



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TESINA DEL MASTER UNIVERSITARIO EN DISEÑO Y FABRICACION ASISTIDOS POR COMPUTADOR CAD – CAM - CAE

*“ Estudio y simulación por elementos finitos
del comportamiento de aleaciones de acero
TWIP en condiciones de estirado con
rozamiento.”*

Director: Miguel Jorge Reig Perez

Autor: Álvaro Raúl Rozas Álvarez

Diciembre 2.011

*Dedico esta tese aos meus avós.
Con moreas de amor, ensináronme que
para ser un, antes cómpre ser tres.
Eles marcharon, mais no meu corazón,
Sempre quedaron.*

INDICE

1 . INTRODUCCION	Pag. 4
1.1 Objetivos	Pag. 4
1.2 Motivación	Pag. 4
1.3 Estructura del documento	Pag. 5
2. ESTADO DEL ARTE	Pag. 6
2.1 Introducción.....	Pag. 6
2.2 Estado de la Técnica de Simulación	Pag. 10
2.3 Métodos de los elementos finitos	Pag. 16
2.4 Fundamentos de la conformación plástica de los metales ...	Pag. 21
3. MODELIZACION	Pag. 27
3.1 Introducción.....	Pag. 27
3.2 Pre-Procesado	Pag. 28
3.2.1 Definición geométrica	Pag. 28
3.2.2 Características de los materiales	Pag. 32
3.2.3 Tipos de elementos	Pag. 32
3.2.4 Mallado de la Geometría	Pag. 34
3.2.5 Condiciones de contorno	Pag. 35
3.2.6 Condiciones en la zona de contacto	Pag. 37
4. RESULTADOS	Pag. 49
5. CONCLUSIONES	Pag. 63
6. TRABAJOS FUTUROS	Pag. 65
7. BIBLIOGRAFIA	Pag. 66
8. ANEXO	Pag. 68

Capítulo 1

INTRODUCCION

1.1 Objetivos

El objetivo principal de estudio de la presente tesina, es evaluar y determinar mediante simulaciones de elementos finitos, el comportamiento del acero TWIP, determinando los resultados previsibles bajo diferentes condiciones de simulación y estableciendo el punto de partida para su posterior contraste experimental, todo ello orientado a introducir este tipo de acero especial como pieza estructural en el automóvil, en lugar del acero tradicional, a efectos de disminuir el espesor de la chapa con el fin de aligerar el peso, manteniendo los niveles de confort y seguridad, y así disminuir la emisión de gases a la atmosfera.

Como objetivos particulares del presente trabajo:

- Conocer la situación del estado actual de la tecnología, en el campo de la simulación por elementos finitos a fin de afianzar la comprensión de los procesos implicados en el desarrollo de un nuevo producto, proceso o tecnología.
- Establecer los parámetros principales de análisis, mediante las herramientas actuales de simulación, a fin de evaluar su comportamiento posteriormente mediante ensayos experimentales.
- Analizar y comprender el comportamiento mecánico de un material elástico - plástico.
- Evaluar los efectos y las condiciones de rozamiento, para determinar su impacto en los resultados experimentales.

1.2 Motivación

El hecho de que el acero TWIP presente excelentes propiedades mecánicas, alta resistencia combinada con una buena ductilidad, es lo que motiva a pretender encontrar, mediante la simulación del modelo teórico desarrollado y respondiendo satisfactoriamente al

objetivo propuesto, determinar las características principales de su comportamiento, para su posterior ensayo experimental y así alcanzar las condiciones óptimas de este acero bajo deformación, para potenciar su uso en la industria automovilística.

1.3 Estructura del documento

El documento se compone de la siguiente estructura:

- Capítulo 1: se realiza una breve introducción al tema principal de la tesis, definiendo el objetivo principal y los objetivos secundarios.
- Capítulo 2: en él se realiza una revisión del estado del conocimiento, reseñando algunos de los trabajos más importantes sobre el desarrollo de aceros TWIP y sus aplicaciones, como el análisis y simulación por elementos finitos.
- Capítulo 3: se justifica el modelo teórico utilizado en las simulaciones mediante la herramienta de elementos finitos utilizado para ver el comportamiento de la chapa.
- Capítulo 4: se presentan los resultados obtenidos de las simulaciones bajo las distintas condiciones utilizadas.
- Capítulo 5: se describe las conclusiones obtenidas, cerrando posteriormente el
- Capítulo 6: se establece la propuesta de trabajos futuros a realizar.
- Capítulo 7: se indican las referencias bibliográficas empleadas en el desarrollo de este trabajo.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

Los crecientes requerimientos que demanda la industria, como la necesidad de reducir el impacto ambiental, han llevado a los fabricantes de automóviles a realizar un esfuerzo para desarrollar vehículos con un menor consumo de combustible. La consecución de este objetivo implica la disminuir las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera mediante la introducción de mejoras en el motor, incrementando su eficacia, pero la principal labor va encaminada a una disminución del peso del vehículo, compensando el mayor contenido de equipamiento (airbags, asientos motorizados, etc.).

