representa como:

$$\begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ T_{23} \\ T_{31} \\ T_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \\ 2E_{23} \\ 2E_{31} \\ 2E_{12} \end{bmatrix} \quad (2.2.6)$$

Donde las constantes λ y μ son las constantes de Lamé introducidas en 1852. Se pueden expresar en términos del módulo de Young E , módulo cortante G y la relación de Poisson como:

$$\mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \text{ y } \lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (2.2.7)$$

Por lo tanto, el programa solamente requiere que se definan el módulo de Young y la relación de Poisson para el material utilizado. Para el acero se utilizaron los siguientes valores (Tabla 2.1).

Tabla 2.1. Propiedades elásticas para el acero AISI 1008

Acero AISI 1008	
Módulo de Young	Relación de Poisson
200 [GPa]	0.29

2.2.2. Comportamiento elasto-plástico de la aleación Al-Sn.

El modelo plástico clásico en metales fue la opción que se utilizó para modelar la aleación Al-Sn y que no necesita programarse puesto que está disponible en ABAQUS®. El flujo plástico de la capa está asociado con superficies de Von Mises, las cuales brindan un endurecimiento isotrópico en el material. Las superficies de Von Mises suponen que la cedencia del material es independiente del esfuerzo

hidrostático, puesto que solamente produce energía elástica cuando cambia el volumen de un material isotrópico. Para la teoría de la plasticidad utilizada, se desprecia la deformación inelástica que se produce en un metal si se tiene una variación considerable en su temperatura; se omite el comportamiento de histéresis el cual muestra dependencia en la trayectoria de carga empleada en el metal; el efecto Bauschinger también es despreciado, el cual muestra que el límite de cedencia posee una dependencia en el tipo de trayectoria de carga así como en su dirección. Por lo tanto, al despreciar este efecto se concluye que el límite de cedencia para un metal será el mismo si se somete a una tracción o a una compresión.

El punto de cedencia para la aleación Al-Sn recocida 10 minutos se encuentra en 89.3 [MPa], mientras que para la aleación Al-Sn recocida 30 minutos está en 40.7 [MPa]. A partir de estos puntos se seleccionaron treinta puntos, cada uno separado por cinco y consecutivos en ambos casos hasta la carga máxima a la cual la probeta empieza a formar una reducción considerable en su área transversal (estricción). Los datos experimentales provienen de una curva esfuerzo-deformación ingenieril para cada aleación. Sin embargo, estas curvas no representan adecuadamente a la deformación que se produce en la probeta experimental, puesto que sus dimensiones cambian continuamente durante la prueba. Por lo tanto, se requieren convertir los valores de esfuerzos y deformaciones ingenieriles a reales en el rango especificado para poder utilizarlos en Abaqus®. Es decir:

$$\sigma_{real} = \sigma_{ing} (\varepsilon_{ing} + 1) \quad (2.2.8)$$

$$\varepsilon_{real} = \ln(\varepsilon_{ing} + 1) \quad (2.2.9)$$

Con el fin de ahorrar espacio en esta sección, no se van a colocar las tablas de esfuerzos y deformaciones reales correspondientes a cada tipo de aleación, sino el modelo clásico de plasticidad (ley de potencia de Ludwik [22]) para ambas aleaciones al ajustar todos los datos seleccionados en el rango mencionado:

$$\sigma = C\varepsilon^n \quad (2.2.10)$$

Tabla 2.2. Ley de potencias de Ludwik para las aleaciones utilizadas.

Aleación Al-Sn con 10 min. Recocido	Aleación Al-Sn con 30 min. Recocido
$\sigma = 255.3\varepsilon^{0.163} [MPa]$	$\sigma = 212.7\varepsilon^{0.251} [MPa]$

La ecuación (2.2.10) a menudo la llaman curva de flujo porque muestra el esfuerzo requerido para provocar en el metal un flujo plástico a una deformación dada. La validez de esta ecuación se restringe solamente desde el inicio de la deformación plástica hasta la carga necesaria para que comience el inicio de la formación del

cuello en la probeta. A continuación, se muestran en rojo las curvas ingenieriles experimentales que se utilizaron en las aleaciones Al-Sn (Figura 2.9).

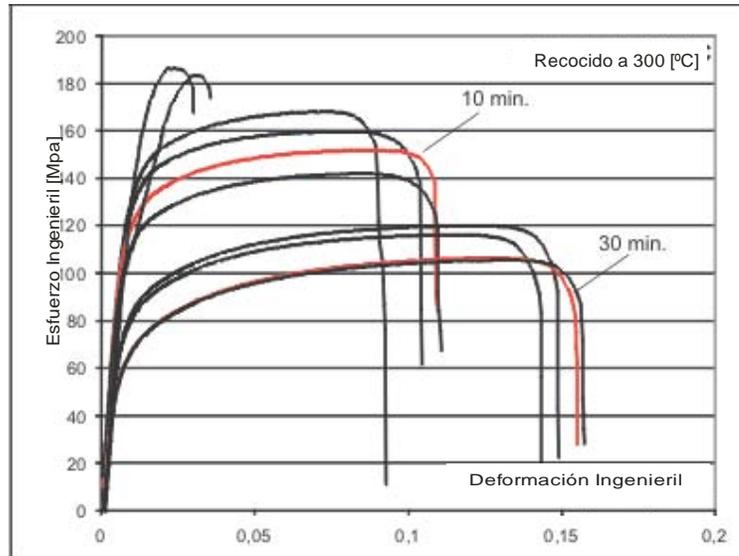


Fig. 2.9. Curvas esfuerzo ingenieril vs Deformación ingenieril para la aleación Al-Sn.

Las constantes elásticas para ambas aleaciones Al-Sn son las mismas, además de que también se consideraron lineales e isotrópicas. Esta parte es independiente del tiempo de recocido. De modo que se utilizaron los siguientes valores para el módulo de Young y la relación de Poisson.

Tabla 2.3. Propiedades elásticas para las aleaciones Al-Sn.

Aleaciones Al-Sn	
Módulo de Young	Relación de Poisson
70 [GPa]	0.33

2.3. Módulo de ensamble.

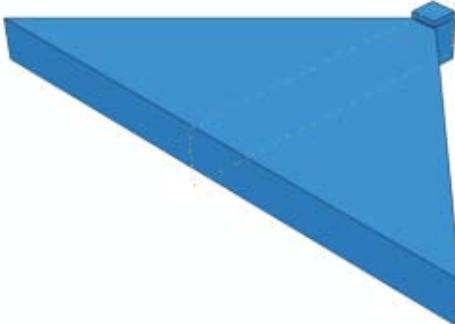
Cada pieza que se desarrolló en el módulo de parte posee su propio sistema de coordenadas; sin embargo, en el módulo de ensamble se toman “instantáneas” de cada una de las partes para poder crear un ensamble con un solo sistema de coordenadas. Es decir, cada parte que se introduce al ensamble es sólo una representación de la parte original. Cuando se realiza un cambio a través del módulo de parte, éste automáticamente se actualizará en el ensamble que se tenga.

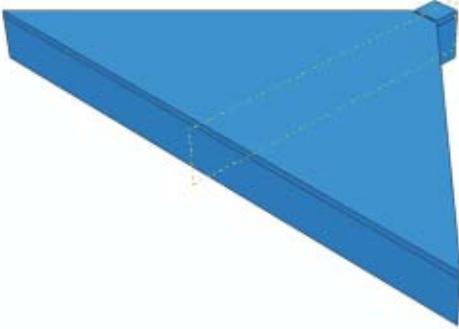
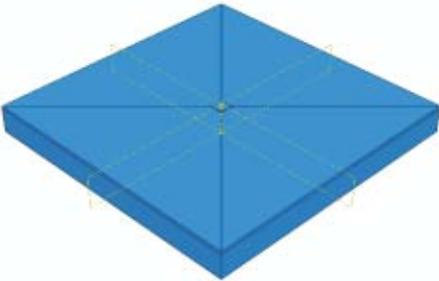
Para formar la placa multi-metálica se hicieron varios volúmenes (partes geométricas) que posteriormente se unieron para llegar a la forma total de la placa. La razón de esta estrategia es para poder mantener las uniones geométricas entre

todas las partes, lo cual sirve para poder definir el número de elementos finitos en la malla del modelo. Como se explicará más adelante, esta división de la placa en volúmenes pequeños hace que la distribución de los elementos finitos sea más óptima.

2.3.1. Proceso de ensamble de la placa.

Tabla 2.4. Procedimiento para el ensamble de la multicapa.

 <p>Diagrama de un volumen rectangular azul dividido en dos partes por una línea horizontal, representando la unión de dos volúmenes.</p>	<p>Se unen los dos volúmenes correspondientes a los centros de la aleación Al-Sn y del acero.</p>
 <p>Diagrama de un volumen triangular azul con un pequeño cubo azul adherido a su superficie superior, representando la introducción de un tercer volumen.</p>	<p>Se introduce un tercer volumen, que representa el exterior correspondiente a la placa de acero.</p>

	<p>Arriba del volumen exterior de la placa de acero se introduce el volumen de la parte exterior de la capa de la aleación.</p>
	<p>Finalmente, se utiliza la herramienta de formación de patrones radial (radial pattern) para repetir los volúmenes exteriores alrededor del centro de la placa multimetálica.</p>

Cuando se tiene el arreglo radial anterior, se utiliza la opción unir (merge) para crear un solo volumen que represente a la placa multi-metálica, pero manteniendo todas las uniones geométricas de las piezas que se utilizaron. La siguiente figura muestra el sólido final:

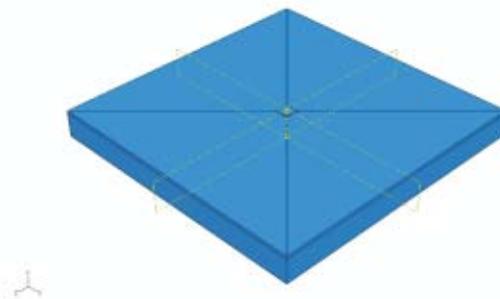


Fig. 2.10. Ensamble de la placa multi-metálica.

Para tener el ensamble final que se utilizará como modelo, falta introducir a las superficies analíticas de los pernos. La prueba experimental que se realiza en el tribómetro coaxial explica que la posición inicial de los pernos de desgaste debe de estar lo más cerca posible del centro de la placa multi-metálica; al tener varios espesores de placa, dos pernos de desgaste y dos materiales distintos de la aleación, se tendrán varios modelos de elemento finito. En la figura 2.11 se muestran los dos pernos de desgaste en su posición inicial, de acuerdo a la prueba experimental del tribómetro.

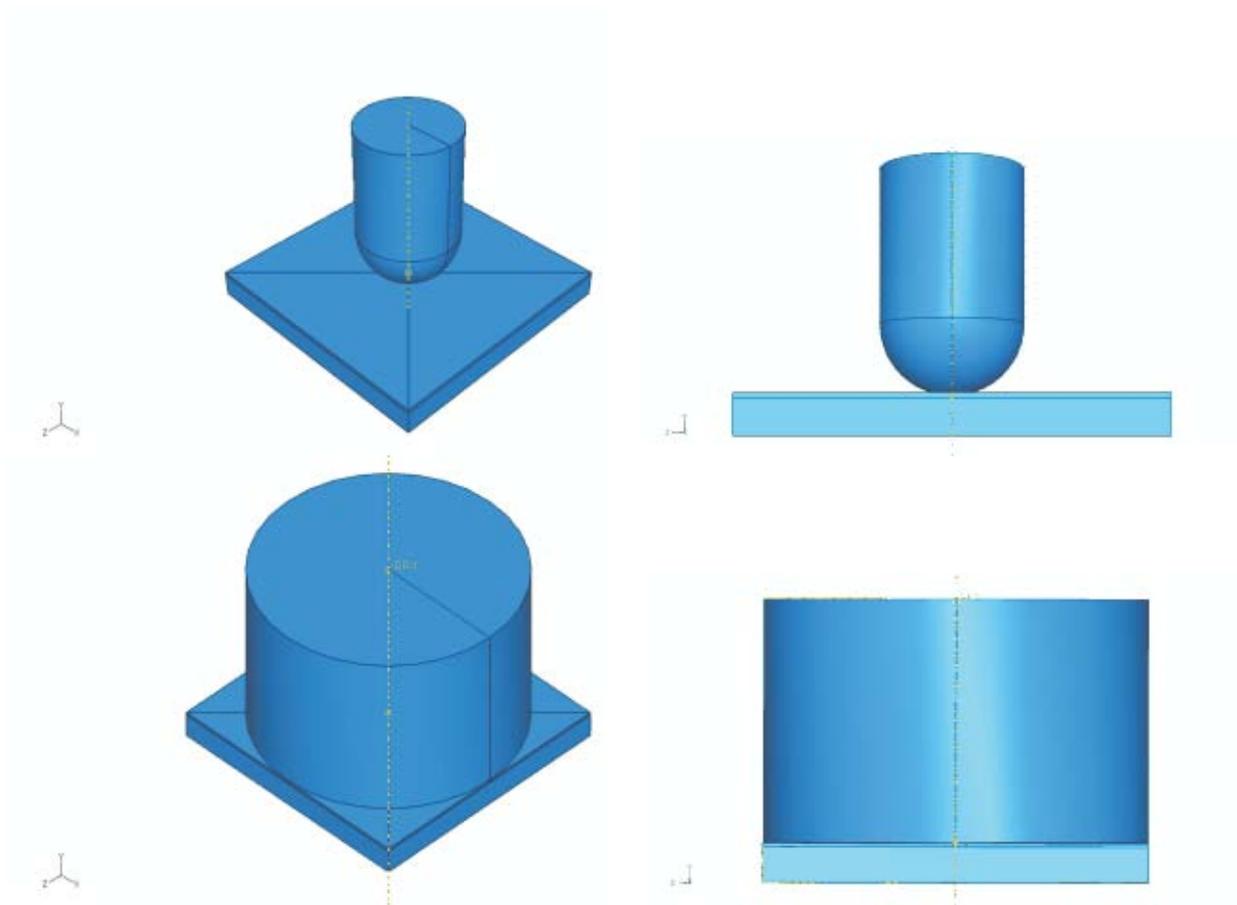


Fig. 2.11. Ensamblajes finales para cada perno de desgaste.

2.4. Módulo de paso (step).

En este paso deben de considerarse las demás especificaciones de la prueba experimental. El perno debe avanzar y penetrar a la placa durante un lapso de veinte segundos. Al finalizar ese tiempo, el perno solamente debe mantener la velocidad angular del paso anterior. Tomando las consideraciones especificadas, se definieron dos pasos estáticos lineales: indentación y prueba. El paso denominado indentación tiene una duración de veinte segundos, y el paso llamado prueba dura cinco, aunque su duración puede prolongarse más. El programa calculará las variables pedidas en cada incremento de un segundo.

Durante ambos pasos se calculan las variables pedidas, tanto para el modelo completo como para la zona de contacto entre superficies. A continuación se listan estas variables calculadas, que son las más importantes para el análisis:

Tabla 2.5. Variables para todos los modelos simulados.

	Variables	Símbolo
Modelo Completo.	Componentes del esfuerzo e invariantes.	S
	Componentes de las deformaciones totales.	E
	Deformación plástica equivalente.	PEEQ
	Deformación plástica equivalente máxima.	PEEQMAX
	Traslaciones y rotaciones.	U
	Reacción de fuerzas y momentos.	RF
	Fuerzas y momentos concentrados.	CF

2.5. Módulo de interacción.

Aquí se pueden definir interacciones de contacto, de radiación, condiciones de cuerpo rígido, condiciones de capa térmica, inercia, etc. En general, todas las condiciones exteriores y algunas propiedades del modelo diferentes a las del módulo de propiedades deben definirse aquí. La fricción es considerada en el modelo y es una propiedad que debe definirse para el contacto mecánico.

El contacto mecánico en el modelo se dará justo cuando el perno de desgaste empiece a penetrar a la placa multi-metálica. Como se explicó en el módulo de ensamble, se colocó al perno justo encima de la placa. Esto implica que el contacto empezará desde el primer incremento de tiempo del paso indentación. Por ello es necesario definir el contacto desde el primer paso, y que su efecto se propague hacia el siguiente.

Primero se deben de identificar las superficies que estarán en contacto; en este caso es muy fácil identificar dichas superficies, puesto que sólo hay dos. A la superficie superior de la capa de la aleación y la superficie del perno de desgaste se le llama par de contacto. Una vez definido el par de contacto en el modelo, para la formulación del contacto se deben considerar:

- El tipo de contacto.
- La trayectoria de aproximación.
- La asignación de la superficie maestra y la superficie esclava.

A continuación se explicará cada uno de los tres puntos anteriores.

2.5.1. Tipo de contacto.

Al definir el par y el tipo de contacto en ABAQUS®, el programa crea restricciones locales en los nodos para simular las condiciones de contacto. La localización y condiciones de estas restricciones dependen del tipo de contacto que se utilice en su

formulación. Se escogió el tipo de contacto superficie-superficie, porque considera la forma de ambas superficies del par de contacto y sus restricciones; además, las condiciones de contacto en la superficie esclava se distribuyen de manera uniforme. A pesar de que este tipo de contacto permite una pequeña penetración de los nodos de la superficie maestra sobre la esclava, el cálculo de los esfuerzos y presiones que se presentan en las superficies es mucho más exacto y preciso que utilizar el tipo de contacto nodo-superficie, el cual tiende a concentrar los esfuerzos y deformaciones en los nodos seleccionados de la superficie [23].

Al tener una distribución más completa y uniforme de los nodos en un tipo de contacto superficie-superficie, se tendrá un valor más elevado de nodos involucrados en el contacto que en un tipo de contacto nodo-superficie; esto traerá como consecuencia un aumento en el tiempo de cálculo para el programa de elemento finito. Sin embargo, se pudo contar con el recurso computacional suficiente para poder ignorar este inconveniente y aprovechar los beneficios del tipo de contacto seleccionado.

2.5.2. Trayectoria de aproximación.

En esta parte se debe definir el tipo de movimiento relativo que tendrá el par de contacto. Para el programa existen dos trayectorias de aproximación: deslizamiento finito y deslizamiento pequeño. Se utilizó la trayectoria de aproximación de deslizamiento pequeño porque el programa entiende que el deslizamiento que se presenta en los nodos correspondientes a la zona de contacto mantendrá una configuración muy parecida a la inicial, además de que los nodos de la superficie esclava estarán siempre interactuando con los de la superficie maestra. Para el análisis geométrico lineal considerado aquí, la trayectoria de aproximación se considera una aproximación infinitesimal de rotación y desplazamiento en el modelo, tanto en el movimiento relativo como en el absoluto [24].

2.5.3. Superficie maestra y esclava del modelo.

Esta parte no es tan difícil de elegir quien será la superficie maestra y quien la esclava del modelo. Para el programa, es necesario considerar siempre a las superficies analíticamente rígidas como superficies maestras; sin embargo cuando estas superficies no son analíticas sino sólidos deformables, la selección de la superficie maestra y esclava dependerá del modelo que se esté simulando. Por todo lo anterior, para la formulación del contacto se consideraron como superficie maestra al perno de desgaste, y la placa multi-metálica como superficie esclava. Sin embargo, el área de contacto que tendrá el perno de desgaste de un metro de radio abarcará una zona más amplia que cuando se modela con el perno de cuatro milímetros. Por lo tanto, para tener una mejor formulación del contacto es necesario reducir su dominio de acuerdo al área de contacto según el perno a utilizar.

Tomando en cuenta todos los factores anteriores, se consideró que el dominio de la superficie esclava debe ser un área cuadrangular donde esté encerrada la proyección de la sección transversal del perno. Esta proyección es la cantidad de superficie máxima del perno que puede entrar en contacto con la superficie superior de la placa multi-metálica. Esto se explica mejor en las figuras 2.12 y 2.13.

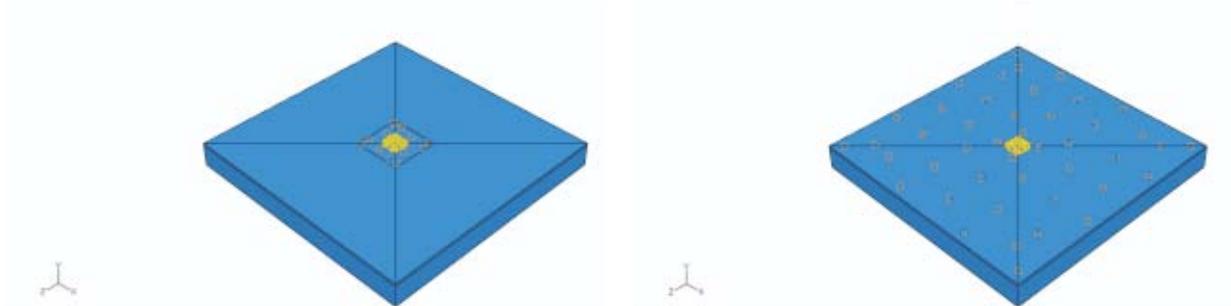


Fig. 2.12. Dominio de la superficie esclava para el perno de desgaste de 4 mm de radio de curvatura.

Fig. 2.13. Dominio de la superficie esclava para el perno de desgaste de 1 m de radio de curvatura.

En el caso del perno cuyo radio de curvatura es de un metro, se observa que el dominio de contacto abarca toda la superficie del modelo porque el radio del perno mide diez milímetros. Mientras que el área proyectada del perno de cuatro milímetros hacia la superficie de la aleación es más pequeña.

Una vez definida la formulación del contacto, es necesario definir sus propiedades. Se utilizó un comportamiento mecánico tangencial para el contacto, donde la fricción es de tipo Coulomb. El modelo de fricción utilizado también permite definir a la fricción como función de la velocidad de deslizamiento, la presión y la temperatura del contacto. Empero, para los modelos propuestos sólo se consideró que tiene un valor constante de 0.27 [25].

2.6. Módulo de condiciones de frontera.

En módulos anteriores se definió para el modelo su geometría, propiedades e interacciones. Ahora, al llegar a este módulo es necesario definir las acciones externas que actúan sobre el modelo; es decir, las fuerzas de cuerpo y de superficie que actuarán a través de toda la simulación. También se deberá definir en que paso estará activa dicha acción externa y por cuanto tiempo. La magnitud de cada una de estas acciones externas se podrá definir en este módulo, pudiendo definir amplitudes complicadas que varían con el tiempo.

2.6.1. Condición de empotramiento.

Como se mostró anteriormente, el sistema porta-muestra se encuentra sujetando a la placa multi-metálica durante toda la prueba experimental. Por lo tanto, se consideró que los nodos de la parte inferior de la placa estarán empotrados; es decir, no tendrán ningún tipo de movimiento –desplazamiento y rotación – durante toda la simulación (ver figura 2.14). Esta condición estará presente para todos los modelos que se simularán en ABAQUS®.

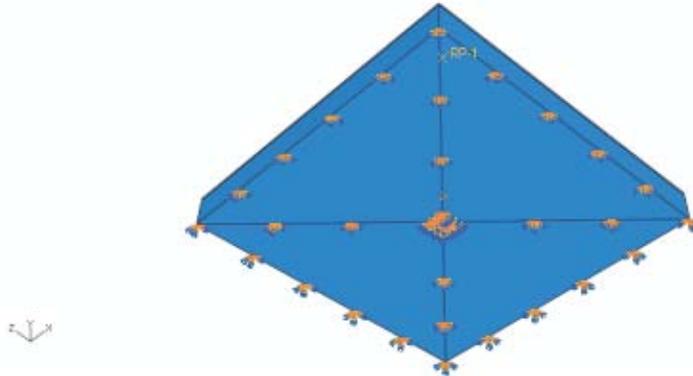


Fig. 2.14. Condición de empotramiento debajo de la capa de acero.

2.6.2. Condición de desplazamiento y rotación.

Para asignarle condiciones de frontera al perno de desgaste, éste se encuentra representado por un punto de referencia localizado en la parte superior de la superficie y su eje de rotación, como se muestra en las figuras 2.15 y 2.16.

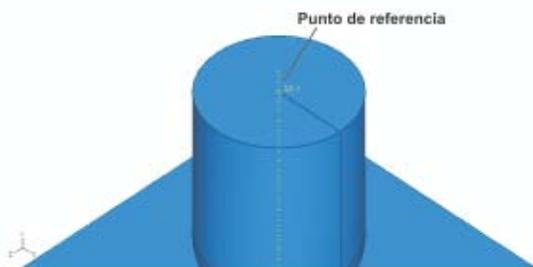


Fig. 2.15. Punto de referencia en el perno de 4 [mm].



Fig. 2.16. Punto de referencia para el perno de 1 [m].

La condición de frontera asignada a este punto es una de tipo velocidad/velocidad angular. Al asignar un punto de referencia a toda la superficie analítica del perno, se restringe a que la superficie se mueva como un cuerpo rígido; es decir, todo el

movimiento de la superficie estará descrito por el movimiento del punto de referencia. Para lograr que el perno gire e indente a la placa multi-metálica como en la prueba experimental, se limitará el movimiento de su punto de referencia a una velocidad constante en la dirección negativa y y a una velocidad de rotación alrededor de la misma, como muestra el sistema de referencia del ensamble.

La magnitud del desplazamiento del perno en la dirección y dependerá del espesor que tenga la placa multi-metálica del modelo. Por lo tanto, la magnitud de la condición de desplazamiento también tendrá un valor particular para cada espesor de placa. Mientras más grande sea la profundidad con la cual indente el perno a la superficie, mayor será la distorsión de la red de elementos finitos en el contacto porque el perno cada vez aplastará más a los elementos de la aleación Al-Sn. Físicamente, esto representa un desgaste que desprende material de la zona de contacto, a pesar de utilizar técnicas de mallado adaptativo y remallado; por esto los algoritmos involucrados en el método de elemento finito pierden su precisión numérica y los valores obtenidos para esfuerzos y deformaciones ya no se pueden considerar como representativos para el proceso simulado. No obstante, el hecho de que se puede predecir el punto en el cual inician estas grandes deformaciones, responsables para el desgaste en un material tribológico dúctil es interesante en sí.

Para evitar lo anterior se determinaron dos desplazamientos de acuerdo al perno de desgaste. Se espera que el perno de desgaste con radio de curvatura de 4 [mm] concentre más los esfuerzos en la placa por su geometría, mientras que el de radio de curvatura de 1 [m] distribuya la carga que ejerce sobre la capa por tener una mayor área de contacto. Entonces, se definió que el desplazamiento del perno de 4 [mm] sea el 5 % de la capa de Al-Sn. Para el perno de 1 [m] se definió que se desplace el 1 % del espesor de la multicapa. Los valores para el desplazamiento del perno permiten que el programa siga resolviendo al sistema de ecuaciones y no colapse antes. Como se tienen dos espesores de capa, entonces se tendrán dos desplazamientos por perno.

Tabla 2.2. Condiciones de frontera para los pernos de desgaste.

Espesor	Desplazamiento [μm]	Velocidad (cte.) en el paso indentación [$\mu\text{m}/\text{seg}$]
Perno de 4 [mm]		
Multicapa metálica con 180 μm de espesor en la aleación Al-Sn	9	0.45
Multicapa metálica con 240 μm de espesor en la aleación Al-Sn	12	0.60
Perno de 1 [m]		
Multicapa metálica con 180 μm de espesor en la aleación Al-Sn	1.8	0.09
Multicapa metálica con 2400 μm de espesor en la aleación Al-Sn	2.4	0.12

La velocidad angular del perno de desgaste se definió como el 10 % de la velocidad máxima del torquímetro, como se especifica en la prueba experimental [26]. La velocidad máxima que puede alcanzar la flecha del motor es de 3000 [rpm], por lo que para todos los modelos se consideró de 300 [rpm], que son 31.4 [rad/seg].

2.7. Módulo de mallado (mesh).

Al llegar a este módulo se han definido las propiedades e interacciones que tendrán los elementos finitos del modelo; sin embargo, es en esta parte donde debe definirse el tipo y la geometría de cada uno de los elementos finitos para formar la malla de los modelos. Para mallar el modelo se consideró que la zona más importante de los elementos finitos será donde se presenta el contacto entre los pernos de desgaste y la capa elasto-plástica de la multicapa. Como se menciona en la prueba experimental, este contacto se presenta en el centro de la multicapa metálica. Por lo anterior es que se mantuvieron todas las fronteras geométricas cuando se unieron todos los volúmenes que formaron a la placa multi-metálica, ya que con ellas se pudo dividir de manera óptima a la multicapa.

Al tener un contacto en el centro de la placa, se tomó la decisión de tener una malla fina en el centro y gruesa hacia las orillas de la multicapa. Para los elementos más finos se consideró el concepto de razón de aspecto, el cual se define como la razón de la longitud más grande a la longitud más corta del elemento. Al tener un elemento más compacto y regular en su forma, se obtendrán mejores resultados [27]. Esto evidentemente se pierde en los elementos externos. Los elementos utilizados para todos los modelos son paralelepípedos lineales, con integración reducida (C3D8R).

El centro de la capa de Al-Sn es un volumen de sección cuadrada de 1 [mm] de lado con el espesor de dicha capa; está compuesto de seis filas adyacentes de elementos finitos, con una razón de aspecto entre 1 y 1.5. En la frontera del centro y los pedazos exteriores de la capa Al-Sn se hizo una adaptación para poder tener sólo dos elementos hacia el exterior de la capa (figura 2.17).

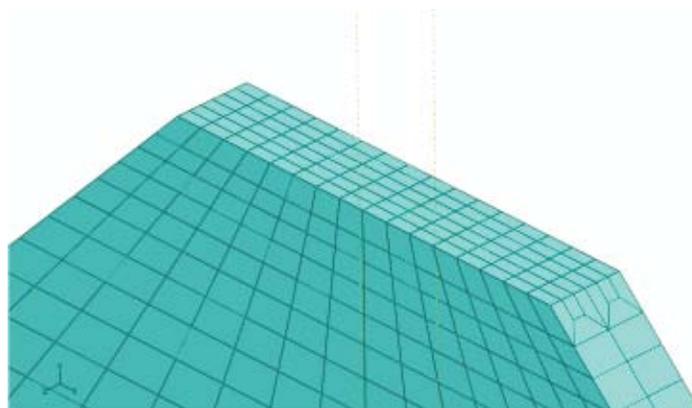


Fig. 2.17. Optimización de la malla mediante una adaptación de seis a dos elementos finitos.

De tal forma que al hacer dicha adaptación, se tendrá una malla de elementos finitos óptima porque se reducen el número de elementos donde no se necesitan. Para concentrar la cantidad de elementos finitos en el centro de la placa, se utilizó la opción biased para dividir a las fronteras exteriores con elementos pequeños en el centro y grandes hacia el exterior. Esto quiere decir que el lado de los elementos finitos sobre la frontera aumentará en tamaño a medida que se aleje del centro de la placa. La siguiente figura explica mejor lo anterior.

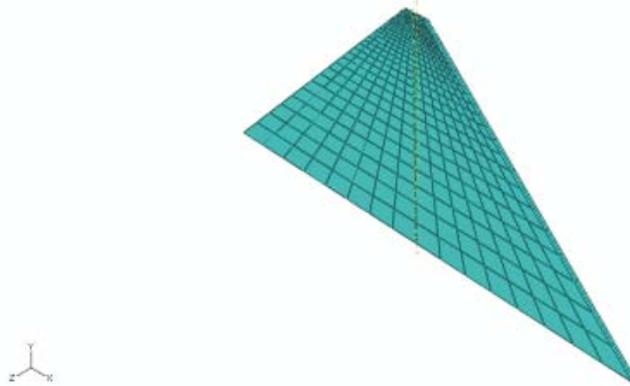


Fig. 2.18. Opción biased sobre las fronteras exteriores.

Como ya se mencionó, la capa de Al-Sn posee en la dirección de su espesor: 6 elementos y hacia el exterior solamente 2. Sin embargo, la opción biased también se utilizó sobre las fronteras que definen el espesor de la capa de acero, con el fin de seguir optimizando el número de elementos finitos y hacer más densa la malla sobre el centro. Así que para mantener la razón de aspecto en el intervalo (1,1.5), los elementos de la capa de acero que están en la frontera con el centro de la capa de Al-Sn deben tener un tamaño similar. La figura 2.19 muestra una sección transversal del centro de la multicapa con el fin de observar el tamaño regular de los elementos en esa zona.

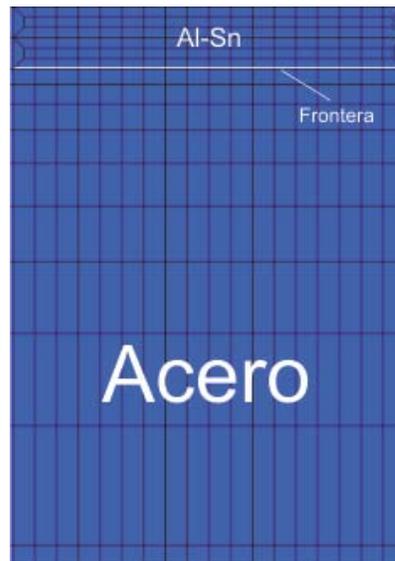


Fig. 2.19. Sección transversal del centro de la multicapa.

La malla final utilizada en los modelos posee la cantidad de 16 116 elementos; el ángulo mínimo promedio de todos los elementos es de 67.65° ; el lado más pequeño de los elementos finitos es de $3.0e-5$ [m] que se encuentra en los elementos del centro de la malla, y se obtuvo un lado mínimo promedio de $1.06e-4$ en todos ellos. A continuación se muestra en la figura la malla completa en los modelos.

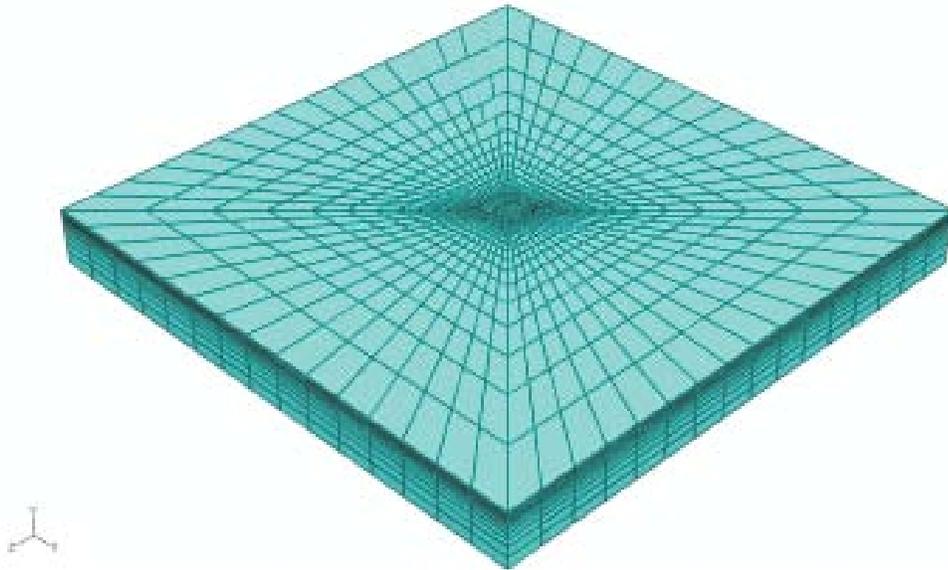


Fig. 2.20. Malla final para los modelos, que muestra la distribución final de los elementos finitos.

Capítulo 3

Presentación de los resultados

A continuación se presentarán los resultados obtenidos de las simulaciones por elemento finito. Existen parámetros que no cambian en todas las simulaciones, y otros que son particulares para cada una de ellas. Es por ello que primero se presenta una síntesis de todos los parámetros utilizados para todas las simulaciones, antes de los resultados.

3.1. Esquema de las simulaciones.

Los parámetros que se mantuvieron fijos en todas las simulaciones son los siguientes:

Tabla 3.1. Parámetros fijos en todas las simulaciones.

Parámetro	Valor
Geometría y dimensión de la multicapa.	Sección cuadrada de 20 [mm] y un espesor de 2[mm]
Propiedades elásticas para las capas de Acero.	E=200 [GPa] v=0.29
Propiedades elásticas para las capas de aleación Al-Sn.	E=70 [GPa] v=0.33
Posición inicial de los pernos.	En el centro de las capas
Pasos estáticos iguales.	-----
Fricción de Coulomb entre los pernos y las multicapas.	0.27
Empotramiento en las multicapas.	-----
Velocidad angular para todos los pernos.	300 [rpm] = 31.4 [rad/seg]
Razón de aspecto de los elementos finitos en la zona de contacto.	En el rango (1,1.5]
Mismo tipo de elemento en la malla.	Paralelepípedo (brick) lineal de 8 nodos

Sin embargo, cada simulación tiene sus propios parámetros. Se seleccionaron dos espesores para la capa de aleación Al-Sn, dos geometrías diferentes para el perno de desgaste y dos materiales elasto-plásticos para la aleación Al-Sn. Además, la velocidad de desplazamiento del perno cambia de acuerdo al perno que se utilice, como se mencionó en el capítulo anterior. Por lo tanto, se tienen ocho simulaciones diferentes, que se realizaron en un lapso de aproximadamente dos horas cada una. La siguiente tabla muestra un esquema de todas las simulaciones:

Tabla 3.2. Esquema de las simulaciones.

Perno de desgaste con 4 [mm] de curvatura	
Simulación 1	Multicapa Metálica: Aleación Al-Sn con 10 [min] de recocido de 180 [μm] de espesor - Acero AISI 1008. Perno de desgaste: Punta semiesférica de 4 mm de radio. Desplazamiento del perno: 9 [μm]
Simulación 2	Multicapa Metálica: Aleación Al-Sn con 30 [min] de recocido de 180 [μm] de espesor - Acero AISI 1008. Perno de desgaste: Punta semiesférica de 4 mm de radio. Desplazamiento del perno: 9 [μm]
Simulación 3	Multicapa Metálica: Aleación Al-Sn con 10 [min] de recocido de 240 [μm] de espesor - Acero AISI 1008. Perno de desgaste: Punta semiesférica de 4 mm de radio. Desplazamiento del perno: 12 [μm]
Simulación 4	Multicapa Metálica: Aleación Al-Sn con 30 [min] de recocido de 240 [μm] de espesor - Acero AISI 1008. Perno de desgaste: Punta semiesférica de 4 mm de radio. Desplazamiento del perno: 12 [μm]
Perno de desgaste con 1 [m] de curvatura	
Simulación 5	Multicapa Metálica: Aleación Al-Sn con 10 [min] de recocido de 180 [μm] de espesor - Acero AISI 1008. Perno de desgaste: Punta semiesférica de 1 m de radio. Desplazamiento del perno: 1.8 [μm]
Simulación 6	Multicapa Metálica: Aleación Al-Sn con 30 [min] de recocido de 180 [μm] de espesor - Acero AISI 1008. Perno de desgaste: Punta semiesférica de 1 m de radio. Desplazamiento del perno: 1.8 [μm]
Simulación 7	Multicapa Metálica: Aleación Al-Sn con 10 [min] de recocido de 240 [μm] de espesor - Acero AISI 1008. Perno de desgaste: Punta semiesférica de 1 m de radio. Desplazamiento del perno: 2.4 [μm]
Simulación 8	Multicapa Metálica: Aleación Al-Sn con 30 [min] de recocido de 240 [μm] de espesor - Acero AISI 1008. Perno de desgaste: Punta semiesférica de 1 m de radio. Desplazamiento del perno: 2.4 [μm]

Para observar la influencia de la velocidad angular sobre la deformación plástica de la aleación Al-Sn, también se hicieron nuevamente las ocho simulaciones sin considerar el giro del perno durante la indentación, para poder comparar ambas situaciones. A continuación se describirá la presentación de los resultados obtenidos.

3.2. Presentación de los resultados.

La zona de contacto es la región de donde se obtuvieron los resultados para todas las simulaciones. Es por ello que se seleccionaron dos vistas que están representadas por los planos de la figura 3.1. El plano π representa al plano geométrico que forma la superficie de la multicapa en contacto con el perno, mientras que el plano Ψ es un plano paralelo al plano YZ que atraviesa en medio de la capa multi-metálica.

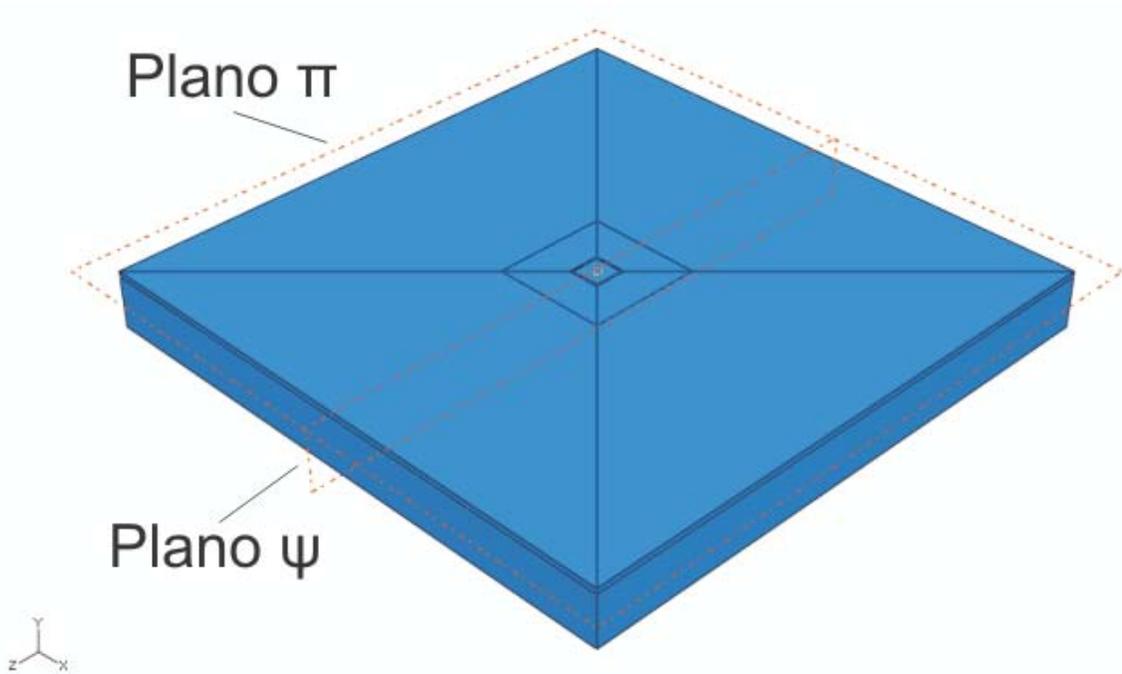


Figura 3.1. Planos geométricos para los resultados.

Las vistas anteriores para mostrar los resultados se colocaron en circunstancias similares durante cada simulación. Los esfuerzos y deformaciones en la multicapa se muestran cuando:

- Punto 1. La placa de aleación Al-Sn se empieza a deformar plásticamente.
- Punto 2. El esfuerzo de Von Mises necesario para que inicie la deformación plástica alcanza a la capa de acero.
- Punto 3. El perno llega a su posición final.

3.3. Resultados de las simulaciones.

Se presentarán con detalle los resultados para la primera simulación del perno de 4 [mm] de radio de curvatura. Para los demás resultados se presentarán solo en los instantes mencionados (Puntos 1 al 3) y con la vista sobre el plano Ψ para la multicapa, ya que no es necesario presentar todas las vistas de resultados para las demás simulaciones.

3.3.1. Perno de desgaste de 4 [mm] de radio de curvatura.

Recocido 10 min., 180 [μm] de espesor, radio de curvatura: 4 [mm]

Punto 1

Esfuerzo de Von Mises

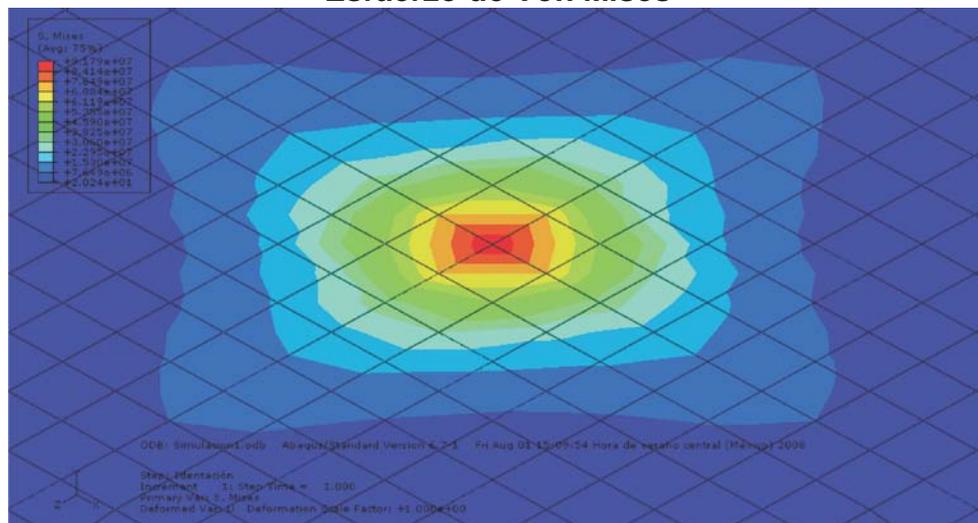


Fig. 3.2. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=1 [seg]. Con rotación.

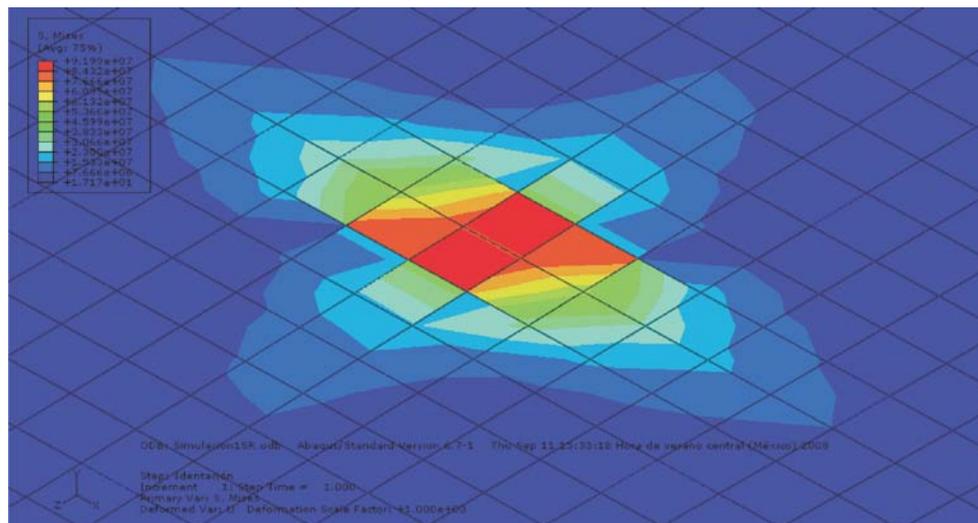


Fig. 3.3. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=1 [seg]. Sin Rotación.

El perno con radio de curvatura de 4 [mm] provoca grandes esfuerzos de Von Mises en la multicapa desde el primer incremento de tiempo. En ambas distribuciones de esfuerzos de Von Mises se observa como el perno induce una fuerza capaz de deformar plásticamente a la capa, sin importar si se modeló o no con velocidad angular.

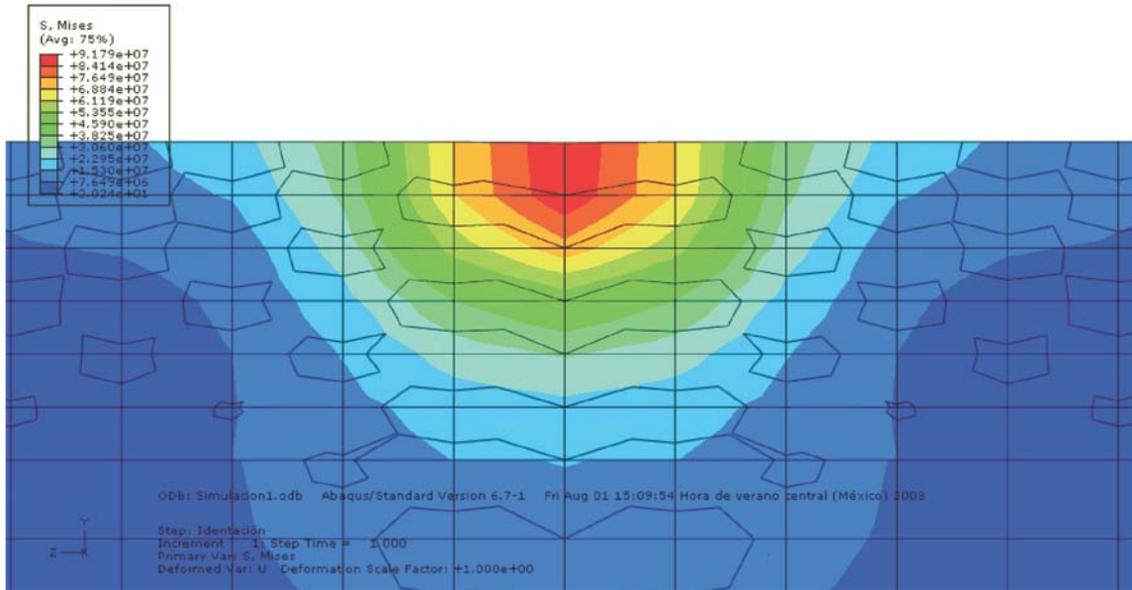


Fig. 3.4. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=1 [seg]. Con rotación.

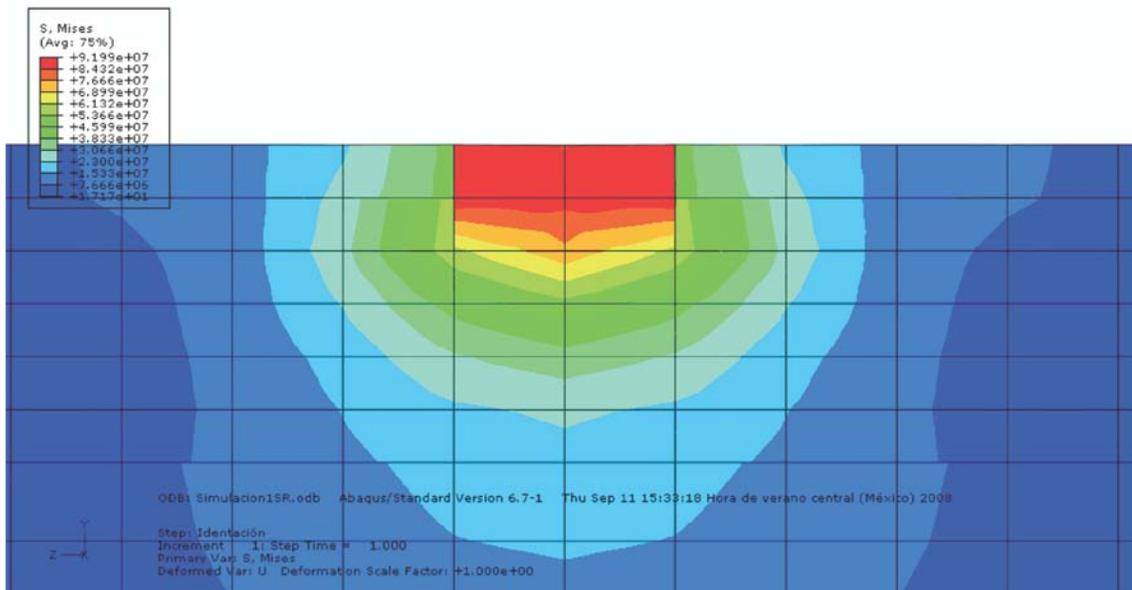


Fig. 3.5. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=1 [seg]. Sin Rotación.

Representación de la vista lateral de la multicapa en el primer incremento de tiempo (t=1 [seg]). La distribución del esfuerzo de Von Mises se observa más concentrada sobre la superficie de la aleación cuando se emplea rotación en el perno que cuando se omite. La zona roja muestra los niveles más altos para el esfuerzo de Von Mises.

**Recocido 10 min., 180 [μm] de espesor, radio de curvatura: 4 [mm]
Deformación Plástica**

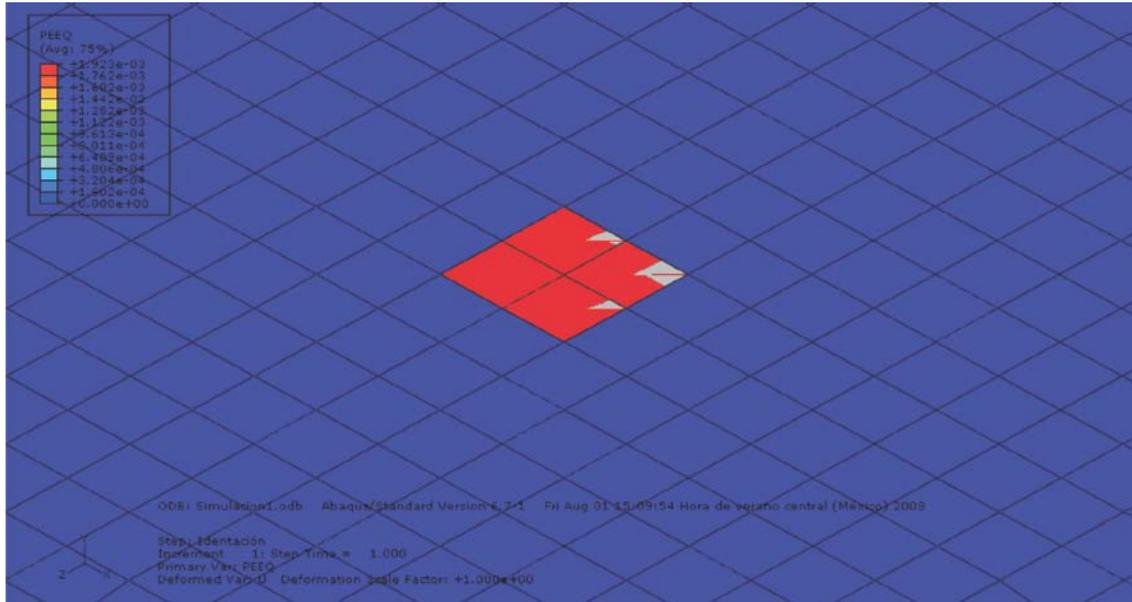


Fig. 3.6. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=1 [seg]. Con rotación.

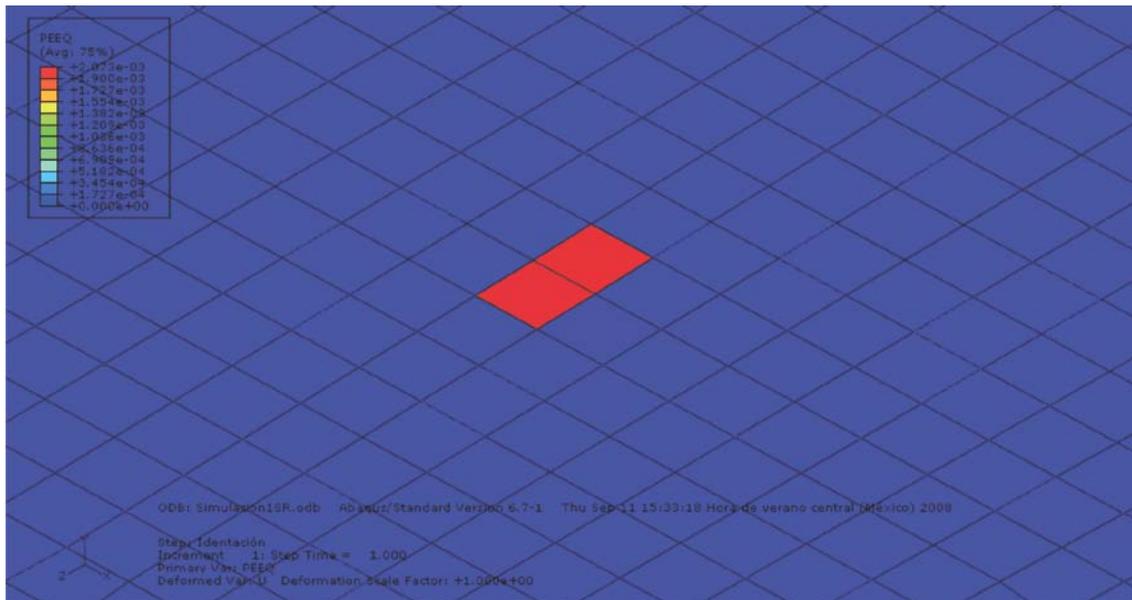


Fig. 3.7. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=1 [seg]. Sin rotación.