Una vía posible de mejora se basa en la sustitución del acero tradicionalmente empleado en la carrocería de los automóviles por otros materiales más ligeros. Así, en los modelos que han aparecido en el mercado en los últimos años se observa un creciente empleo de aleaciones de aluminio e incluso, en algunas piezas no estructurales, de magnesio en sustitución del acero.

Esto ha llegado al punto de que la carrocería de algunos vehículos de la gama alta se haya fabricado totalmente en aleaciones de aluminio. Sin embargo, los lógicos deseos de un mayor confort y seguridad pueden arruinar estos intentos. Por un lado estos materiales poseen una menor rigidez que el acero lo que obliga, en muchos casos, a incorporar un equipamiento suplementario. Es evidente que ello va en contra de la pretendida reducción de peso. Por otro no se puede olvidar que el coste de estas carrocerías resulta apreciablemente más alto que el de las tradicionales de acero, por lo que su posible utilización en automóviles de las gamas media o baja parece prohibitiva.

Otra posible solución, que está logrando una aceptación creciente entre los fabricantes de automóviles, consiste en mantener el acero como el material utilizado en la carrocería. Para vencer el inconveniente que representa la elevada densidad de éste se han desarrollado nuevas calidades que permiten obtener notables aumentos de resistencia mecánica. De esta

forma se puede lograr el objetivo de reducir el peso gracias al uso de secciones más esbeltas. Los aceros de resistencia mecánica muy alta no constituyen un desarrollo reciente sino que son conocidos desde hace ya muchos años. Sin embargo, tradicionalmente este incremento de resistencia ha ido acompañado de una disminución de la ductilidad, y por tanto de la capacidad de conformado. Por otra parte, las dificultades de soldadura de estos aceros impedían su uso en muchos componentes y, más concretamente, en la carrocería.

Los aceros avanzados de alta resistencia (aceros AHSS), son aceros con una resistencia máxima de al menos 500 MPa. Son aceros multifásicos que pueden contener ferrita, martensita, vainita y/o austenita retenida en cantidades suficientes para producir propiedades mecánicas excepcionales (dadas por un endurecimiento por transformación). Estos aceros muestran una excelente combinación de buena resistencia mecánica y una excelente facilidad de conformado que es el resultado de sus excelentes características de endurecimiento por deformación. Estos aceros son especialmente promisorios en la fabricación de carrocerías para automóvil resistentes al choque, donde se requiere rigidez, resistencia y absorción de energía en cada una de las partes que la conforman.

Dentro de estos aceros de reciente desarrollo se pueden mencionar a las siguientes familias principales:

- Aceros de Fase Dual (Dual Phase, DP)
- Aceros de Transformación Inducida por Plasticidad (Transformation - Induced Plasticity, TRIP)
- Aceros de Fase Compleja (Complex Phase, CP)
- Aceros Martensíticos (Martensitic, MS)
- Aceros de Transformación Inducida por Maclaje (aceros TWIP)

Sin entrar en detalles acerca del sucesivo desarrollo de nuevos aceros, puede encontrarse en las referencias, si se deben comentar algunos aspectos que ayudarán a comprender los resultados obtenidos en el presente trabajo. El primer paso en la consecución de una mejor combinación de propiedades de resistencia y ductilidad se dio a mediados de los años 70 del siglo pasado con el desarrollo de los llamados aceros de fase dual. Estos aceros, habitualmente se designan por las iniciales de este nombre en inglés (DP), seguidas de dos números, correspondientes a los valores medios del límite elástico y de la resistencia a la tracción, No obstante, a veces por una mayor simplicidad se suele incluir sólo este último.