Las imágenes muestran que la deformación plástica comienza desde el primer segundo, como se mencionó. El perfil de deformaciones se observa todavía pequeño, y muestran el comienzo de la zona de contacto entre el perno y la multicapa.

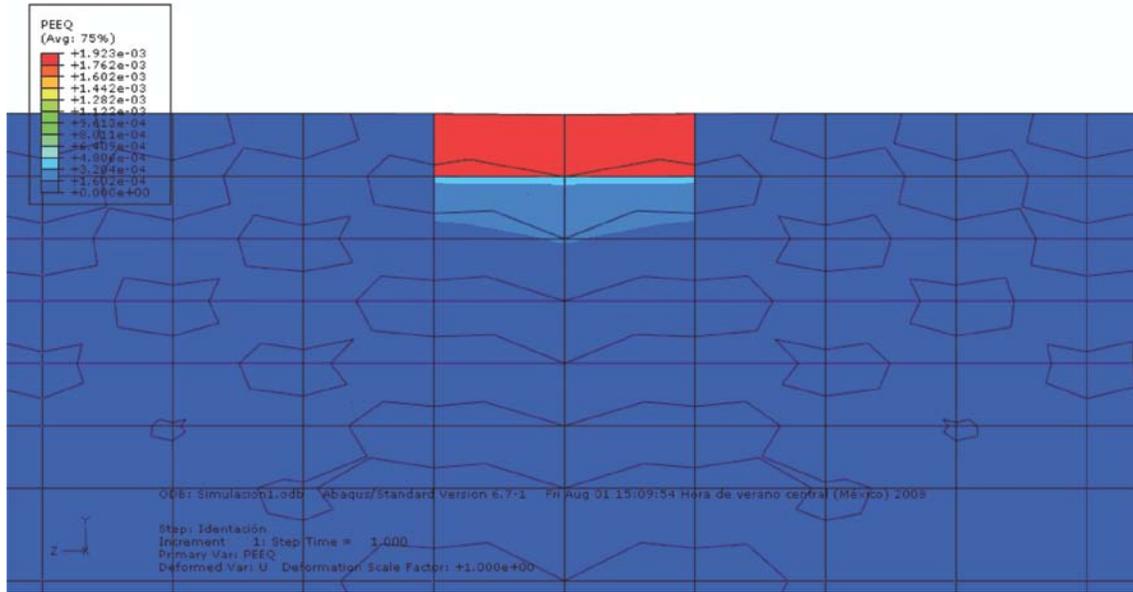


Fig. 3.8. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=1 [seg]. Con rotación.

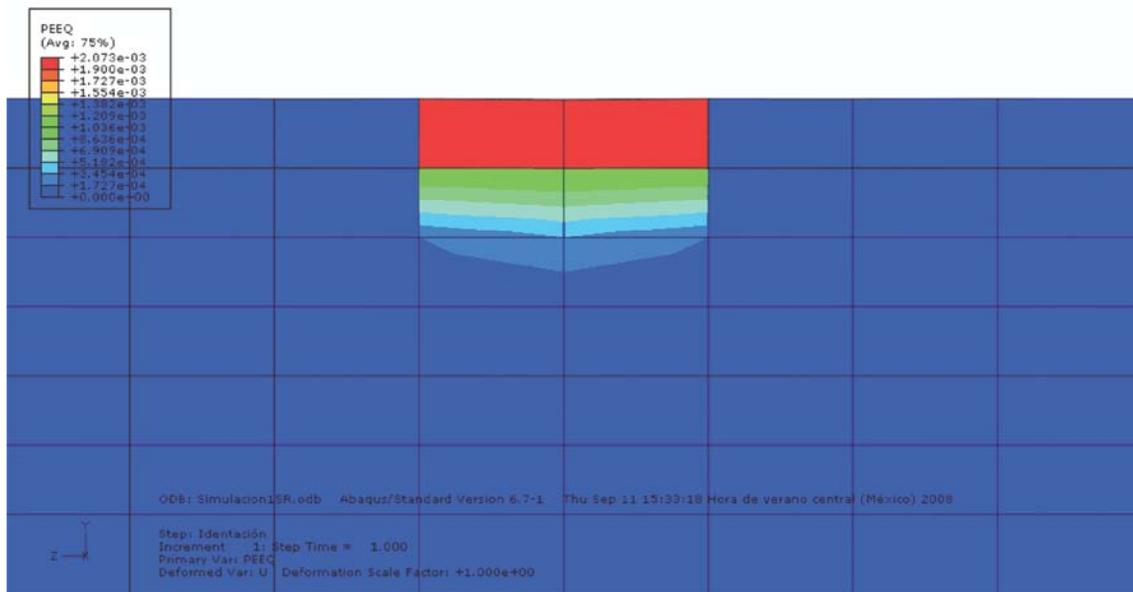


Fig. 3.9. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=1 [seg]. Sin rotación.

La distribución de esfuerzos de Von Mises para el perno que gira es mayor en la superficie (elementos en rojo); sin rotación también se observan sobre la superficie elementos en rojo que muestran los niveles más altos para el esfuerzo de Von Mises. Sin embargo, debajo de éstos se observa un perfil del esfuerzo de Von Mises que se distribuye hacia el centro de la aleación. Se observa que el giro del perno distorsiona mucho más a la malla de elementos finitos.

**Recocido 10 min., 180 [μm] de espesor, radio de curvatura: 4 [mm]
Punto 2
Esfuerzo de Von Mises**

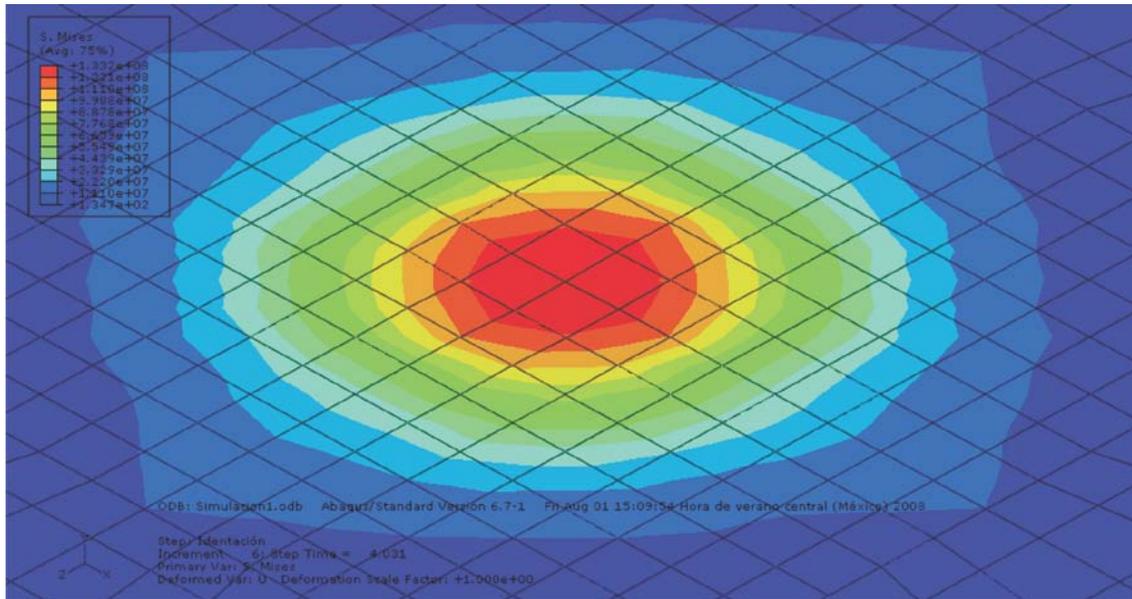


Fig. 3.10. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=4.031 [seg]. Con rotación.

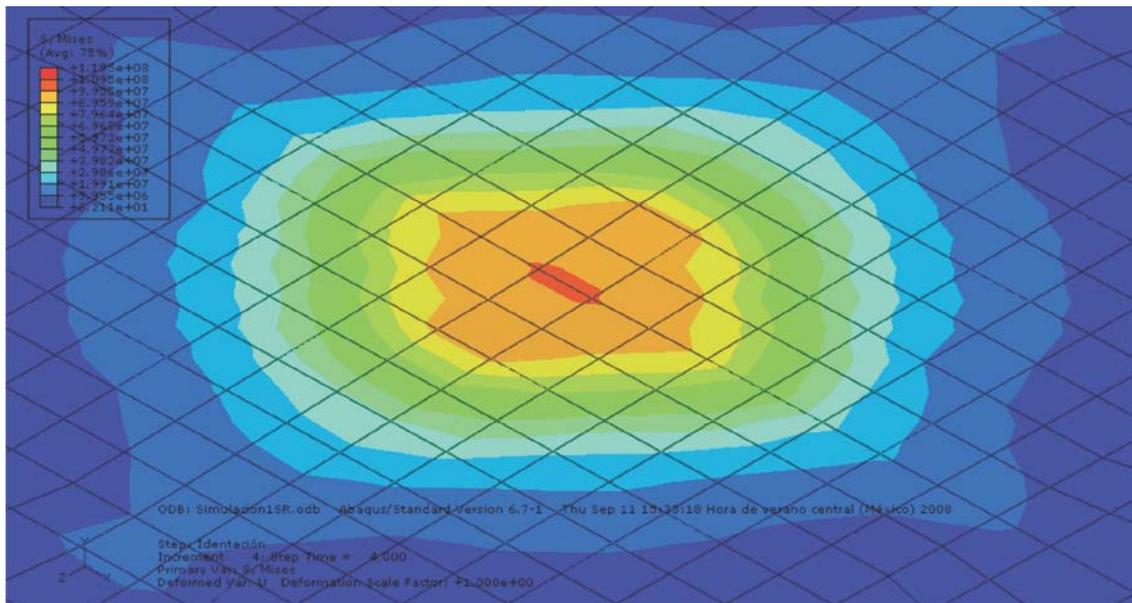


Fig. 3.11. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=4 [seg]. Sin rotación.

Para este momento, el esfuerzo de Von Mises necesario para iniciar deformación plástica ya ha alcanzado a la capa de acero por el desplazamiento del perno, lo cual se aprecia en la siguiente vista. La distribución del perfil que representa al esfuerzo de Von Mises es más grande cuando se tiene rotación en el perno que cuando se omite. El área de contacto ha crecido por el avance del perno.

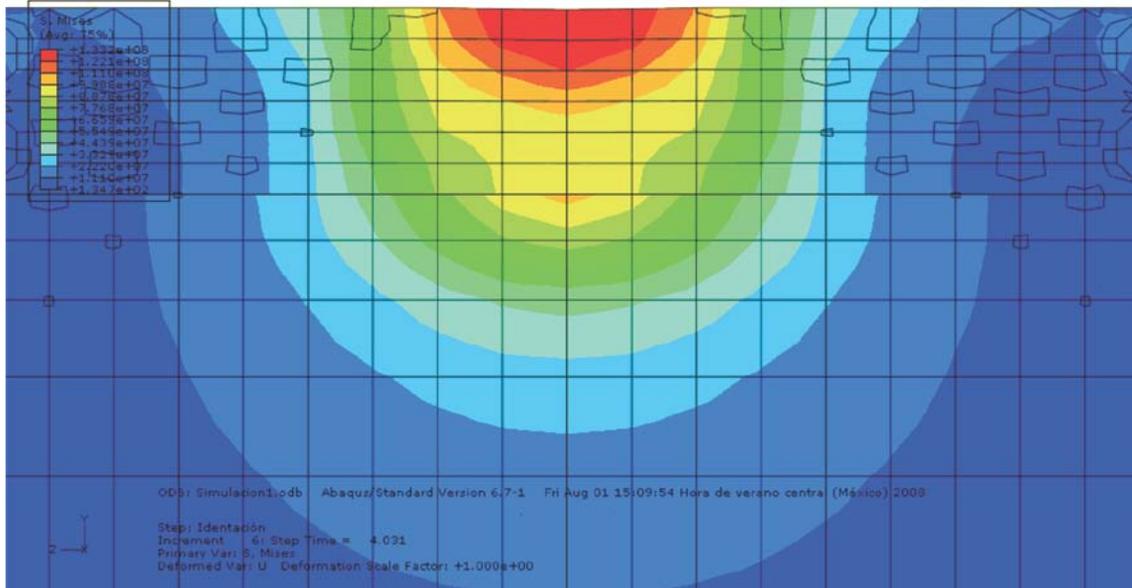


Fig. 3.12. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=4.031 [seg]. Con rotación.

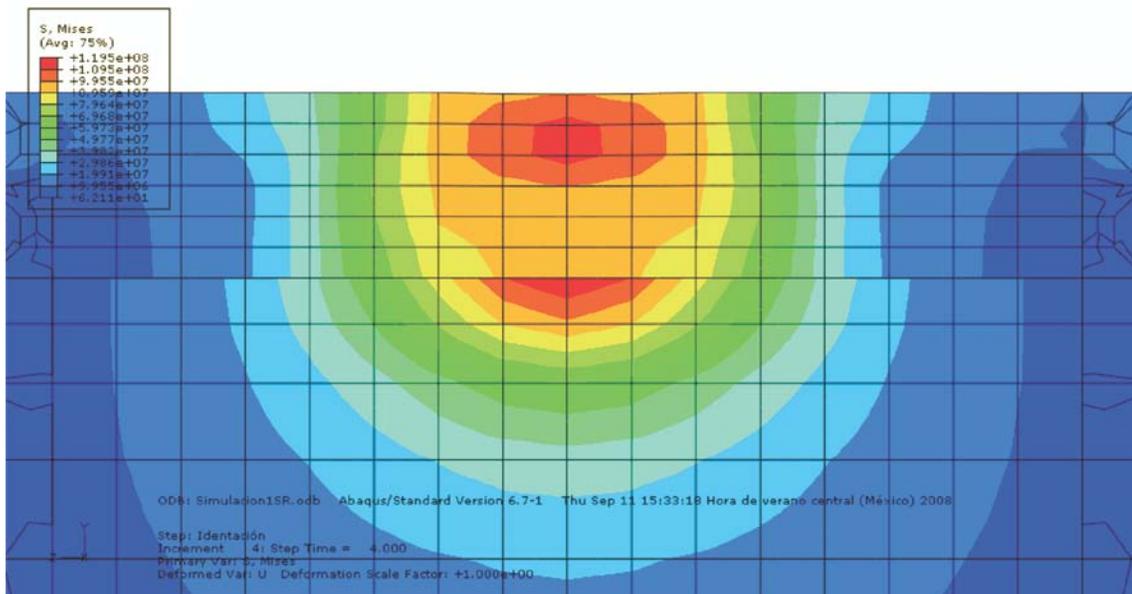


Fig. 3.13. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=4 [seg]. Sin rotación.

Vista lateral del esfuerzo de Von Mises. La zona amarilla para la simulación con rotación alcanza el valor mínimo de 99.88 [MPa] que ya es superior al esfuerzo de cedencia para la aleación utilizada. Al quitar la rotación del perno se obtiene un valor todavía más alto (zona roja sobre la capa de acero). Las aleaciones Al-Sn se unen al cuerpo de acero con una capa de Al puro, por lo que ésta también empezará a deformar plásticamente puesto que tiene un límite de cedencia similar al de la aleación. Por lo tanto, esta zona se volverá un punto crítico durante la prueba experimental.

**Recocido 10 min., 180 [μm] de espesor, radio de curvatura: 4 [mm]
Deformación Plástica**

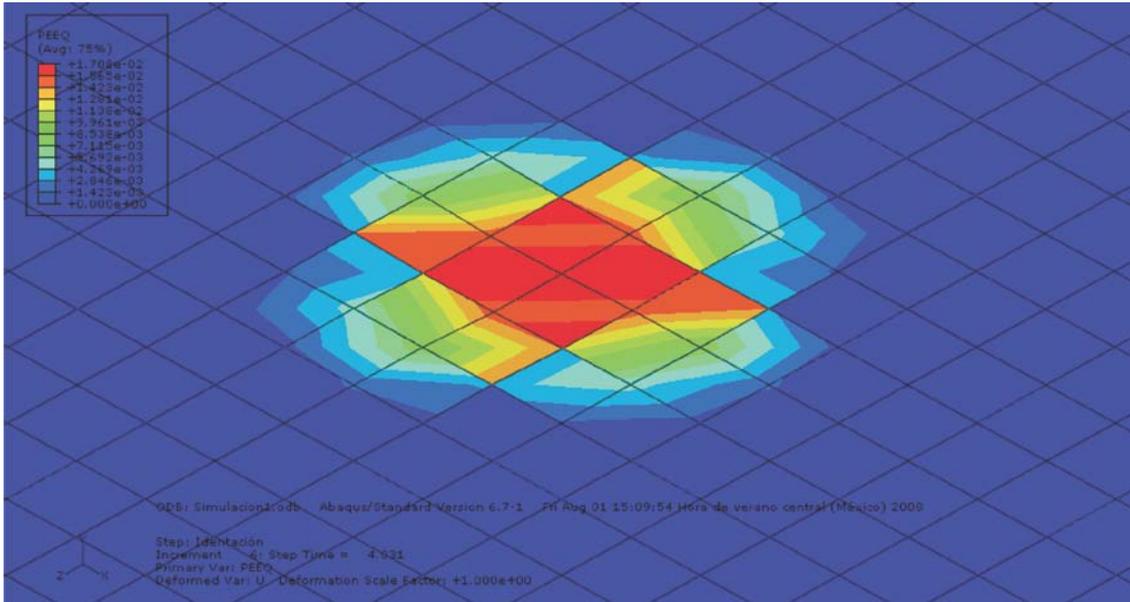


Fig. 3.14. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=4.031 [seg]. Con rotación.

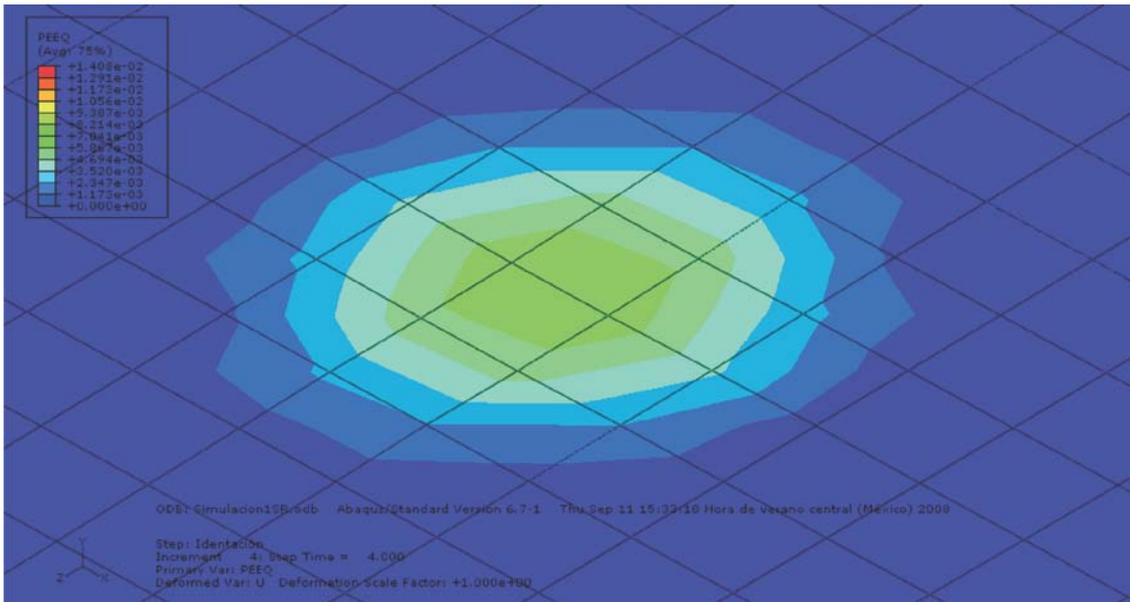


Fig. 3.15. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=4 [seg]. Sin rotación.

La deformación plástica se ha extendido, además de haberse incrementado por el avance del perno. Cabe destacar que el efecto de la fricción comienza a observarse porque la simulación con rotación presenta los niveles más altos de la deformación plástica sobre la superficie de la aleación Al-Sn, mientras que para la simulación sin rotación se encuentran los niveles más altos en el centro de la aleación. Esto puede entenderse como un flujo plástico normal a la superficie de ésta.

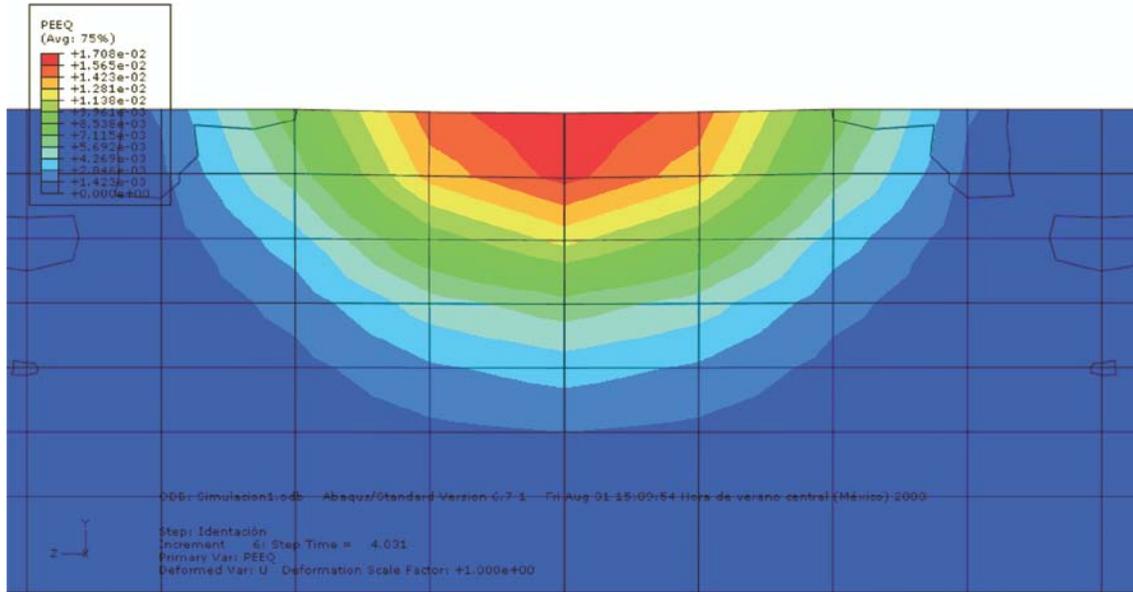


Fig. 3.16. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=4.031 [seg]. Con rotación.

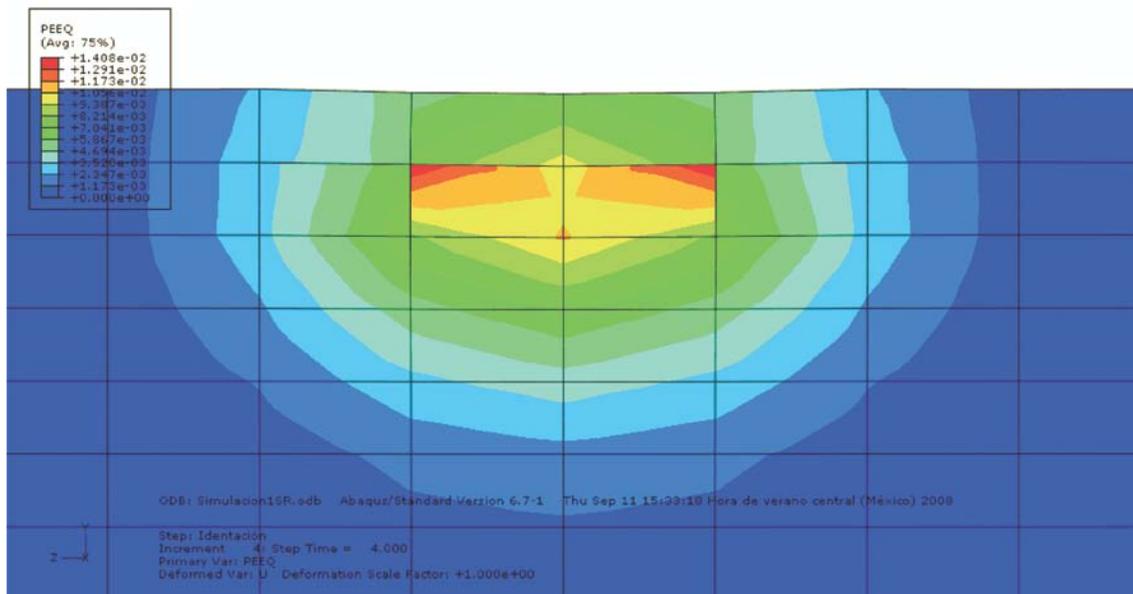


Fig. 3.17. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=4 [seg] Sin rotación.

Vista lateral de las aleaciones en el punto 2. La presencia de la fricción ya comienza a observarse en la parte superior de la aleación Al-Sn por la rotación del perno, ya que el perfil de la deformación plástica se muestra más distribuido sobre la superficie de la aleación. Se sigue observando una mayor concentración de la deformación plástica hacia el centro de la aleación cuando se omite la rotación del perno. Valores de la deformación plástica: hasta $\epsilon_{real}=1.708e-2$ con rotación, y hasta $\epsilon_{real}=1.408e-2$ sin rotación.

**Recocido 10 min., 180 [μm] de espesor, radio de curvatura: 4 [mm]
Punto 3
Esfuerzo de Von Mises**

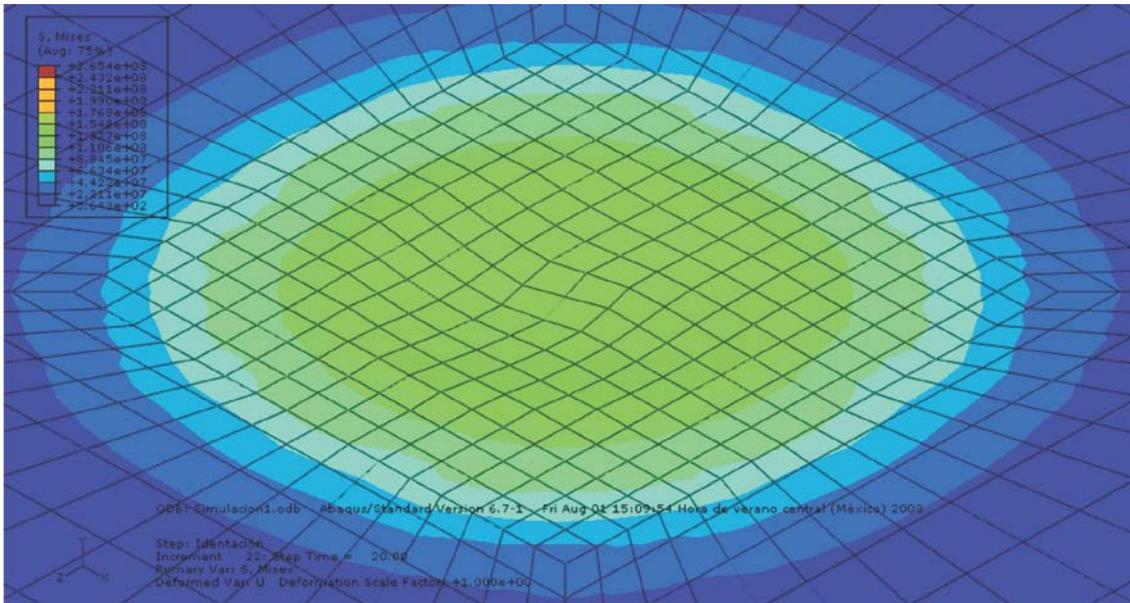


Fig. 3.18. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=20 [seg]. Con rotación.

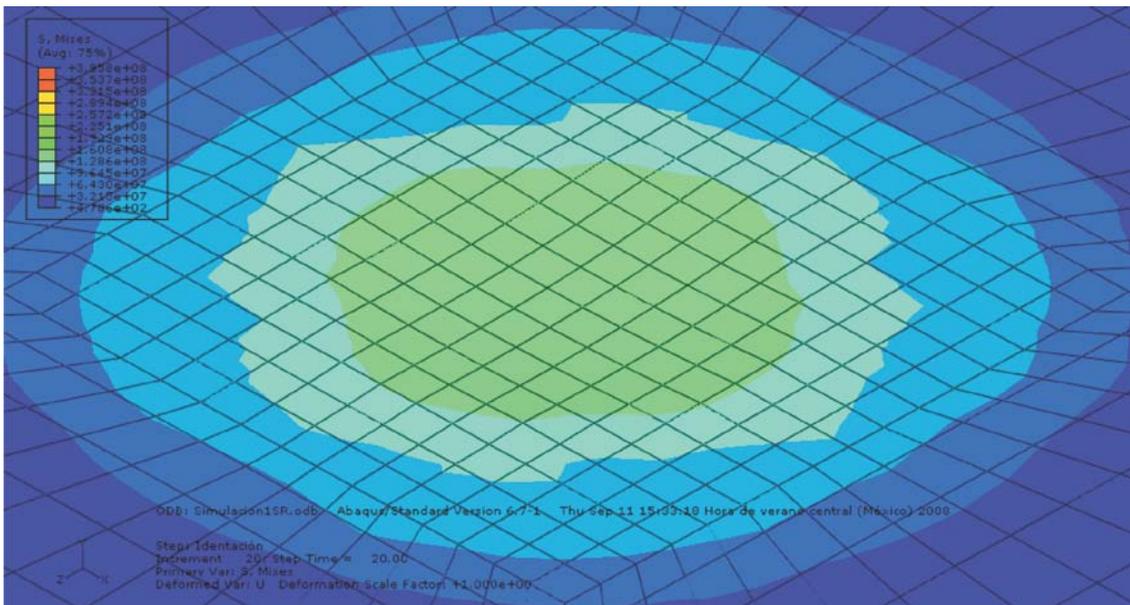


Fig. 3.19. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=20 [seg] Sin rotación.

El perno llegó a su posición final en ambas simulaciones, y se observa claramente el efecto de la rotación del perno sobre la multicapa. Se observa que la distribución de los esfuerzos de Von Mises más altos sobre la aleación Al-Sn depende de la rotación del perno. Los niveles más altos de este perfil se encuentran en la capa de acero porque presenta una mayor rigidez al tener un módulo de Young alto.

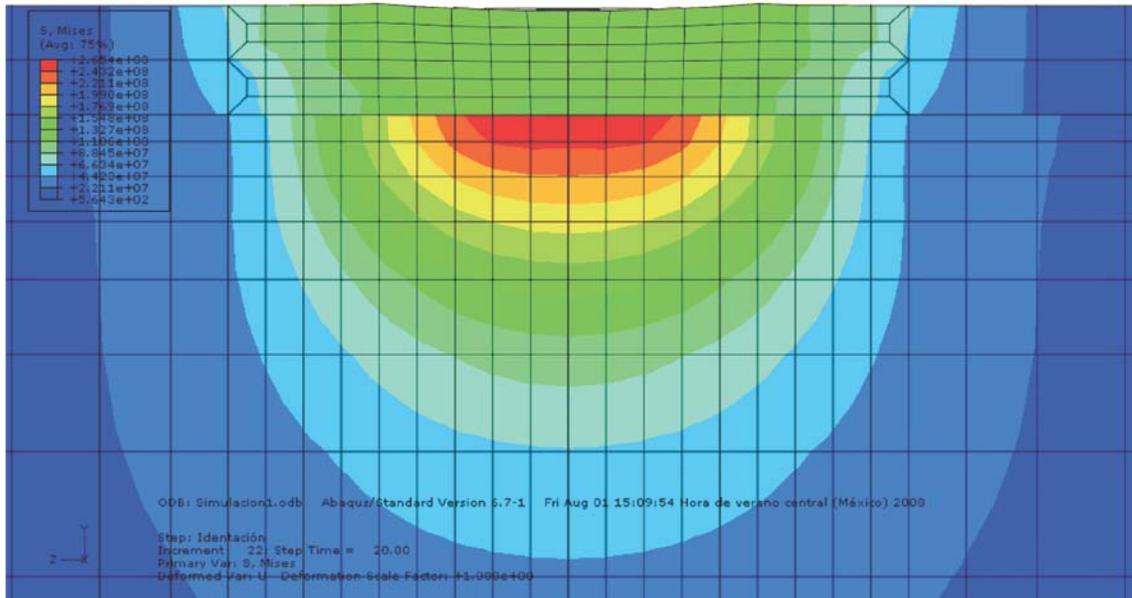


Fig. 3.20. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=20 [seg]. Con rotación.

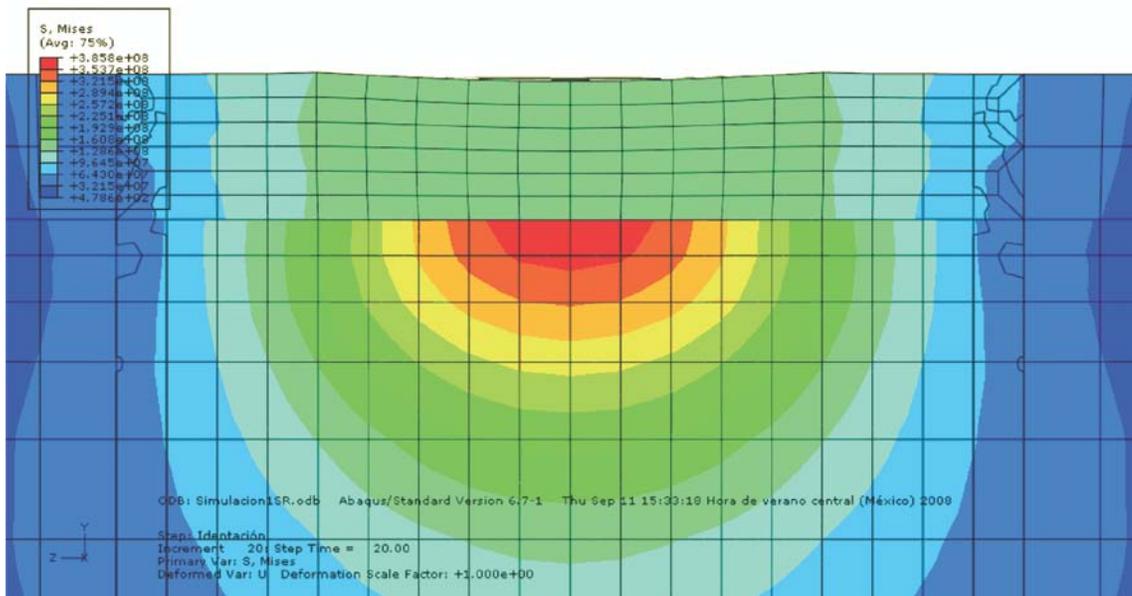


Fig. 3.21. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=20 [seg] Sin rotación.

Vista 2 de las multicapas. La capa de acero muestra los niveles más altos del esfuerzo de Von Mises porque tiene un módulo de Young grande. En ambas simulaciones será importante considerar los niveles de esfuerzos de Von Mises que se presentan en la unión de la aleación Al-Sn con el acero.

**Recocido 10 min., 180 [μm] de espesor, radio de curvatura: 4 [mm]
Deformación Plástica**

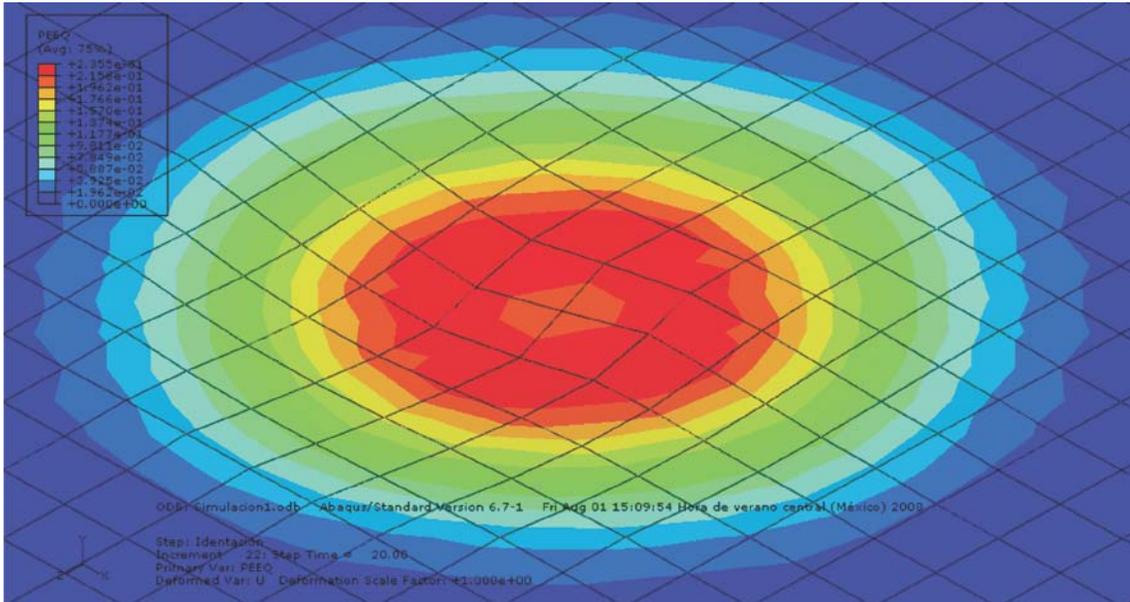


Fig. 3.22. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=20 [seg]. Con rotación.

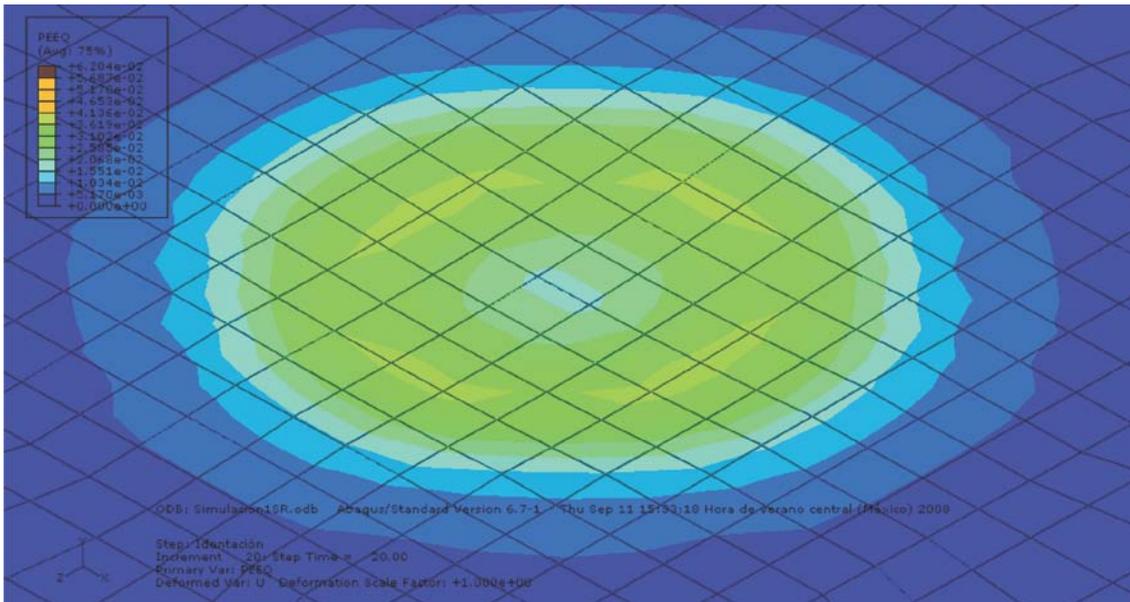


Fig. 3.23. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=20 [seg] Sin rotación.

Al finalizar las simulaciones, se observa el efecto de la rotación del perno en la multicapa. Este efecto hace que las mayores deformaciones plásticas se encuentren en la superficie en contacto con el perno, mientras que al quitar esta rotación, los niveles más altos de deformación plástica se encuentran cerca de la intercara Al-Sn/Acero. Por lo tanto, la unión entre la aleación Al-Sn y el acero será una zona importante a considerar en la prueba experimental para ambos casos, en especial si se omite la rotación del perno.

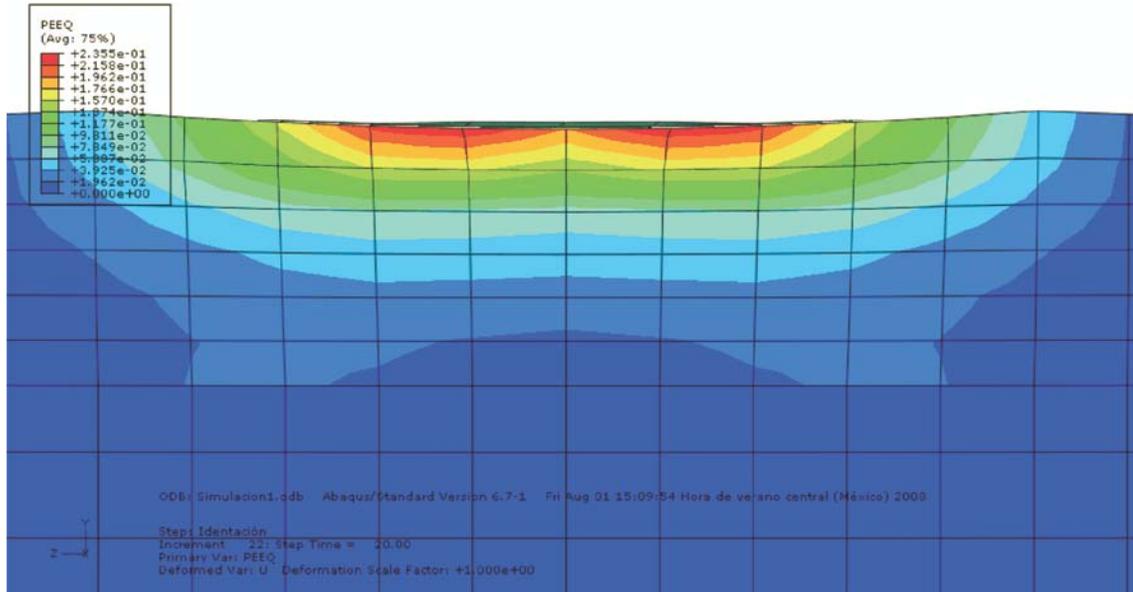


Fig. 3.24. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=20 [seg]. Con rotación.

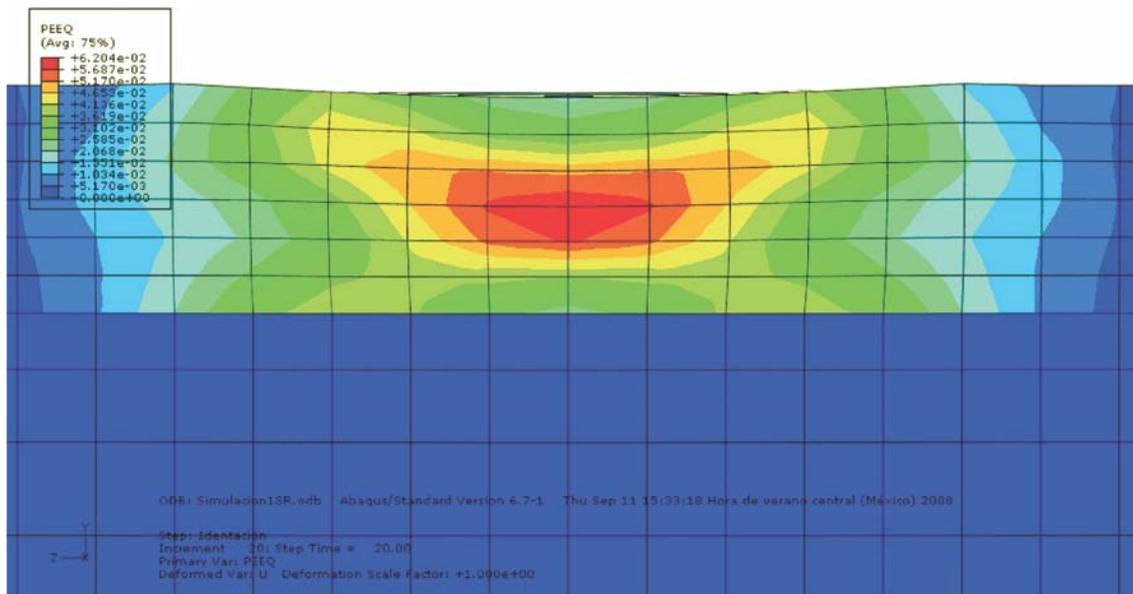
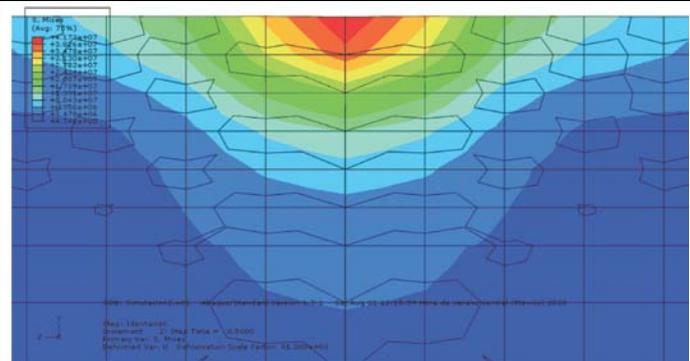
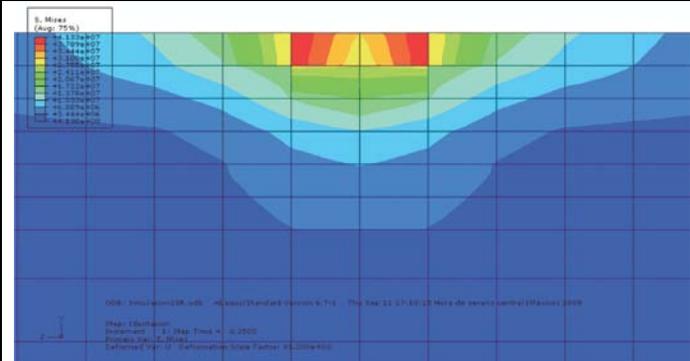
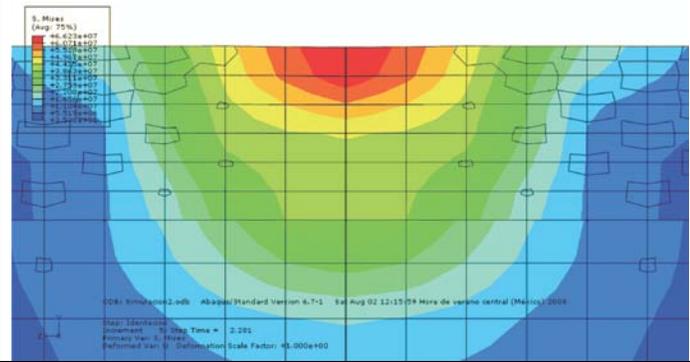
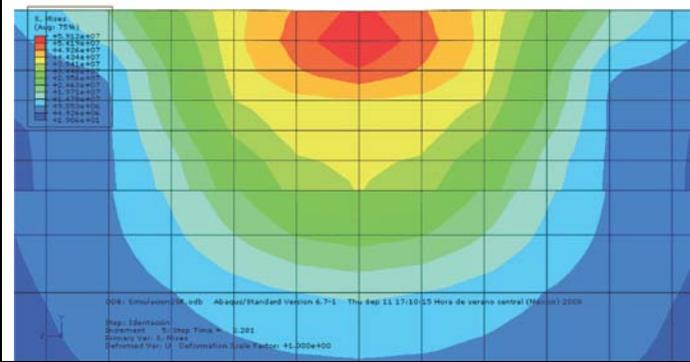
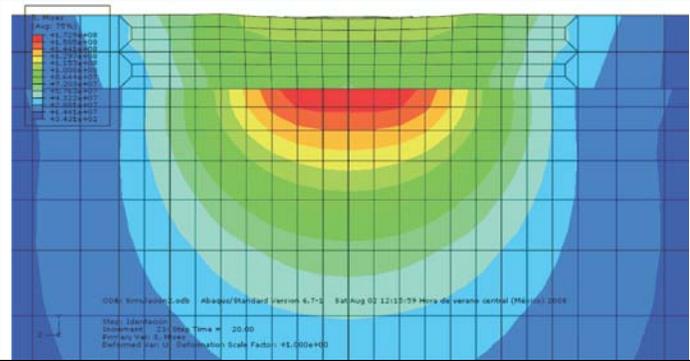
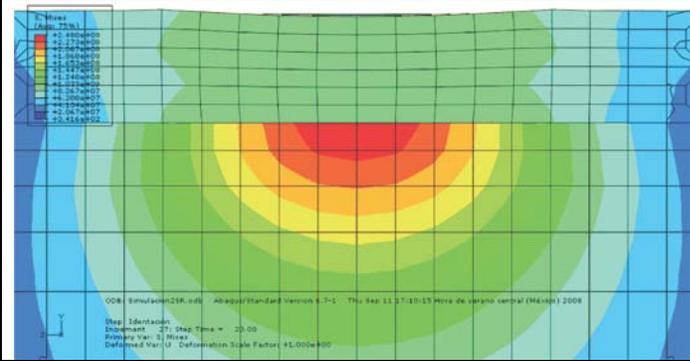


Fig. 3.25. ReX 10 min., 180 [μm], perno de 4 [mm], t=20 [seg] Sin rotación.

Vista lateral de las simulaciones en el último incremento de tiempo. Las mayores deformaciones plásticas se encuentran en la superficie que está en contacto con el perno; al quitar esta rotación, los niveles más altos de deformación plástica se encuentran cerca de la intercara Al-Sn/Acero. Con rotación hasta $\epsilon_{\text{real}}=2.355e-1$, y sin rotación hasta $\epsilon_{\text{real}}=6.204e-2$.

**Recocido 30 min., 180 [μm] de espesor, radio de curvatura: 4 [mm]
Esfuerzos de Von Mises**

Con rotación	Sin rotación
Punto 1	
	
<p>Fig. 3.26. El esfuerzo de V. Mises alcanza al esfuerzo de cedencia de la aleación, por lo que hay d. plástica. Su valor es de 41.73 [MPa] con 0.5 [seg] de tiempo.</p>	<p>Fig. 3.27. Aun sin la rotación del perno, el radio de curvatura induce d. plástica sobre la multicapa. El V. Mises es de 41.33 [MPa] en 0.25 [seg] de tiempo.</p>
Punto 2	
	
<p>Fig. 3.28. Al tiempo de 2.281 [seg], el esfuerzo de V. Mises ya es de 44.15 [MPa] en la capa de acero, por lo que la unión de Al también se deforma plásticamente.</p>	<p>Fig. 3.29. Sin la rotación del perno, el esfuerzo de V. Mises en la capa de acero y sobre la unión es aun mayor: 39.41 [MPa] y 2.281 [seg].</p>
Punto 3	
	
<p>Fig. 3.30. Se observa en la capa de acero los niveles más altos para el esfuerzo de V. Mises (172.9 [MPa]) porque tiene un módulo de Young alto.</p>	<p>Fig. 3.31. El esfuerzo de V. Mises se vuelve más alto sin rotación, y se encuentra en la capa de acero (248 [MPa]).</p>

**Recocido 30 min., 180 [μm] de espesor, radio de curvatura: 4 [mm]
Deformación plástica**

Con rotación	Sin rotación
--------------	--------------

Punto 1

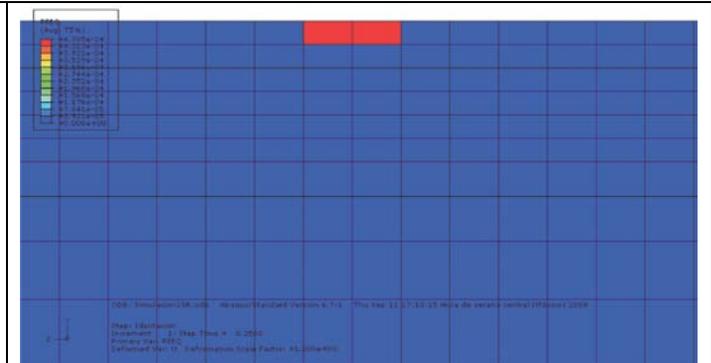
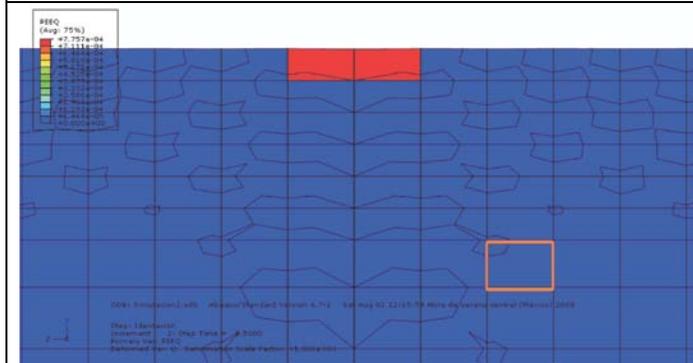


Fig. 3.32. Como se había mencionado, se observa que la deformación plástica comienza desde el primer incremento de tiempo.

Fig. 3.33. La deformación plástica inicia al primer incremento de tiempo, por lo que el radio de curvatura del perno es un parámetro de la deformación plástica.

Punto 2

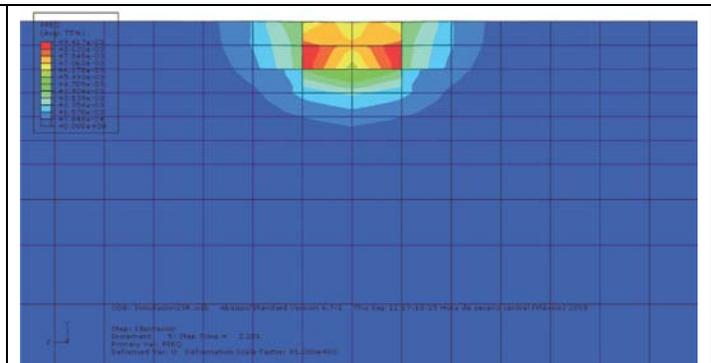
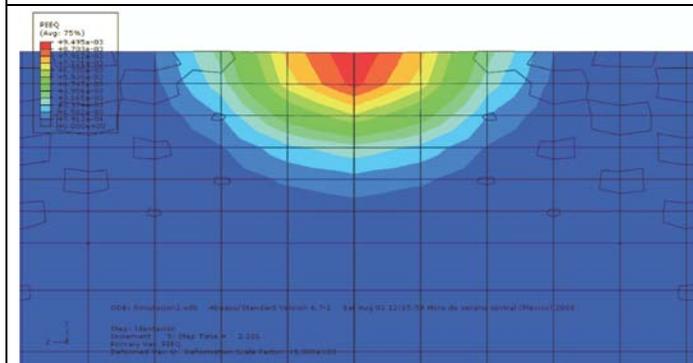


Fig. 3.34. Las mayores deformaciones se mantienen en la parte superior de la aleación (hasta $\epsilon_{real}=9.495e-3$) ya que se tendrá desprendimiento de material.

Fig. 3.35. La deformación plástica empieza a extenderse en la aleación (zona roja: $\epsilon_{real}=9.417e-3$). Esto es porque solamente se tiene avance en el perno.

Punto 3

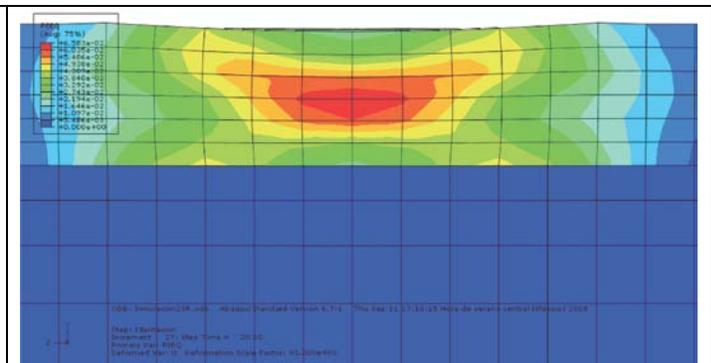
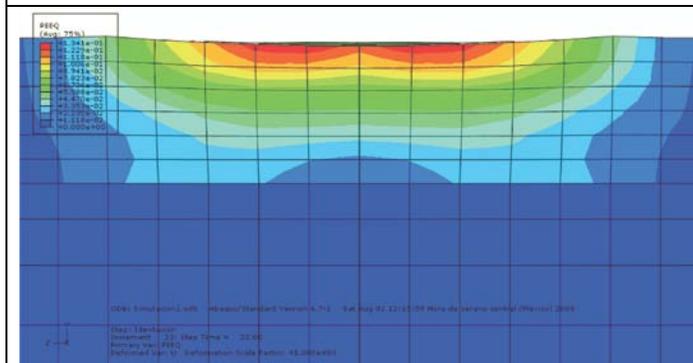
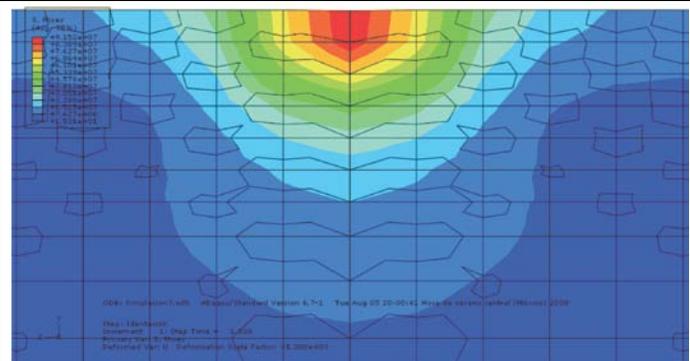
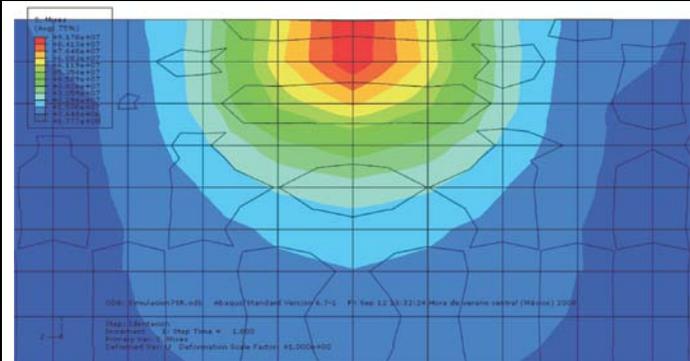
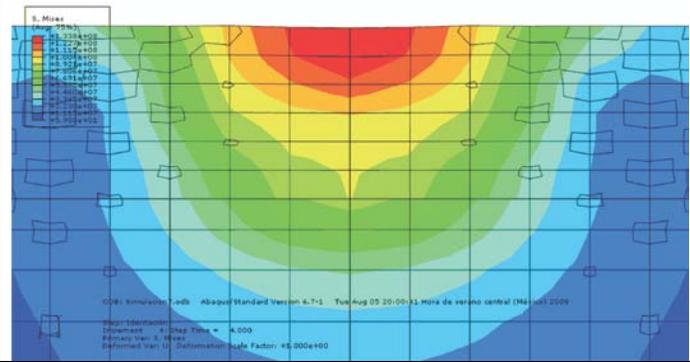
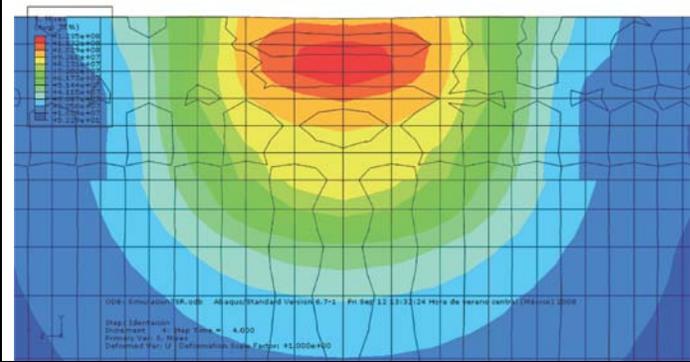
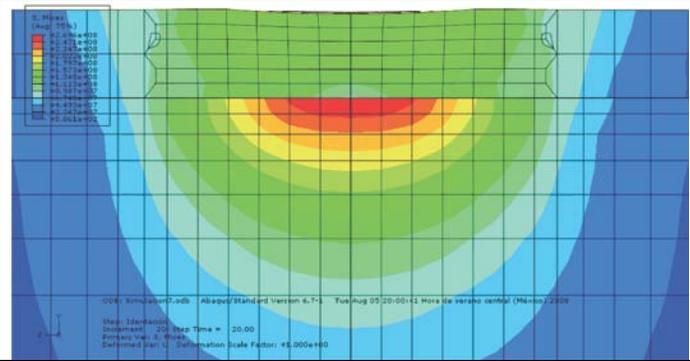
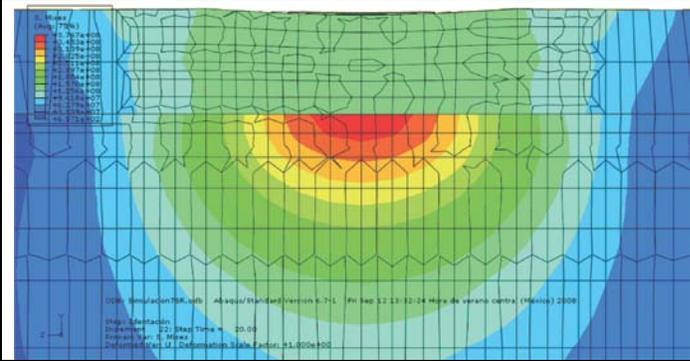


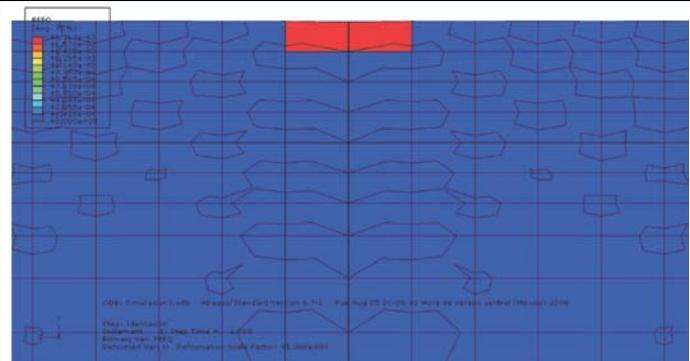
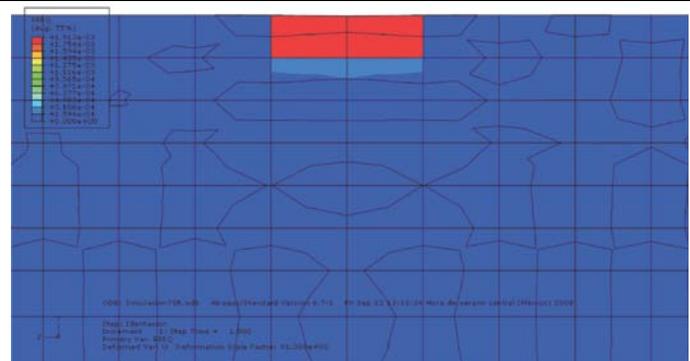
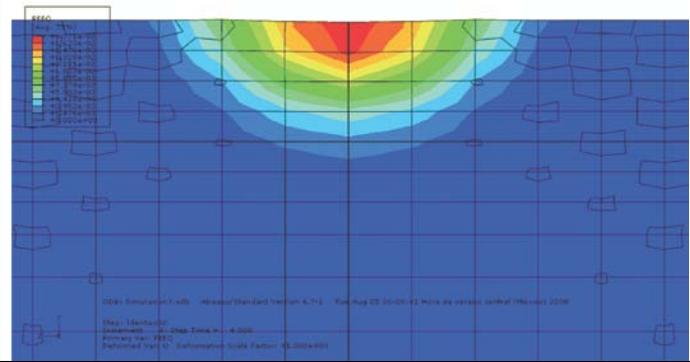
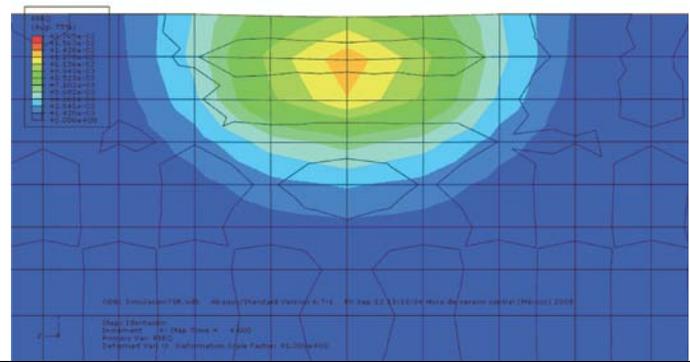
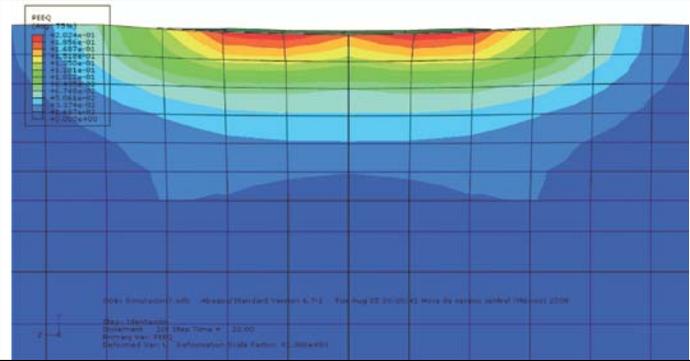
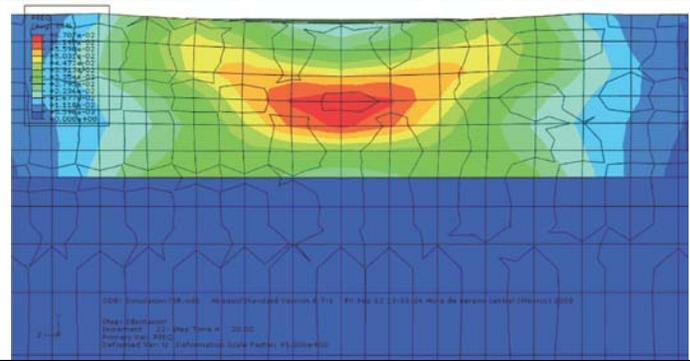
Fig. 3.36. Se observan grandes deformaciones plásticas sobre la parte superior de la aleación Al-Sn (hasta $\epsilon_{real}=1.341e-1$).

Fig. 3.37. La distribución de las mayores deformaciones plásticas (zona roja) se encuentran cerca de la intercara Al-Sn/Acero, donde se encuentra la unión entre la aleación y el acero (hasta $\epsilon_{real}=6.583e-2$).

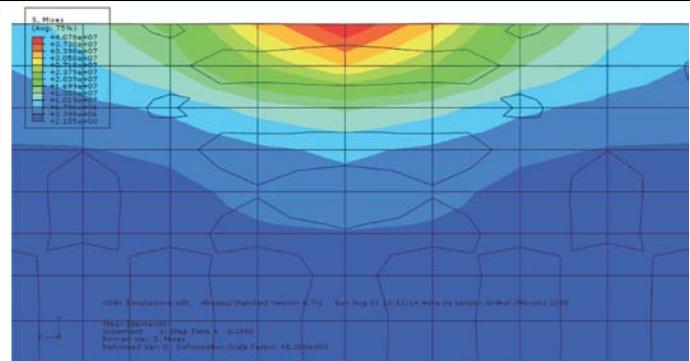
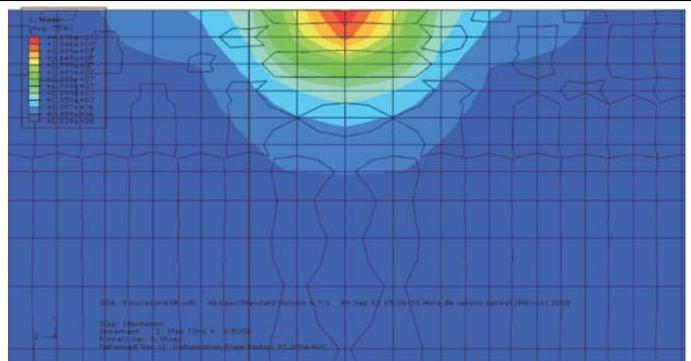
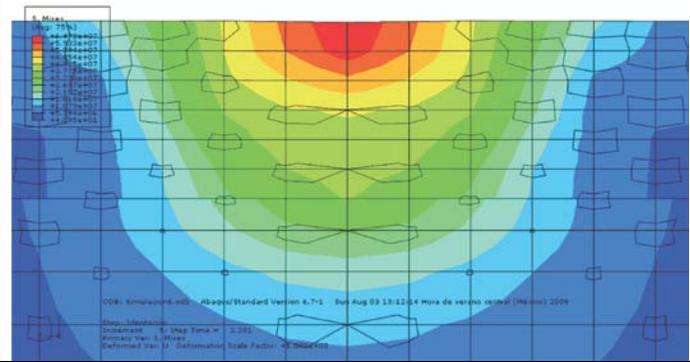
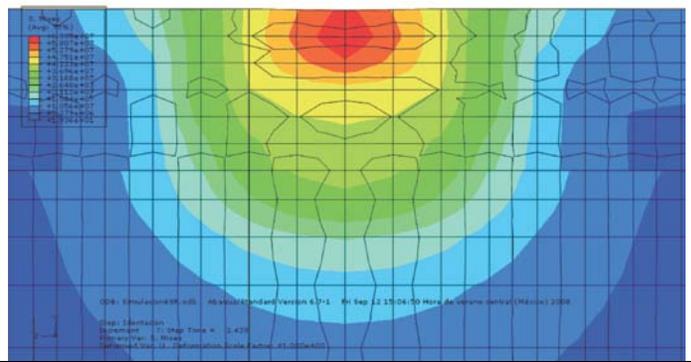
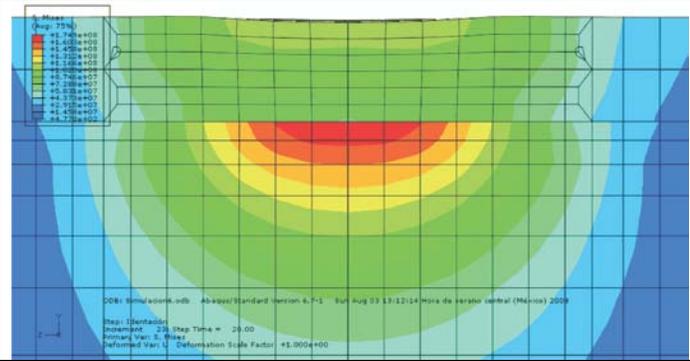
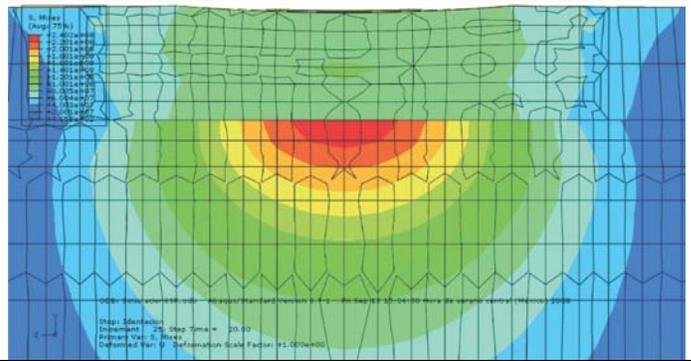
**Recocido 10 min., 240 [μm] de espesor, radio de curvatura: 4 [mm]
Esfuerzos de Von Mises**

Con rotación	Sin rotación
Punto 1	
	
<p>Fig. 3.38. La distribución del esfuerzo de V. Mises disminuye de la superficie al centro de la aleación (zona roja de 91.52 [MPa]).</p>	<p>Fig. 3.39. Se comienza a observar una mayor distribución del esfuerzo de V. Mises hacia el centro de la aleación (zona roja de 91.78 [MPa]).</p>
Punto 2	
	
<p>Fig. 3.40. El perfil del esfuerzo de V. Mises se ha extendido sobre la superficie de la aleación. Cerca de la unión entre el Al-Sn y el acero se tienen 90 [MPa].</p>	<p>Fig. 3.41. La zona roja del esfuerzo de V. Mises comienza a aumentar en el centro de la aleación. El V. Mises en la unión de Al-Sn y acero es de 92.6 [MPa].</p>
Punto 3	
	
<p>Fig. 3.42. El perno llegó a su posición final, y la capa de acero muestra los esfuerzos de V. Mises más altos (zona roja de 376.7 [MPa]).</p>	<p>Fig. 3.43. Se observa la mayor zona de esfuerzos en la capa de acero (376.7 [MPa]); sin embargo, en la aleación es menor si se compara con la simulación con rotación.</p>

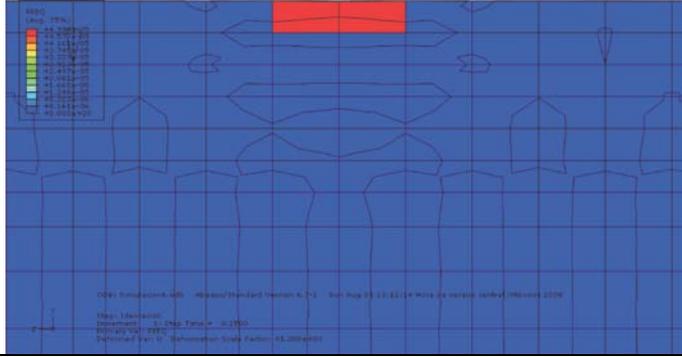
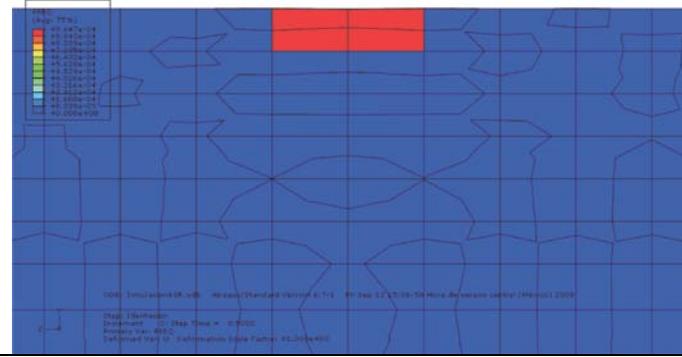
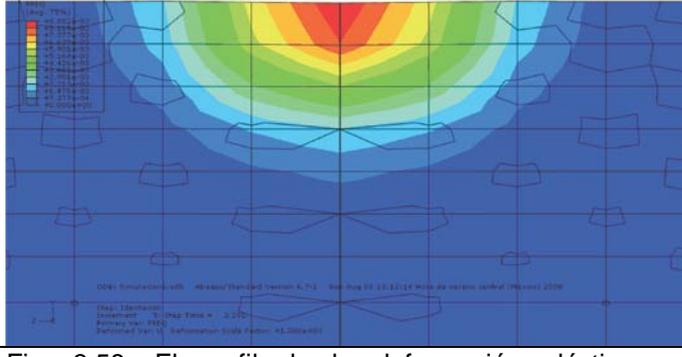
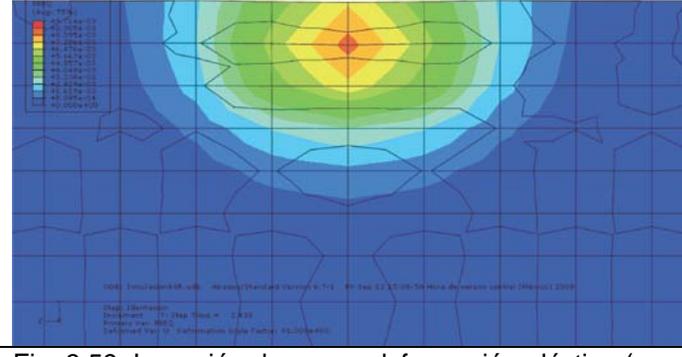
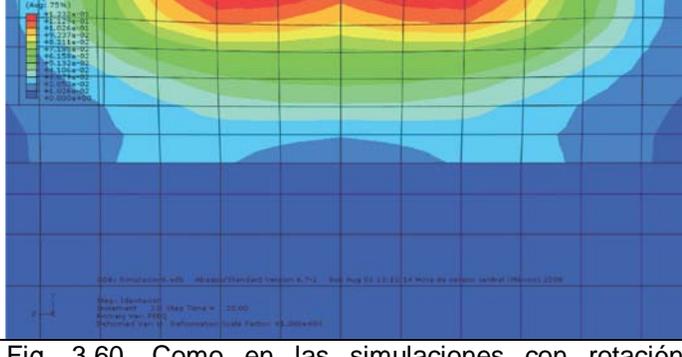
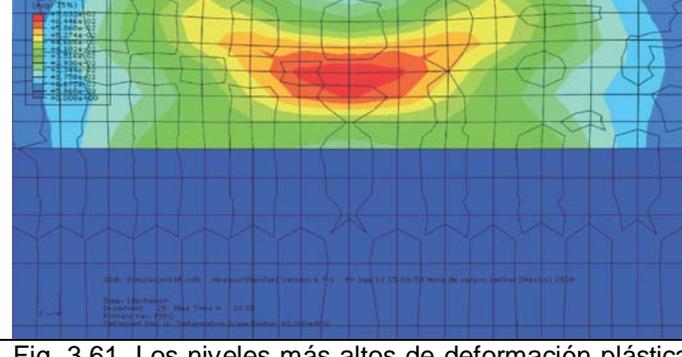
**Recocido 10 min., 240 [μm] de espesor, radio de curvatura: 4 [mm]
Deformación plástica**

Con rotación	Sin rotación
Punto 1	
	
Fig. 3.44. La deformación plástica comienza por el radio de curvatura pequeño del perno.	Fig. 3.45. Aun sin rotación y un mayor espesor en la multicapa, comienza la deformación plástica por el perno.
Punto 2	
	
Fig. 3.46. Se aprecia en la figura que la mayor deformación plástica está en la superficie de la aleación.	Fig. 3.47. Los niveles más altos de deformación plástica se encuentran hacia el centro de la aleación, cerca de la unión entre el Al-Sn y el acero.
Punto 3	
	
Fig. 3.48. La zona roja muestra los niveles más altos de deformación plástica cuando el perno llega a su posición final.	Fig. 3.49. El perno se encuentra en su posición final; y la mayor deformación plástica está cerca de la intercara Al-Sn/Acero (unión de la multicapa).

**Recocido 30 min., 240 [μm] de espesor, radio de curvatura: 4 [mm]
Esfuerzos de Von Mises**

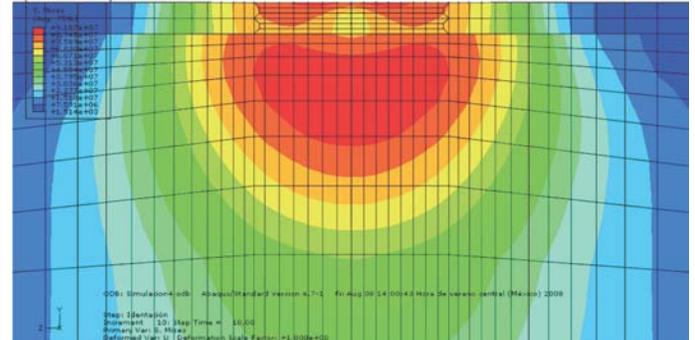
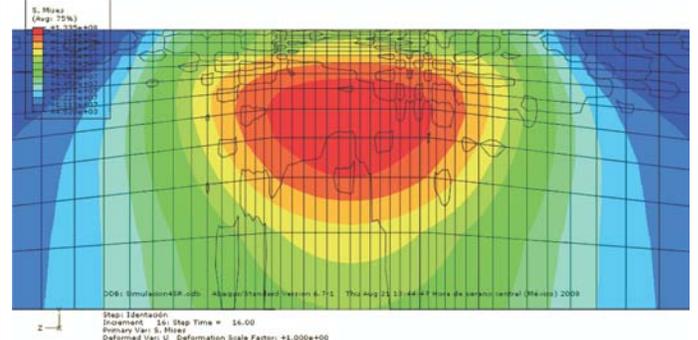
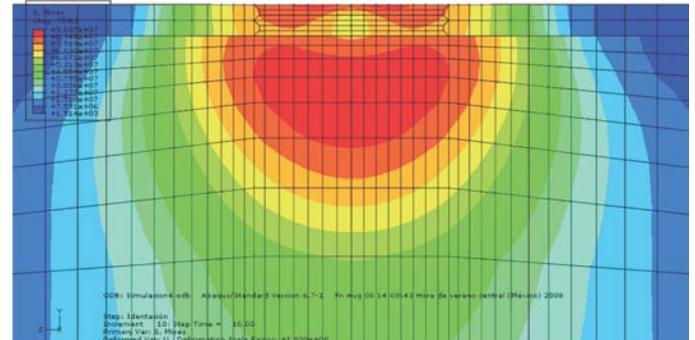
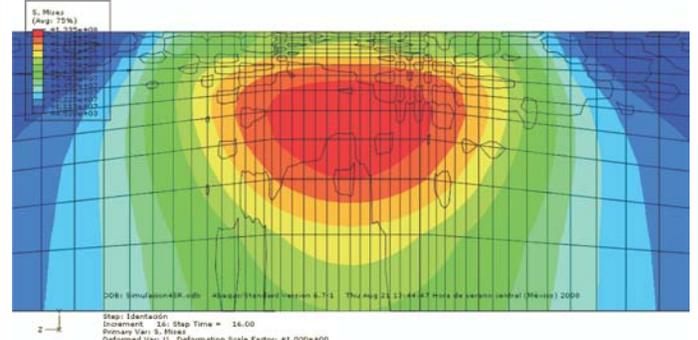
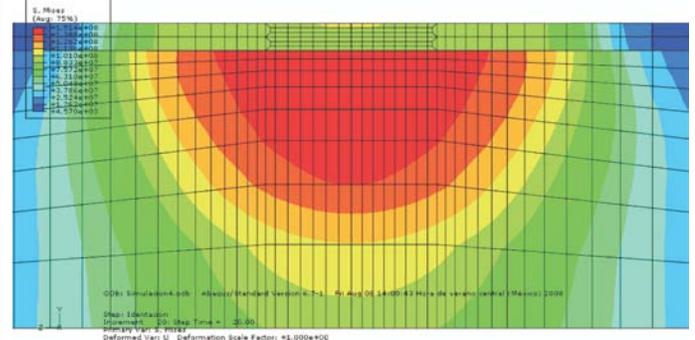
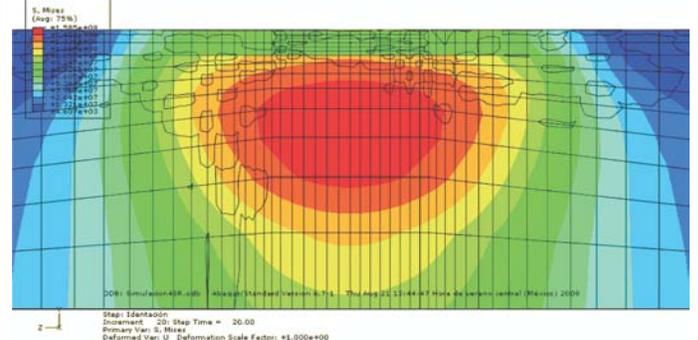
Con rotación	Sin rotación
Punto 1	
	
Fig. 3.50. El esfuerzo de V. Mises está más distribuido a lo largo de la superficie de la aleación.	Fig. 3.51. El comienzo de la deformación plástica ocurre después si se quita la rotación.
Punto 2	
	
Fig. 3.52. La zona verde del esfuerzo de V. Mises es suficiente para inducir deformación plástica. 40 [MPa] en 2.281 [seg] de tiempo.	Fig. 3.53. El perfil del esfuerzo de V. Mises se muestra más concentrado al centro de la multicapa; la zona verde es de 42 [MPa], al tiempo de 2.439 [seg].
Punto 3	
	
Fig. 3.54. Como en las simulaciones anteriores, los niveles más altos de esfuerzos se encuentran en la capa de acero. Hasta 174.9 [MPa].	Fig. 3.55. Aun sin rotación, los esfuerzos de V. Mises más altos están en la capa de acero; sin embargo, en la aleación disminuyen. Hasta 240.2 [MPa].

**Recocido 30 min., 240 [μm] de espesor, radio de curvatura: 4 [mm]
Deformación plástica**

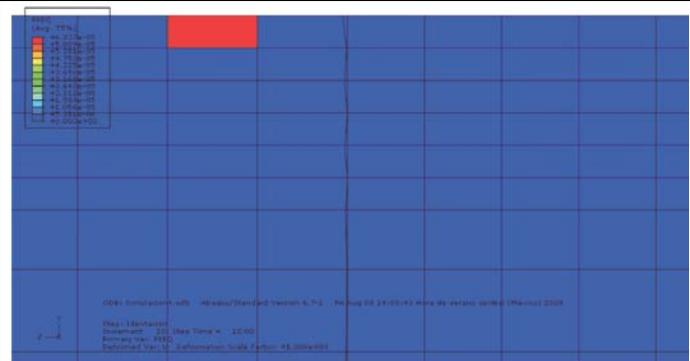
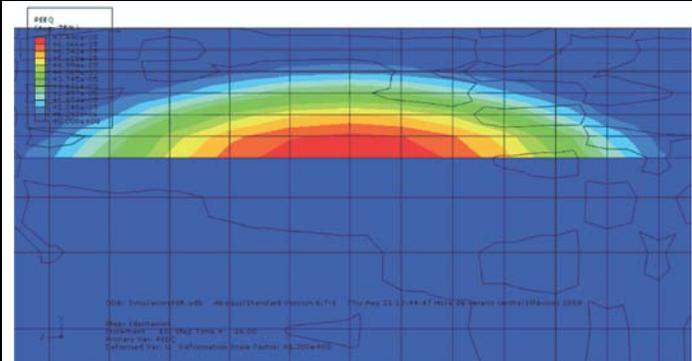
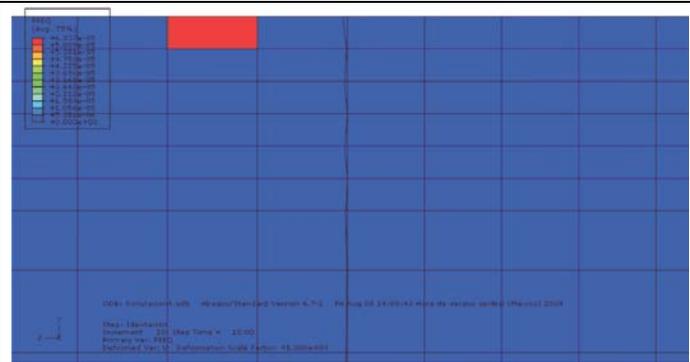
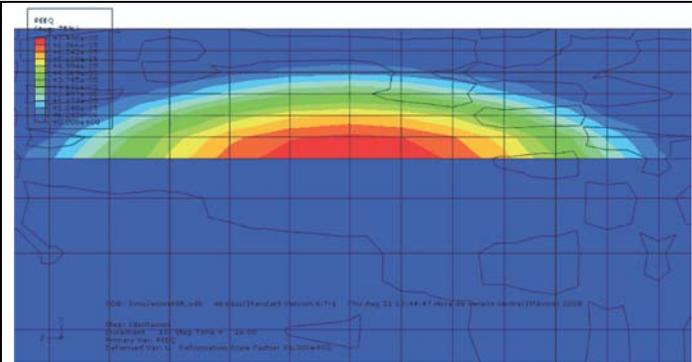
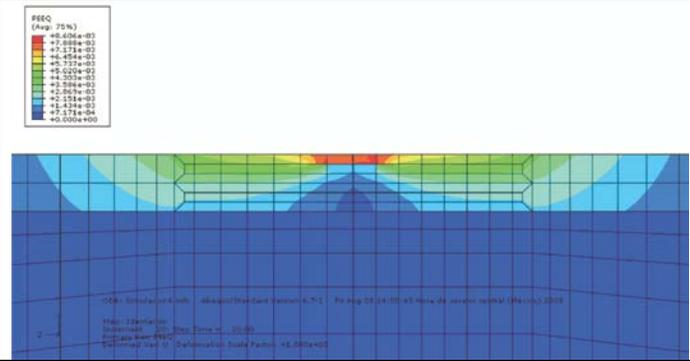
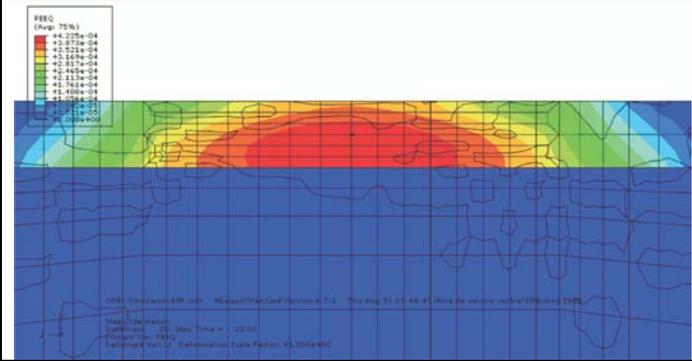
Con rotación	Sin rotación
Punto 1	
	
Fig. 3.56. Como se ha visto, este perno induce rápidamente deformación plástica en la aleación.	Fig. 3.57. La deformación plástica comienza después si se elimina la rotación del perno.
Punto 2	
	
Fig. 3.58. El perfil de la deformación plástica se concentra sobre la superficie de la aleación y disminuye hacia los alrededores.	Fig. 3.59. La región de mayor deformación plástica (zona roja) cambia al quitar la rotación del perno, y se desplaza hacia el centro de la aleación.
Punto 3	
	
Fig. 3.60. Como en las simulaciones con rotación anteriores, las mayores deformaciones plásticas ocurren en la superficie de la aleación, ya que habrá desgaste posterior en la multicapa.	Fig. 3.61. Los niveles más altos de deformación plástica se encuentran cerca de la intercara Al-Sn/Acero. Nuevamente la unión de la multicapa será una zona crítica.

3.3.2. Perno de desgaste de 1 [m] de radio de curvatura.

Recocido 10 min., 180 [μm] de espesor, radio de curvatura: 1 [m]
Esfuerzos de Von Mises

Con rotación	Sin rotación
Punto 1	
	
<p>Fig. 3.62. Se requirieron más incrementos de tiempo (10 [seg]) para que empezara la deformación plástica en la aleación. Hasta 91.07 [MPa] (zona roja).</p>	<p>Fig. 3.63. La distribución del V. Mises es parecida sin rotación; en ambas se aprecia la gran zona de contacto. Pasaron 16 [seg] de la prueba; hasta 133.5 [MPa].</p>
Punto 2	
	
<p>Fig. 3.64. Los niveles de esfuerzos de V. Mises más altos ya se observan en la capa de acero desde el inicio; la unión de la multicapa tendrá condiciones más severas al tener un área de contacto más grande.</p>	<p>Fig. 3.65. Aun sin rotación, el esfuerzo de V. Mises ha ido creciendo sobre la capa de acero. Sin embargo, el perfil de esfuerzos de V. Mises disminuye en la aleación.</p>
Punto 3	
	
<p>Fig. 3.66. Al finalizar, se aprecia una gran zona de contacto y la distribución del esfuerzo de V. Mises creció desde el principio sobre la capa de acero.</p>	<p>Fig. 3.67. Aun sin rotación, se observa un perfil de esfuerzos de V. Mises similar; sin embargo, se sigue teniendo un menor nivel de esfuerzos sobre la aleación.</p>

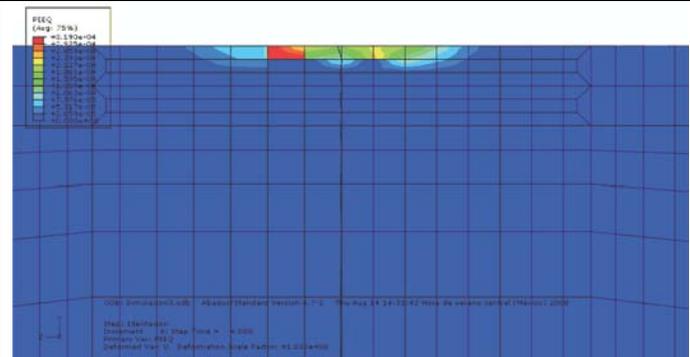
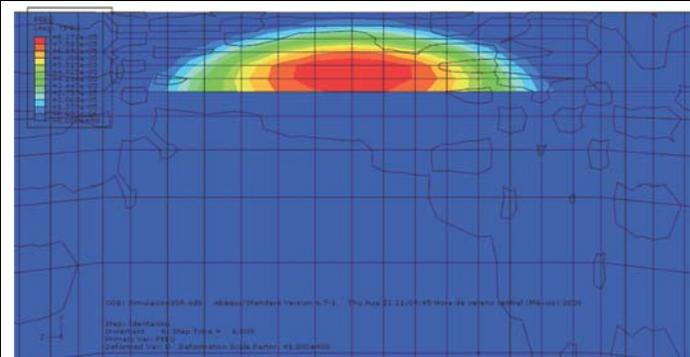
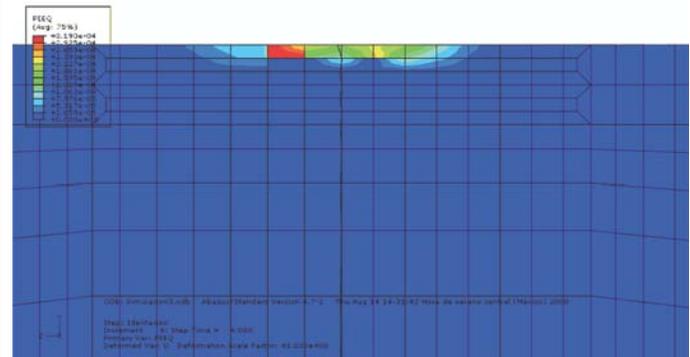
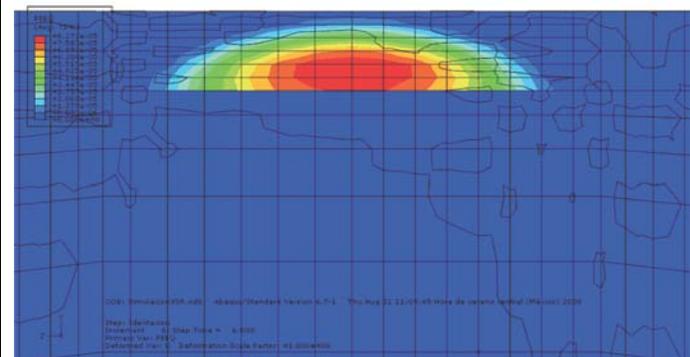
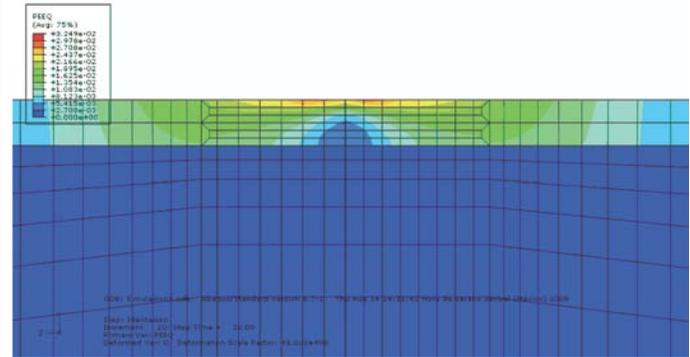
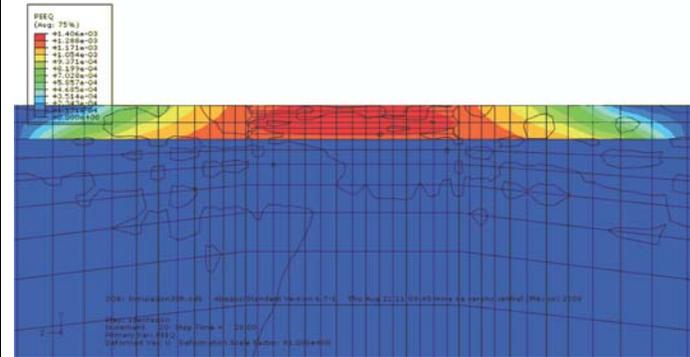
**Recocido 10 min., 180 [μm] de espesor, radio de curvatura: 1 [m]
Deformación plástica**

Con rotación	Sin rotación
Punto 1	
	
<p>Fig. 3.68. La deformación plástica ocurre sobre la superficie de la aleación, pero se requirieron varios incrementos de tiempo para lograrlo (10 [seg]).</p>	<p>Fig. 3.69. Sin la rotación del perno, se necesitaron aun más incrementos de tiempo; además el inicio de la deformación plástica ocurre en la unión Al-Sn/Acero.</p>
Punto 2	
	
<p>Fig. 3.70. La zona del esfuerzo de V. Mises que supera al esfuerzo de cedencia de la aleación ya se encuentra en la capa de acero.</p>	<p>Fig. 3.71. La deformación plástica se desplaza desde la intercara (unión) Al-Sn/Acero hacia la superficie de la aleación.</p>
Punto 3	
	
<p>Fig. 3.72. Al finalizar, se obtienen niveles de deformación plástica menores que con el radio de curvatura de 4 [mm].</p>	<p>Fig. 3.73. Al finalizar el paso, se observa una gran deformación plástica cerca de la intercara Al-Sn/Acero, zona donde se encuentra la unión de la multicapa.</p>

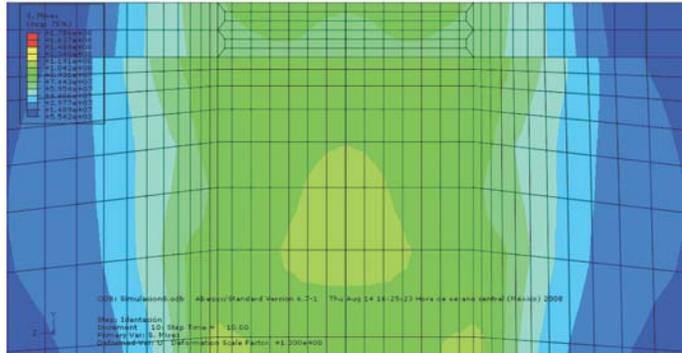
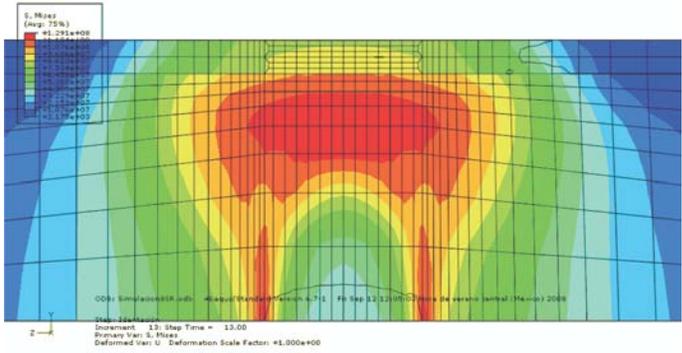
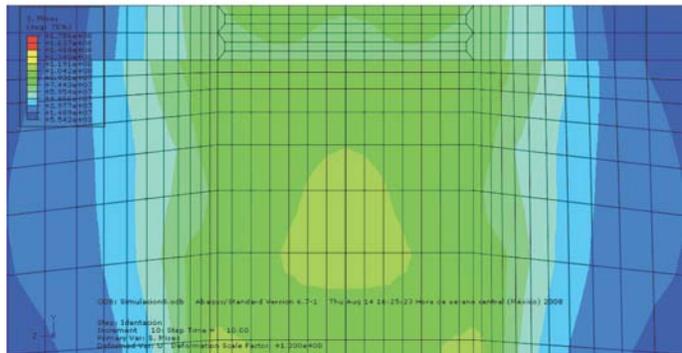
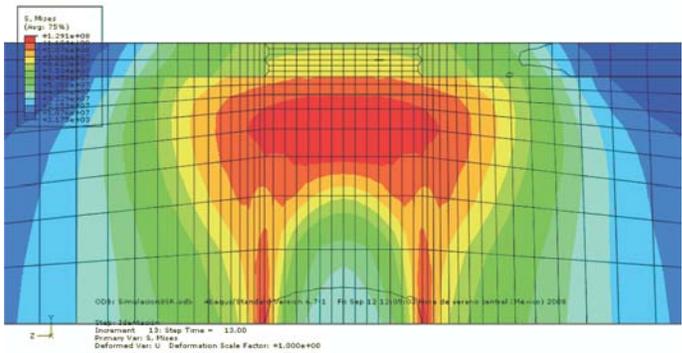
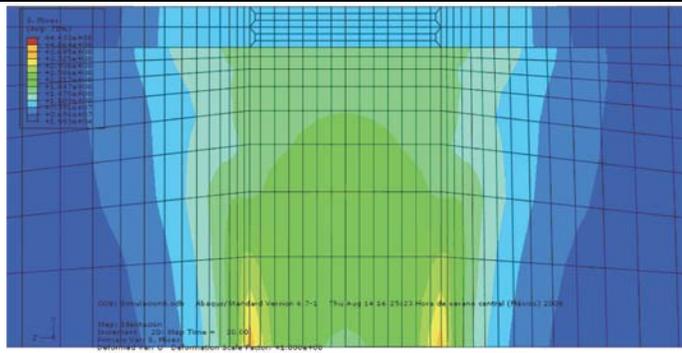
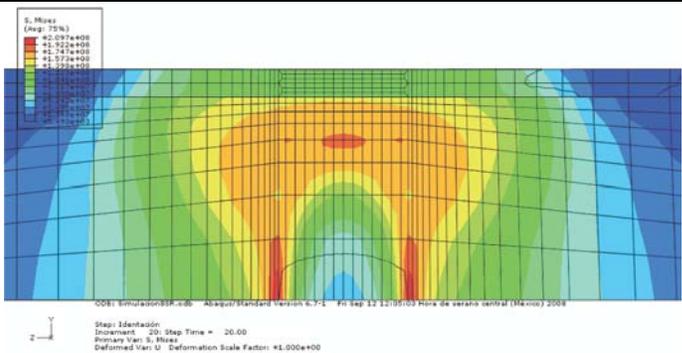
**Recocido 30 min., 180 [μm] de espesor, radio de curvatura: 1 [m]
Esfuerzos de Von Mises**

Con rotación	Sin rotación
Punto 1	
<p>Fig. 3.74. El perfil de esfuerzos de V. Mises se mantiene igual, sin importar que se cambie el tiempo de recocido en la aleación. 4 [seg] y hasta 44.34 [MPa].</p>	<p>Fig. 3.75. El perfil de esfuerzos de V. Mises es similar; sin embargo se requirieron más incrementos de tiempo. Tiempo de 6 [seg] y hasta 60.23 [MPa].</p>
Punto 2	
<p>Fig. 3.76. En este instante (4 [seg]), el esfuerzo de V. Mises necesario para iniciar deformación plástica ya ha llegado a la unión de la multicapa.</p>	<p>Fig. 3.77. Debido a la gran área de contacto y la rigidez del acero, el esfuerzo de V. Mises en el acero supera por mucho al de la aleación.</p>
Punto 3	
<p>Fig. 3.78. Los niveles de esfuerzos de V. Mises en la aleación son mayores que en el modelo sin rotación. En la aleación hasta 86.74 [MPa].</p>	<p>Fig. 3.79. Se observa un perfil similar en el esfuerzo de V. Mises, pero con niveles de esfuerzos menores en la aleación. En la aleación hasta 50.14 [MPa].</p>

**Recocido 30 min., 180 [μm] de espesor, radio de curvatura: 1 [m]
Deformación plástica**

Con rotación	Sin rotación
Punto 1	
	
<p>Fig. 3.80. El comienzo de la deformación empieza con menos incrementos de tiempo. Tiempo de 4 [seg].</p>	<p>Fig. 3.81. Se observa como la deformación plástica comienza en la intercara Al-Sn/Acero, zona donde está la unión de la multicapa. Tiempo de 6 [seg].</p>
Punto 2	
	
<p>Fig. 3.82. En el mismo incremento (4 [seg]), el esfuerzo de V. Mises mínimo que genera deformación ya está en el acero.</p>	<p>Fig. 3.83. En general, el punto 1 y 2 son el mismo con perno de 1 [m], porque el esfuerzo de V. Mises que induce d. plástica ya está en el acero. Tiempo de 6 [seg].</p>
Punto 3	
	
<p>Fig. 3.84. La mayor cantidad de deformación plástica sigue presentándose en la superficie de la aleación. Hasta $\epsilon_{real}=3.249e-2$.</p>	<p>Fig. 3.85. Al finalizar, se observa la mayor cantidad de deformación plástica en el centro de la aleación (zona roja). Hasta $\epsilon_{real}=1.406e-3$</p>

**Recocido 10 min., 240 [μm] de espesor, radio de curvatura: 1 [m]
Esfuerzos de Von Mises**

Con rotación	Sin rotación
Punto 1	
	
<p>Fig. 3.86. Se requieren más incrementos de tiempo (10 [seg]) para generar deformación plástica. Hasta 74.43 [MPa] en la aleación.</p>	<p>Fig. 3.87. Con la gran curvatura y sin rotación del perno, se requiere aun más tiempo (13 [seg]) para iniciar deformación. Hasta 96.86 [MPa] en la aleación.</p>
Punto 2	
	
<p>Fig. 3.88. En el mismo instante (10 [seg]), se observa una gran zona de contacto que contiene esfuerzos de V. Mises elevados localizados en ambas capas.</p>	<p>Fig. 3.89. La zona de contacto es grande, pero los niveles de esfuerzos son elevados en ambas capas sin la rotación del perno.</p>
Punto 3	
	
<p>Fig. 3.90. Al finalizar, se mantiene un elevado nivel de esfuerzos (73.91 [MPa]) sobre la aleación Al-Sn que rebasa a su límite de cedencia.</p>	<p>Fig. 3.91. Los niveles de esfuerzos en la aleación se concentran hacia el centro de la multicapa cuando se omite la rotación del perno.</p>

**Recocido 10 min., 240 [μm] de espesor, radio de curvatura: 1 [m]
Deformación plástica**

Con rotación	Sin rotación
Punto 1	
<p>Fig. 3.92. En la figura se observa el comienzo de la deformación plástica, aun muy localizada en la aleación. Tiempo de modelado de 10 [seg].</p>	<p>Fig. 3.93. Quitando la rotación del perno, la deformación plástica comienza en la intercara Al-Sn/Acero. Tiempo de 13 [seg].</p>
Punto 2	
<p>Fig. 3.94. En este mismo instante (10 [seg]), los niveles más altos del esfuerzo de V. Mises ya están en la capa de acero, capaces de inducir d. plástica.</p>	<p>Fig. 3.95. En este mismo incremento de tiempo (13 [seg]), la capa de acero ya muestra grandes esfuerzos de V. Mises.</p>
Punto 3	
<p>Fig. 3.96. La rotación del perno induce d. Plástica sobre la superficie de la aleación, zona donde empezará el desgaste de la multicapa. Hasta $\epsilon_{real}=3.406e-3$.</p>	<p>Fig. 3.97. La figura muestra la zona tan amplia de deformación plástica, que creció a partir del acero. Hasta $\epsilon_{real}=8.179e-4$.</p>

**Recocido 30 min., 240 [μm] de espesor, radio de curvatura: 1 [m]
Esfuerzos de Von Mises**

Con rotación	Sin rotación
--------------	--------------

Punto 1

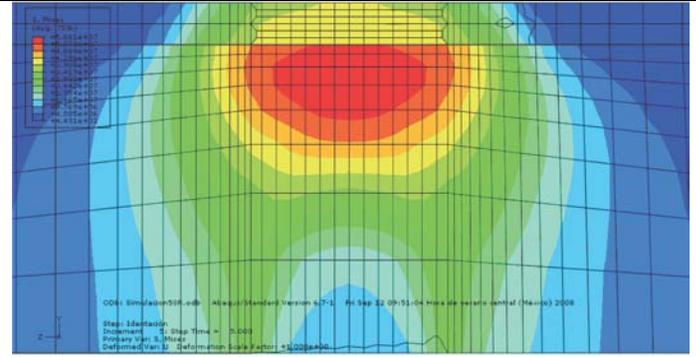
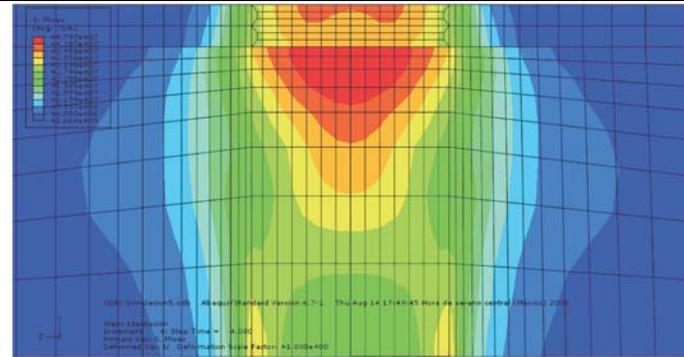


Fig. 3.98. Los niveles más altos del esfuerzo de V. Mises ya están en el acero, a pesar de que se utiliza un espesor y material diferente. 43.97 [MPa] en la aleación.

Fig. 3.99. La distribución es parecida sin rotación, sin embargo en la superficie de la aleación los esfuerzos son menores. Hasta 43.96 [MPa] en 5 [seg] de modelado.

Punto 2

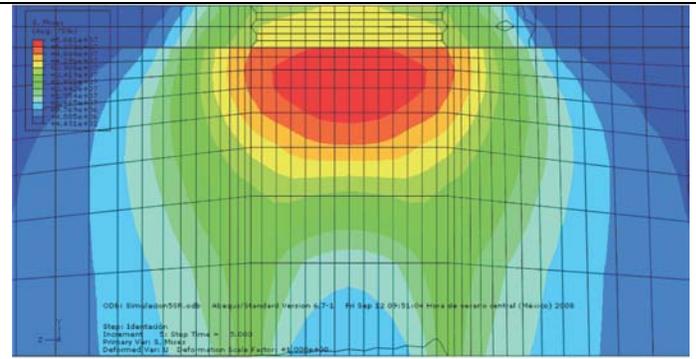
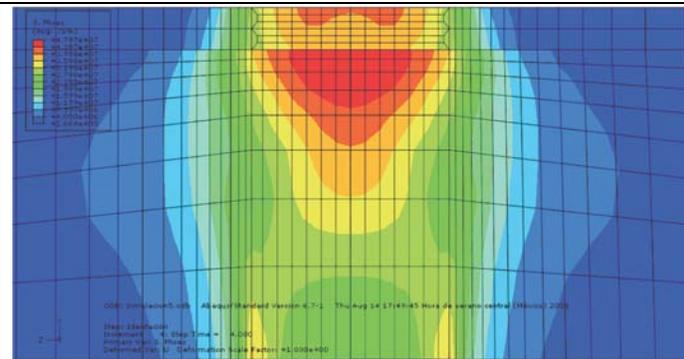


Fig. 3.100. Para este mismo instante (4 [seg]), la deformación plástica comienza en la aleación.

Fig. 3.101. Los niveles de esfuerzos mostrados en la figura inducen deformación plástica en la aleación. Tiempo de modelado de 5 [seg].

Punto 3

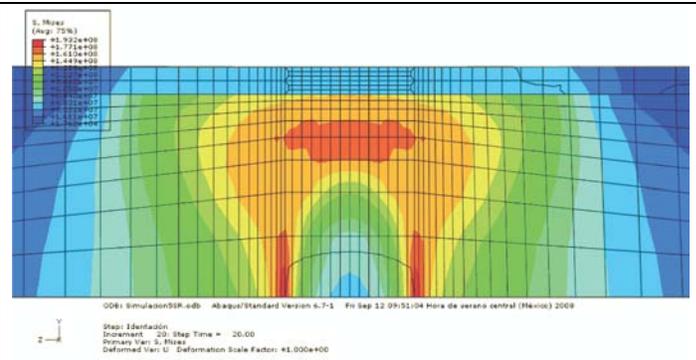
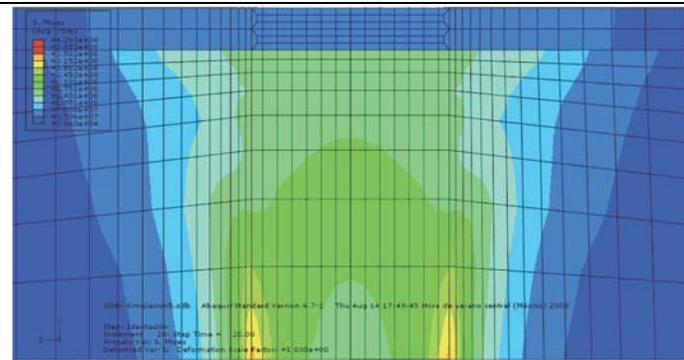


Fig. 3.102. Al finalizar el tiempo de modelado, se observa que la capa de acero posee los mayores niveles de esfuerzos de V. Mises. Hasta 35.06 [MPa] en la aleación.

Fig. 3.103. La figura muestra una distribución de esfuerzos de V. Mises concentrada en el centro de la multicapa. Hasta 32.21 [MPa] en la aleación.

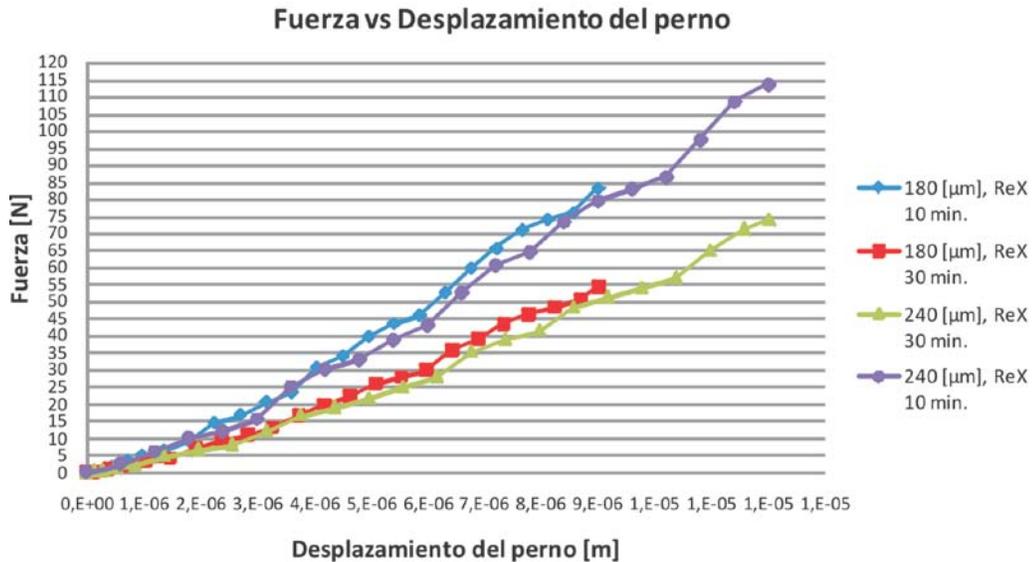
**Recocido 30 min., 240 [μm] de espesor, radio de curvatura: 1 [m]
Deformación plástica**

Con rotación	Sin rotación
Punto 1	
<p>Fig. 3.104. Como hemos visto, la rotación del perno es crucial en el comienzo de la deformación plástica sobre la aleación. Tiempo de modelado de 4 [seg].</p>	<p>Fig. 3.105. Aun sin rotación, la deformación plástica se presenta, y está cerca de la intercara Al-Sn/Acero. Tiempo de 5 [seg].</p>
Punto 2	
<p>Fig. 3.106. Se muestra el mismo instante (4 [seg]) porque se tienen los niveles más altos de esfuerzos en ambas capas.</p>	<p>Fig. 3.107. Para este instante (5 [seg]), el esfuerzo de V. Mises máximo se encuentra en ambas capas.</p>
Punto 3	
<p>Fig. 3.108. Al final, la rotación del perno es importante porque genera deformaciones plásticas representativas sobre la aleación. Hasta $\epsilon_{real}=1.149e-3$ en la aleación.</p>	<p>Fig. 3.109. Finalmente, la deformación plástica llega a la superficie de la aleación. Hasta $\epsilon_{real}=1.869e-3$ en la aleación.</p>

3.3.3. Gráficas de los resultados.

Se obtuvieron las reacciones de la fuerza y el momento sobre el perno de desgaste; es decir, sobre el punto de referencia asociado a éste. También se obtuvieron el esfuerzo de Von Mises y la deformación plástica que se produce en la multicapa. Todas las gráficas están comparadas con el desplazamiento del perno.

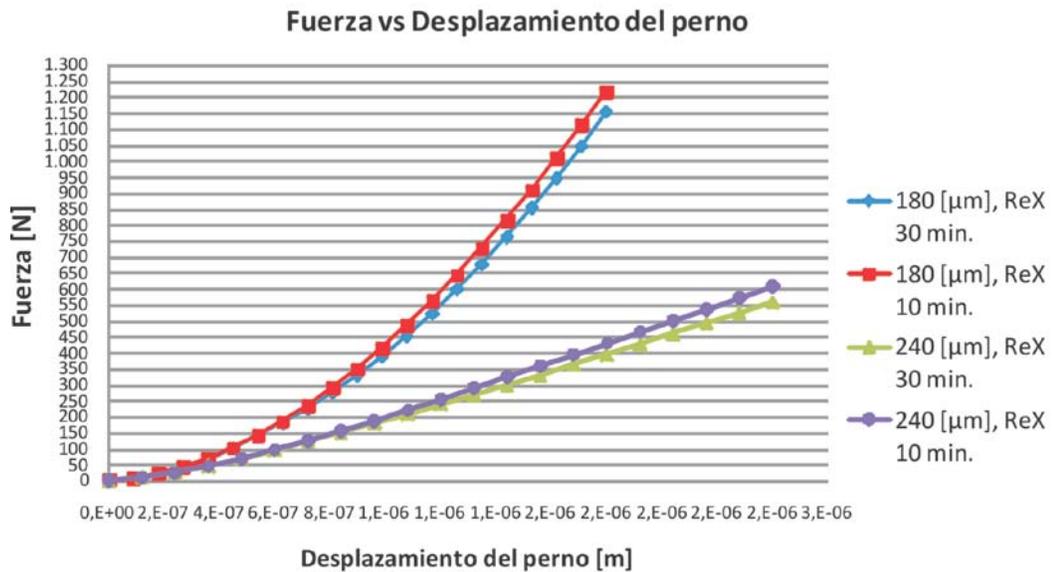
Perno con 4 [mm] de radio de curvatura, con rotación



Perno con 4 [mm] de radio de curvatura, sin rotación



Perno con 1 [m] de radio de curvatura, con rotación

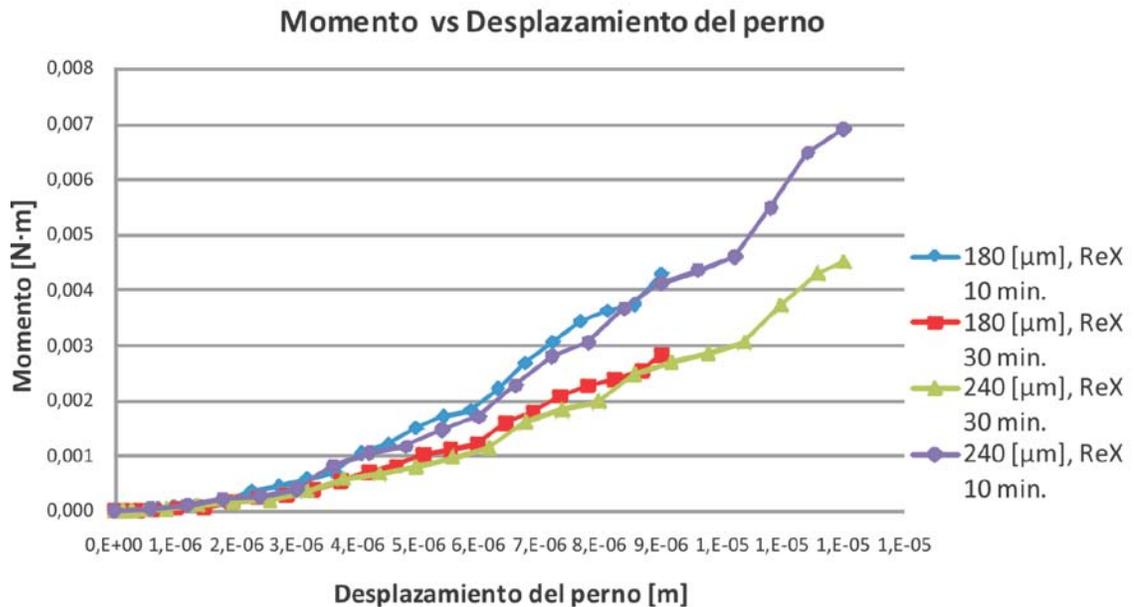


Perno con 1 [m] de radio de curvatura, sin rotación

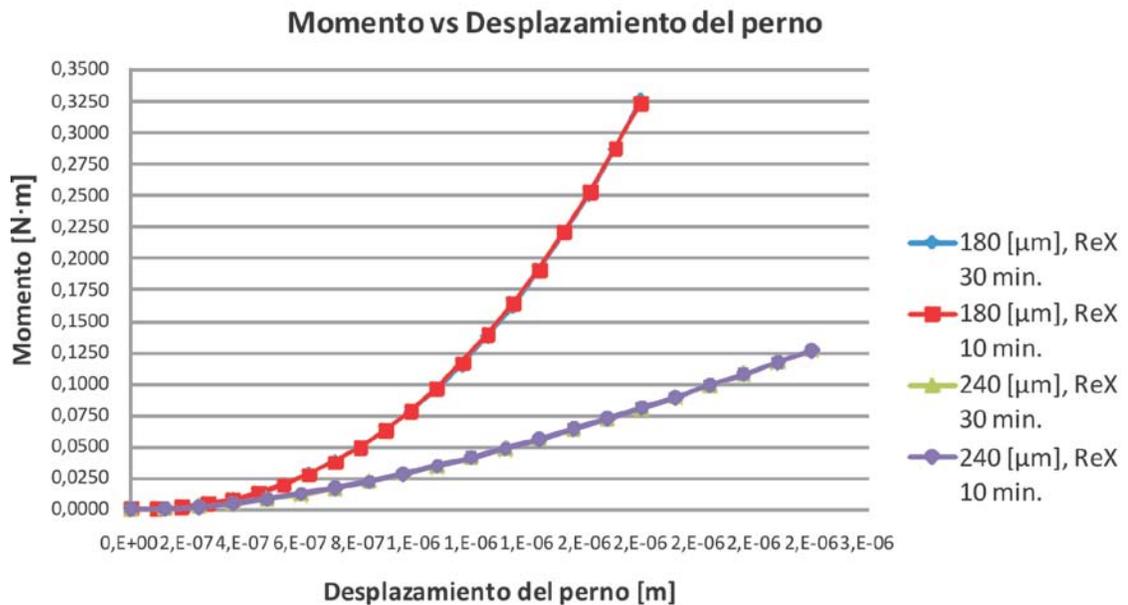


En las gráficas se observa una gran diferencia en la magnitud de la fuerza aplicada para el perno de 4 [mm] y el de 1 [m]; incluso cuando se omite la rotación, los niveles de la fuerza crecen un poco más en ambos casos. Se observa un comportamiento similar en el crecimiento de la fuerza para el perno de 4 [mm] con y sin rotación; sin embargo, para el perno de 1 [m], se observa que las aleaciones con 240 [μm] de espesor requieren menos fuerza para llegar a la posición final cuando se considera que el perno está girando. Si se omite el giro del perno, se observa que el espesor de la multicapa no importa si se utiliza el perno de 1 [m] de radio de curvatura.

Perno con 4 [mm] de radio de curvatura, con rotación



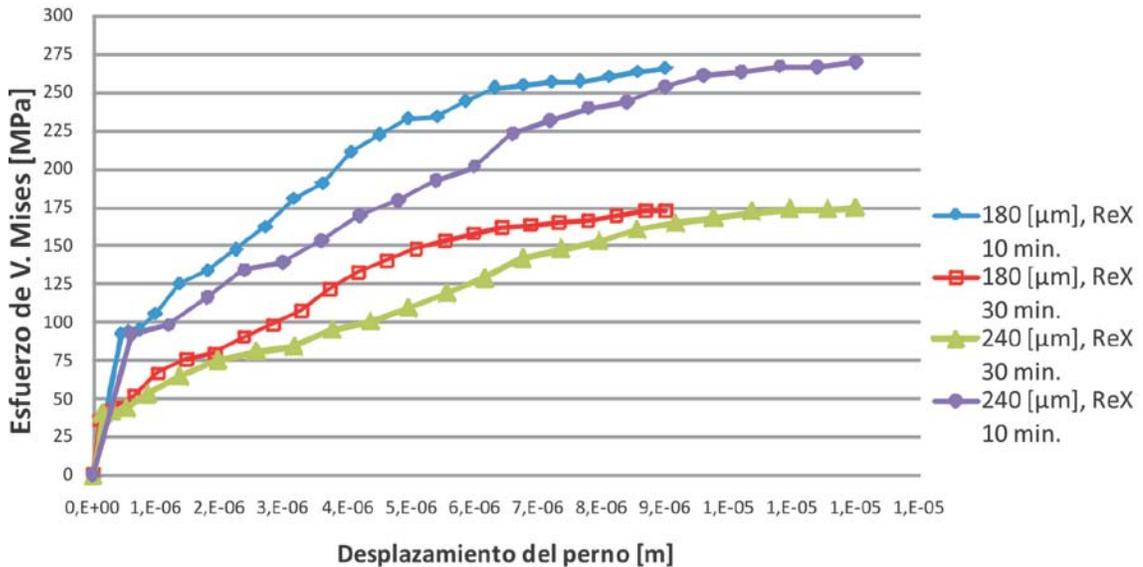
Perno con 1 [m] de radio de curvatura, con rotación



El momento que se aprecia en las simulaciones con rotación se debe a la fricción de Coulomb entre la multicapa y el perno. Como se observa, este momento que aparece en dirección contraria al giro del perno, es mayor en el perno de 1 [m] porque el área de contacto que se forma es mayor que cuando la multicapa entra en contacto con el perno de 4 [mm]. Por lo anterior es que aparecen traslapadas las curvas de momento para el perno de 1 [m], por tener la misma área de contacto según el espesor utilizado.

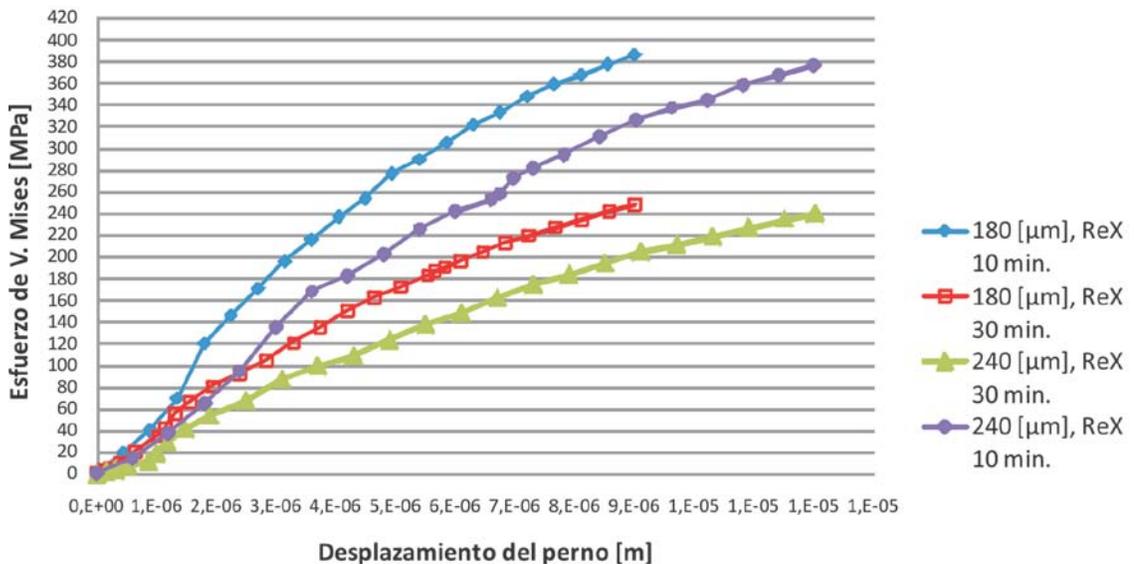
Perno con 4 [mm] de radio de curvatura, con rotación

V.Mises max en acero AISI 1008 vs Desplazamiento del perno



Perno con 4 [mm] de radio de curvatura, sin rotación

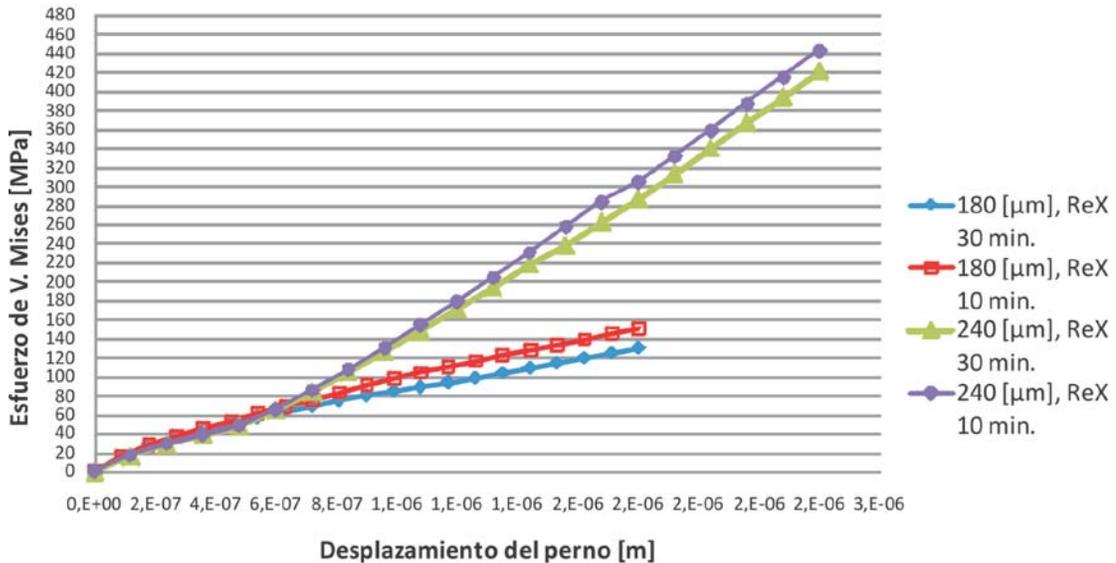
V.Mises max en acero AISI 1008 vs Desplazamiento del perno



Se observa que al quitar la rotación del perno se obtienen mayores esfuerzos de V. Mises en la capa de acero, como se observó anteriormente en las vistas laterales de la multicapa. El espesor de la aleación Al-Sn influye en el crecimiento de las gráficas mostradas. Para espesores delgados (180 [μm]) el esfuerzo de V. Mises crecerá más rápido que para espesores gruesos (240 [μm]).

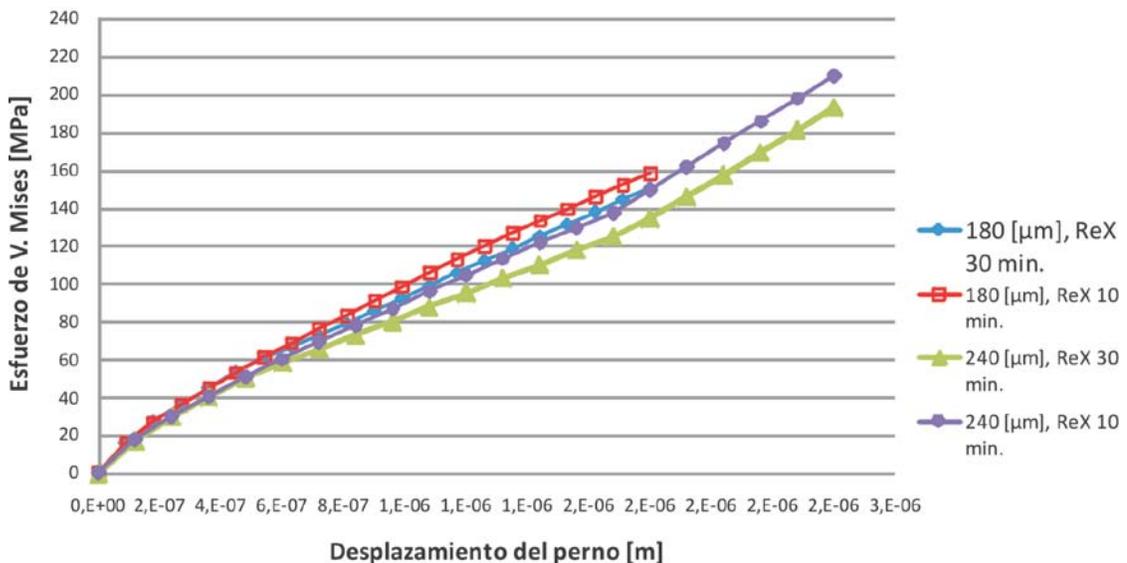
Perno con 1 [m] de radio de curvatura, con rotación

V.Mises max en acero AISI 1008 vs Desplazamiento del perno



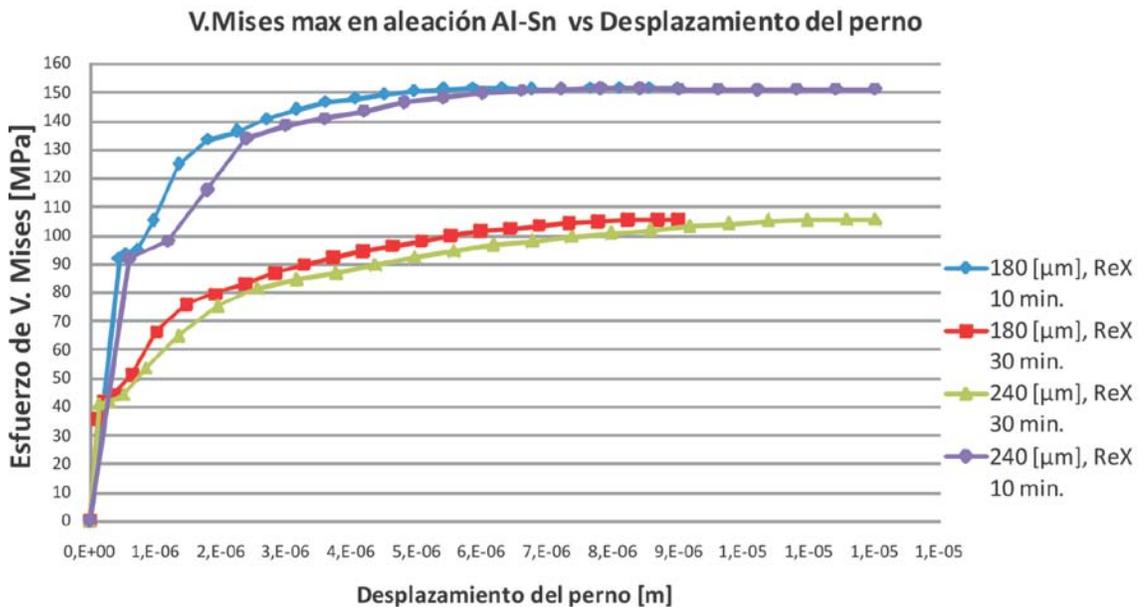
Perno con 1 [m] de radio de curvatura, sin rotación

V.Mises max en acero AISI 1008 vs Desplazamiento del perno

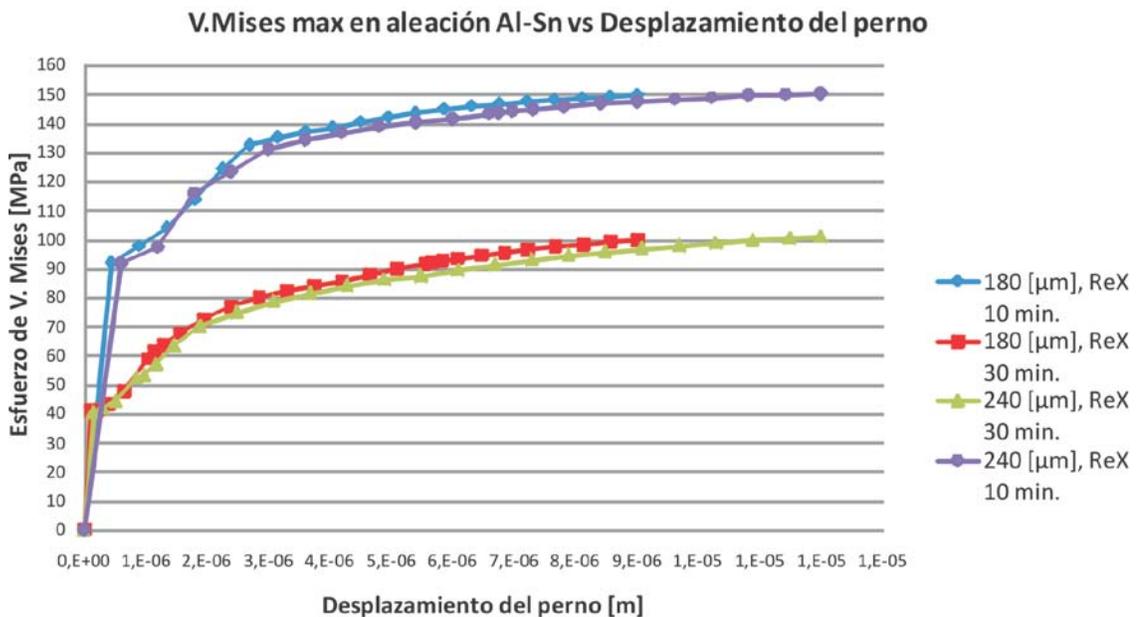


En estas gráficas se aprecia que se obtienen mayores esfuerzos de V. Mises en la capa de acero cuando el perno gira; las aleaciones más duras propiciarán mayores esfuerzos de V. Mises sobre la capa de acero, a pesar de que las propiedades elásticas del acero no cambian en ninguna simulación. En general, para ambos pernos y sin importar el uso de rotación en éste, la capa de acero tendrá los mayores niveles para el esfuerzo de V. Mises, lo cual deja abierta la posibilidad de que esta placa si se deforme plásticamente durante la prueba experimental.

Perno con 4 [mm] de radio de curvatura, con rotación

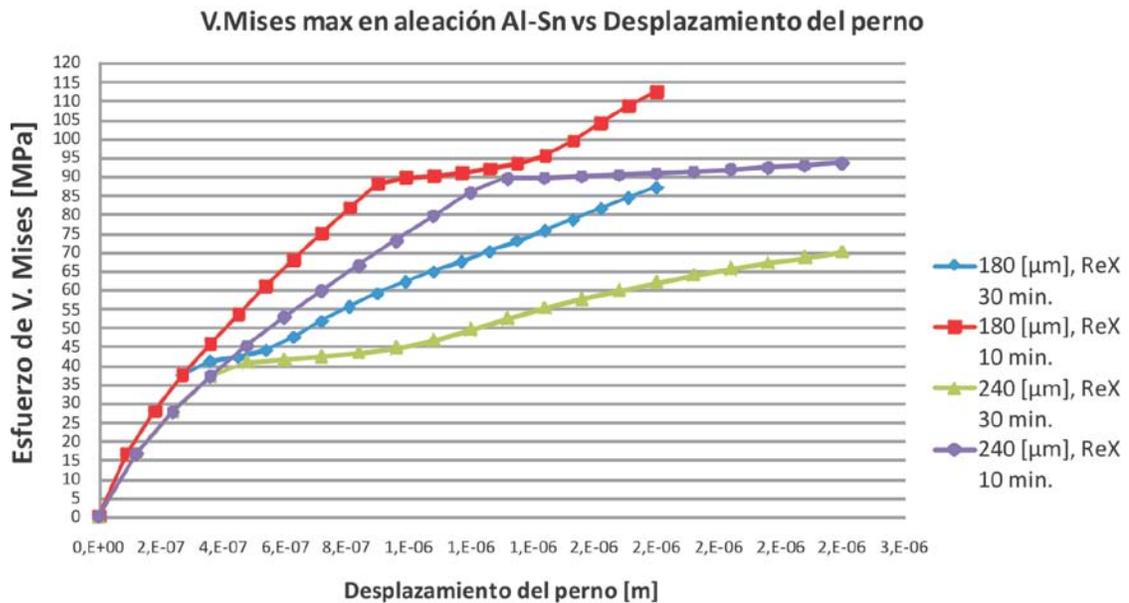


Perno con 4 [mm] de radio de curvatura, sin rotación

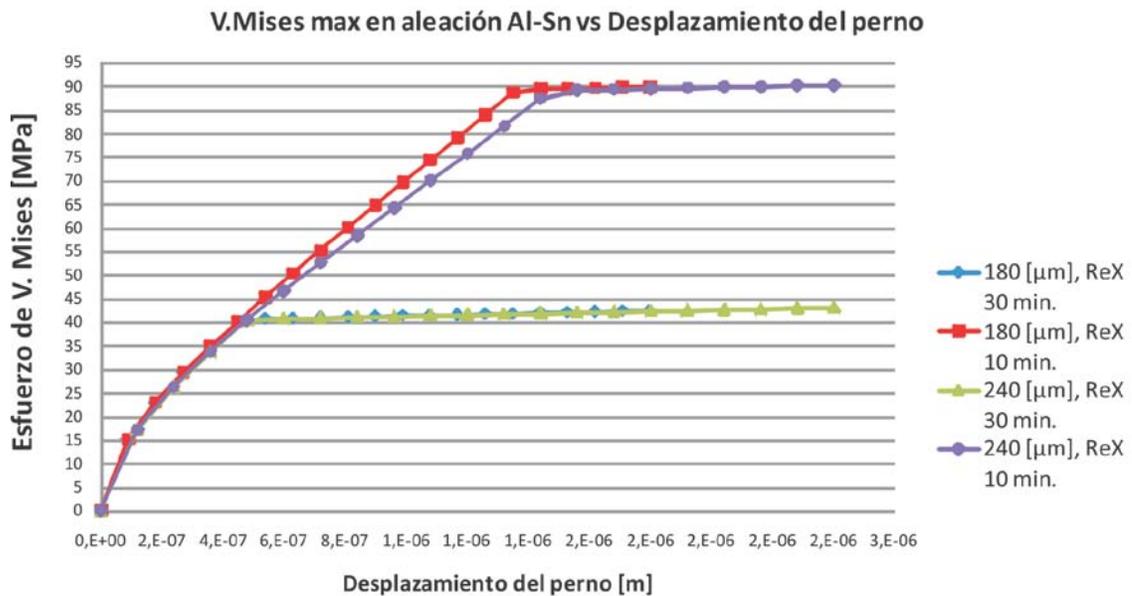


Con y sin rotación, para el perno de 4 [mm] se aprecia un endurecimiento en los materiales recocidos por 30 minutos. Se observa claramente que desde el primer desplazamiento del perno, los valores de esfuerzos observados se encuentran ya próximos a los esfuerzos de cedencia para ambas aleaciones. Los niveles de esfuerzos con y sin rotación para cada simulación se encuentran muy parecidos, aunque como se observó en la sección anterior, se localizan en sitios diferentes de la capa de aleación Al-Sn. El espesor de la aleación Al-Sn no tiene ningún efecto en el crecimiento del esfuerzo de V. Mises.

Perno con 1 [m] de radio de curvatura, con rotación



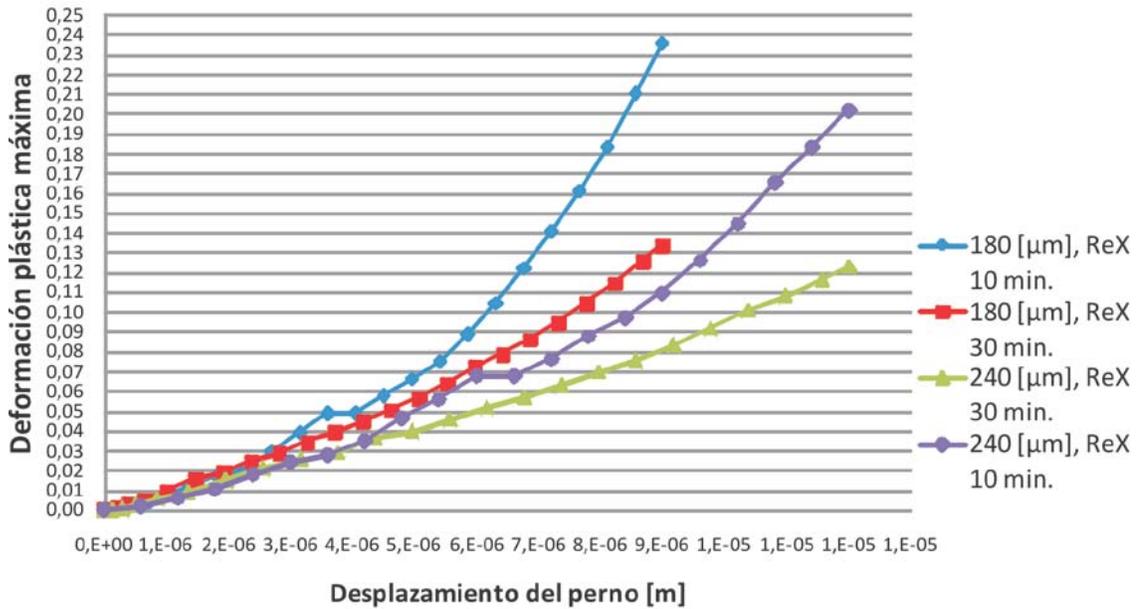
Perno con 1 [m] de radio de curvatura, sin rotación



Se observa un mayor nivel de esfuerzos de V. Mises para las simulaciones con rotación que para aquellas sin rotación; esto también se observó en las vistas laterales de la sección anterior para aquellas simulaciones sin rotación. Para el perno de 1 [m] sin rotación, se observa que los espesores de la aleación no influyen en el crecimiento del esfuerzo de V. Mises; sin embargo, al girar el perno este efecto se pierde, y todas las simulaciones muestran una curva diferente.

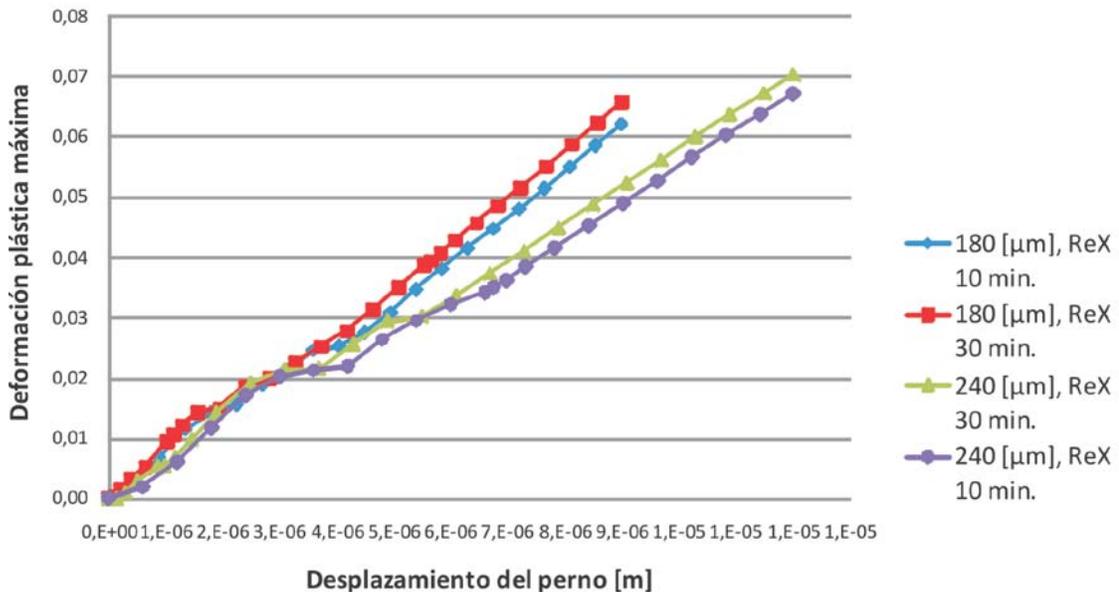
Perno con 4 [mm] de radio de curvatura, con rotación

Def.Plast.Equival. Max. en aleación Al-Sn vs Desplazamiento del perno



Perno con 4 [mm] de radio de curvatura, sin rotación

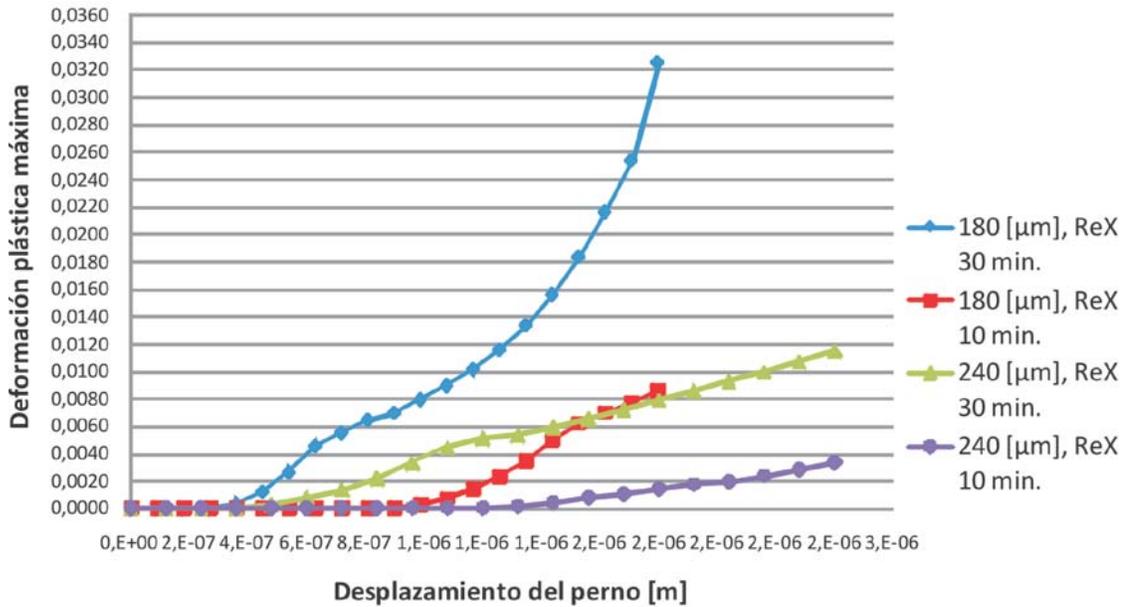
Def.Plast.Equival. Max. en aleación Al-Sn vs Desplazamiento del perno



Las gráficas muestran que la deformación plástica comienza al primer desplazamiento del perno por el pequeño radio de curvatura del perno utilizado. Con la rotación del perno se consiguen mayores niveles de deformación plástica. El espesor de la multicapa también influye en el crecimiento de estas gráficas.

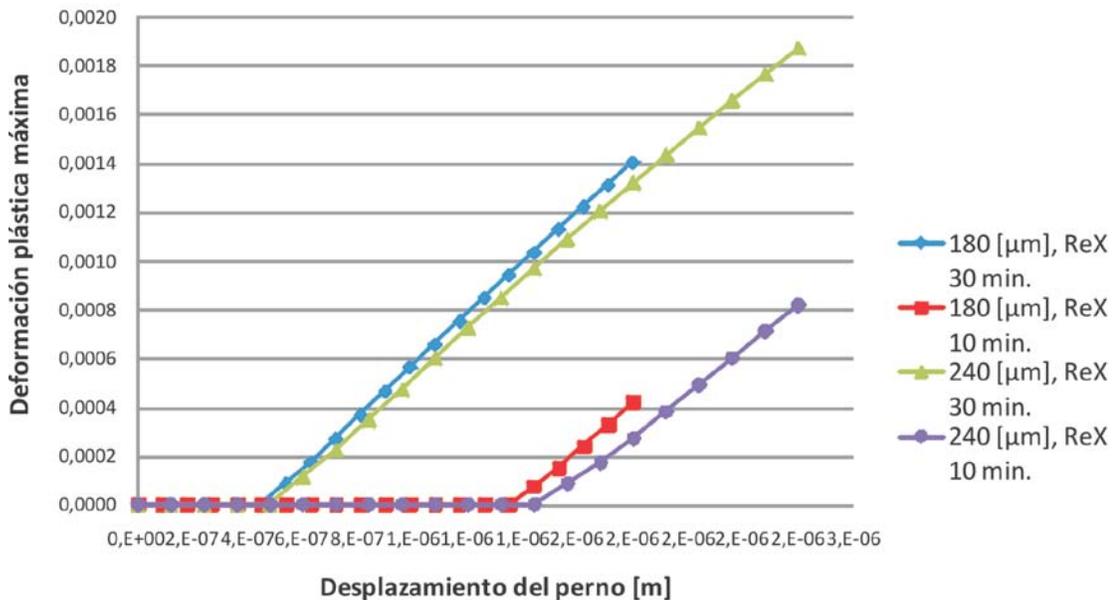
Perno con 1 [m] de radio de curvatura, con rotación

Def.Plast.Equival. Max. en aleación Al-Sn vs Desplazamiento del perno



Perno con 1 [m] de radio de curvatura, sin rotación

Def.Plast.Equival. Max. en aleación Al-Sn vs Desplazamiento del perno



El gran radio de curvatura del perno provoca que se necesite más tiempo para que la aleación comience a deformarse. Se observa que el efecto del espesor no influye cuando el perno no gira; este efecto se hace nulo cuando el perno rota. Estas gráficas de deformación son útiles para saber en que rango se puede mantener un comportamiento elástico en la multicapa.

Discusión

Las simulaciones realizadas se llevaron a cabo con éxito, y los resultados que se obtuvieron son los esperados. La ventaja de realizar estas simulaciones es la facilidad para poder modificar los parámetros de acuerdo al análisis que se quiera realizar, además de que se cuenta con el recurso computacional adecuado para optimizar el tiempo de simulación en cada una de ellas.

Como se observó, las gráficas obtenidas de las simulaciones brindan mucha información acerca del comienzo de la deformación plástica en la multicapa, así como la influencia de los parámetros utilizados (curvatura y rotación del perno, espesor y resistencia de la aleación) sobre ésta. Además, si se complementa con las imágenes de la multicapa que muestran su centro durante el contacto, se puede comprender mejor la respuesta mecánica que ocurre en la multicapa.

La influencia del radio de curvatura del perno en la deformación plástica sobre la multicapa es evidente. Al tener un radio de curvatura muy grande que penetre a la multicapa, la deformación plástica que se produce es muy pequeña comparada con el perno de radio pequeño que concentra mucho más la carga. Al observar los resultados de las gráficas, se puede apreciar que un perno de gran radio de curvatura mantendrá la deformación en el rango elástico sobre la multicapa si la fuerza aplicada sobre ésta mantiene magnitudes similares a las de la fuerza obtenida para el perno de 4 [mm]. Si se sigue aumentando la fuerza en el perno de 1 [m], se observa que si se alcanza una deformación plástica considerable. A pesar de que se tienen dos materiales elasto-plásticos, este comportamiento igual se presenta ya que se realiza trabajo en frío en ambos materiales.

La rotación en el perno influye significativamente en el comienzo de la deformación plástica para todas las simulaciones. Esto se observa al comparar cada simulación con su correspondiente sin rotación en el tiempo donde comienza a deformarse plásticamente, y el resultado es que comienza antes para las simulaciones con rotación del perno. Este efecto se observa mejor en las simulaciones para el perno de 1 [m], ya que para el perno de 4 [mm] la deformación plástica comienza a partir del primer incremento. El momento obtenido para las simulaciones con rotación representa el comportamiento de la pérdida por fricción, la cual se debe considerar junto con las pérdidas mecánicas que pueda presentar el motor del equipo. A pesar de que se utilizó una fricción de Coulomb constante entre las superficies en contacto, la descripción del comportamiento mecánico de la multicapa resultó en lo esperado.

Las gráficas de las simulaciones sin rotación del perno muestran que no existe una influencia considerable si se tienen espesores diferentes. Sin embargo, si debe tomarse en cuenta el espesor de la multicapa para la prueba experimental porque influye significativamente en cada parámetro que se observó en las gráficas (fuerza, Esfuerzo de V. Mises, etc.). Gracias a la precisión con que están medidos los parámetros de las gráficas, se puede tener un mayor control en las pruebas experimentales que se realicen en el tribómetro coaxial.

Para todas las simulaciones se observa que la mayor cantidad de esfuerzo se transmite a la capa más rígida, que es la de acero. Sin embargo, en algunas simulaciones se observa que los esfuerzos alcanzados sobre la capa de acero son muy altos (hasta 400 [MPa]), por lo cual se esperaría también una deformación plástica sobre esta placa.

El modelo generado en esta tesis no considera algunos aspectos que se presentan durante la prueba experimental. Uno de ellos ocurre cuando el indentador está penetrando a la placa multi-metálica; al entrar en contacto el perno de desgaste y la superficie de la multicapa existe una desaceleración del perno, la cual se tiene que compensar con un incremento en la potencia del motor para mantener el régimen de velocidad en el perno. Como resultado se tiene una etapa transitoria antes de que el contacto entre las superficies alcance un estado estable. Al tener pasos estáticos en las simulaciones realizadas, este hecho se omite durante la indentación de los pernos lo cual representa una ventaja porque no considera el ruido que miden los sensores electrónicos del tribómetro. Tampoco se considera el incremento de temperatura en la superficie de la multicapa por la fricción que se presenta, y mucho menos una relación entre la resistencia mecánica en la multicapa y su incremento de temperatura. Se recomienda medir la temperatura de la multicapa en la prueba experimental y comparar con la temperatura de recristalización de ésta para concluir si se realiza trabajo en frío o trabajo en caliente. Aún si no existiera recristalización en la multicapa, el efecto de la temperatura es importante ya que de todos modos bajará la resistencia del material. Por lo tanto, se requiere de pruebas experimentales y modelos de elemento finito mejorados donde se considere este aspecto, el cual representa trabajo e investigaciones posteriores que brindarán un mejor control en la realización de pruebas experimentales para el tribómetro.

A pesar de que los pernos de desgaste se simularon como superficies analíticamente rígidas, en realidad si sufren pequeñas deformaciones elásticas durante la prueba experimental, lo cual tampoco se considera aquí. La cantidad de desgaste en la placa multi-metálica tampoco es considerado porque la malla utilizada necesita de una programación aparte que permita eliminar ciertos elementos, y entonces se simule este aspecto. Es por esta razón que los desplazamientos de los pernos se mantuvieron en rangos muy pequeños para evitar la distorsión de los elementos finitos. Sin embargo, se puede predecir el comienzo del desgaste en la aleación cuando el programa calcula esfuerzos muy elevados en los elementos finitos del centro de la multicapa, lo cual resulta interesante.

Para poder considerar los aspectos anteriores en el modelo de elemento finito, se tienen que programar subrutinas del programa para incluirlos en el contacto, lo cual requiere de tiempo e investigación sobre las líneas de comando del programa y sobre pruebas experimentales realizadas. Sin embargo, las consideraciones hechas para realizar los modelos de las simulaciones aportan resultados interesantes que servirán para predecir y calibrar los ensayos físicos que se realicen en el tribómetro coaxial para futuras investigaciones.

Finalmente, este modelo de elemento finito es útil para proteger al equipo durante las pruebas experimentales, ya que es capaz de predecir el inicio de la deformación plástica y del desgaste en la multicapa, así como la carga correspondiente que se necesita aplicar según el perno de desgaste que se haya simulado. Esto sin duda es una gran ventaja porque nos permite empezar a hacer pruebas experimentales sin dañar al equipo y nos da la pauta para determinar si se puede manufacturar el perno de desgaste, el cual es difícil de elaborar.

Conclusiones

Se elaboró un modelo de elemento finito en ABAQUS ® capaz de predecir el comportamiento mecánico de una multicapa metálica sujeta a un ensayo de fricción y desgaste en un tribómetro coaxial. A pesar de que se pueden considerar otros factores para realizar una simulación más elaborada de la prueba experimental del tribómetro, se observó que dicho comportamiento mecánico arroja resultados satisfactorios con los factores considerados en esta tesis.

Se concluye que se requiere de subrutinas y líneas de comando más complejas y personalizadas en el programa para poder realizar una simulación más completa de la prueba experimental, que para esta tesis se omiten por su complejidad. La facilidad con la cual se pueden modificar los parámetros del modelo de la tesis y la forma del perno permite predecir las condiciones mecánicas de la multicapa antes de realizar la prueba experimental. Por lo tanto, es útil este modelo para proteger a los componentes del equipo experimental, y para eliminar el aspecto de ensayo y error durante la elaboración de nuevos experimentos, ya que en la actualidad se han hecho algunos experimentos sin tener éxito en el control de la deformación plástica sobre la multicapa.

También se concluye que gracias al gran aporte del programa para simular consideraciones no incluidas en los modelos de elemento finito, se pueden realizar trabajos a futuro con el fin de implementar lo hecho en esta tesis.

Por último, gracias a los recursos computacionales de la UDIATEM se puede realizar una gran cantidad de simulaciones en periodos de tiempo cortos, lo cual es necesario para optimizar el tiempo de simulación.

Referencias

-
- [1] ASM Handbook vol. 18. *Friction, Lubrication, and Wear Technology, glossary of terms*. Copyright ©1998 by ASM International.
- [2] Shouwenaars F. R. Tesis: *Análisis de la deformación plástica durante el desgaste de cojinetes de deslizamiento, cap.1 Introducción*. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, D. F. 2004
- [3] <http://en.wikipedia.org/wiki/Tribology>
- [4] Larsen-Basse Jorn. *Introduction to friction*. National Science Foundation. ASM Handbook Vol.18, copyright©1998 by ASM International.
- [5] Priest M, and Taylor, C. M. *Automobile engine tribology, approaching the surface*. Wear 241, 2000, pp. 193-203.
- [6] Larsen-Basse Jorn. *Introduction to friction*. National Science Foundation. ASM Handbook Vol. 18, copyright©1998 by ASM International.
- [7] Larsen-Basse Jorn. *Basic Theory of Solid Friction, nature of surfaces*. National Science Foundation. ASM Handbook Vol. 18, copyright©1998 by ASM International.
- [8] <http://catalog.asme.org>
- [9] Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.02. *Wear and Erosion; Metal Corrosion*. Copyright©2000 by ASTM.
- [10] Hogmark S., Jacobson S. *Surface damage, surface damage involving loss of material: wear*. Uppsala University (Sweden), ASM Handbook Vol. 18, copyright©1998 by ASM International.
- [11] Bharat Bhushan. *Modern Tribology Handbook Vol. 1 chapter 10 p.361-366*. Copyright©2001 by CRC Press LLC.
- [12] Joinet. M, Pouliquen S. *Comparison between single and multilayered a-SiC:H coatings prepared by multi-frequency PACVD: Mechanical properties*. Surface&Coatings Tech. © 2007 Elsevier B. V. All right reserved.
- [13] Fox-Rabinovich G. S., Yamamoto K. *Wear behavior of adaptive nano-multilayered TiAlCrN/NbN coatings under dry high performance machining tools*. Surface&Coatings Tech. © 2007 Elsevier B. V. All right reserved.
- [14] M.M. Khonsari, R.E. Booser. *Applied tribology (bearing design and lubrication)*. Copyright©2001 by J.Wiley & Sons.
- [15] Bharat Bhushan. *Modern Tribology Handbook Vol. 2 chapter 27 p.1031*. Copyright©2001 by CRC Press LLC.
- [16] <http://en.wikipedia.org/wiki/Tribometer>
- [17] Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales, DIMEI, UNAM, México D. F. 2007.
- [18] Schouwenaars R., Jacobo V.H., Cerrud S., Ortíz A. *Tribolayer formation as a functionally self-grading process in soft anti-friction alloys*. Department of Mechanical Eng. FI UNAM, Coyoacán 04510, México, D. F.
- [19] Schouwenaars R., Jacobo V.H., Cerrud S., Ortíz A. *Finite element simulation of microstresses in a traditional FGM: the case of soft tribo-alloys*. Department of Mechanical Eng. FI UNAM, Coyoacán 04510, México, D. F.
- [20] Schouwenaars R., Jacobo V.H., Cerrud S., Ortíz A. *Microstructural aspects of wear in soft tribological alloys*. Department of Mechanical Eng. FI UNAM, Av. Universidad 3000 Coyoacán 04510, México, D. F.
- [21] Malvern L. *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*. Copyright © 1969 Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- [22] Chakrabarty J. *Theory of plasticity*. Copyright © 2006, published by Elsevier Butterworth-Heinemann. Third edition.
- [23] Abaqus analysis manual v6.7, chapter 29.2.1. *Defining contact pair in Abaqus/Standard*.
- [24] Abaqus theory manual v6.7, chapter 5.1.1. *Small-sliding interaction between two bodies*.
- [25] Abaqus theory manual v6.7, chapter 5.2.3. *Coulomb friction*.
- [26] Márquez S. R., Iniesta G. O. E. *Diseño y construcción de un tribómetro coaxial*. Facultad de Ingeniería, UNAM, México D. F. 2007.
- [27] Daryl L. Logan. *A first course in the finite element method*. Copyright © 2002 Wadsworth Group, Thomson Third edition, p. 308.