La microestructura de estos aceros se halla constituida por dos fases, de ahí su nombre. La ferrita, fase blanda, forma la matriz en tanto que la martensita, fase dura, en un porcentaje en torno al 20%, se encuentra dispersa a través de ella. La consecución de esta microestructura se logra mediante un enfriamiento rápido del acero hasta la temperatura en que se forma la ferrita, un mantenimiento a esta temperatura hasta obtener la cantidad deseada de esta fase, y un nuevo enfriamiento rápida a temperaturas muy bajas para obtener martensita,. Se procura evitar al máximo que se formen perlita o bainita. Durante la deformación la presencia de las partículas duras en la ferrita, blanda, incrementa notablemente el índice de endurecimiento por deformación, permitiendo alcanzar una buena combinación de resistencia y ductilidad.

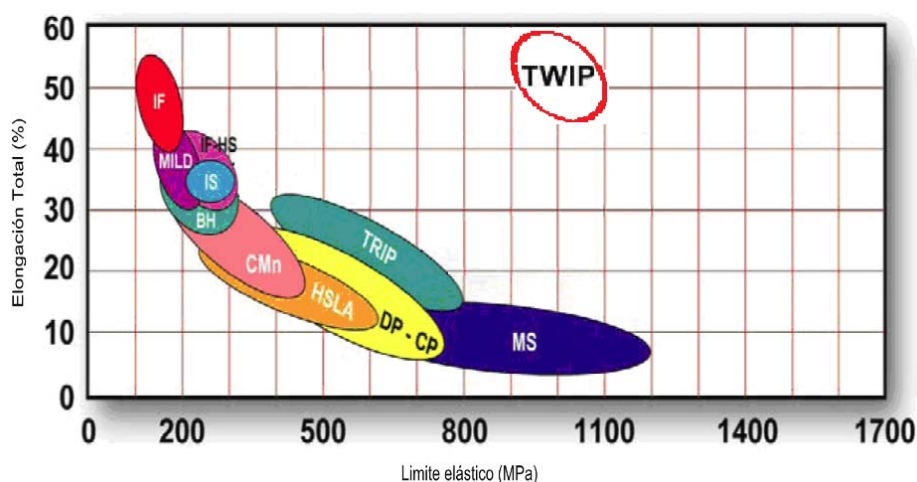
Un nuevo avance, en los inicios de los años 90, fue el desarrollo de los aceros TRIP, iniciales en inglés de Transformation Induced Plasticity (plasticidad inducida por transformación). La elevada resistencia mecánica de este tipo de aceros se consigue por la adición de algunos elementos de aleación y la aplicación de un tratamiento térmico especial, Éste consiste en un mantenimiento en el margen de temperaturas de formación de la bainita, tras un recocido para obtener austenita y ferrita. Como consecuencia de ello se consigue una microestructura constituida por ferrita, bainita y austenita retenida, que se ve enriquecida en carbono por el desprendido en la formación de la bainita.

La austenita, que es metaestable a temperatura ambiente, se transforma en martensita cuando se le somete a deformación [4]. Para garantizar una alta capacidad de conformado la austenita retenida debe poseer la denominada estabilidad óptima de forma que pueda experimentar una transformación progresiva, que se traducirá en un aumento continuo del exponente de endurecimiento por deformación. La estabilidad de la austenita depende de una serie de variables tales como composición química, morfología y tamaño de la austenita retenida (cuanto más fina será más estable) parámetros de proceso y las condiciones de conformado (temperatura, deformación, velocidad de deformación y estado tensional) [5].

La filosofía que se encuentra detrás del desarrollo de los llamados aceros TWIP es diferente. En este caso se busca que la austenita sea totalmente estable en el curso de la deformación y la elevada plasticidad no se obtiene por la transformación de la austenita en martensita sino por el maclado de aquélla. De ello deriva su nombre, puesto que corresponde a las iniciales en inglés de Twinning Induced Plasticity (plasticidad inducida por maclado). Los primeros aceros de esta familia datan de finales de los años 90 del siglo pasado.

El maclado de la austenita conduce a un alto valor del índice de endurecimiento por deformación. No obstante, el principal mecanismo de deformación de estos aceros continúa siendo el deslizamiento de dislocaciones. El mayor efecto de la creación de nuevas maclas en el curso de la deformación es la generación de unos fuertes obstáculos a este deslizamiento, similares a las juntas de grano, lo que representa una especie de mecanismo dinámico de Hall-Petch, y conduce a un endurecimiento por deformación muy elevado [6]. Se ha señalado que el índice de endurecimiento por deformación alcanza un valor tan elevado como es 0.4 cuando la deformación se sitúa en torno al 30% manteniéndose prácticamente constante hasta deformaciones del 50%. Este elevado índice de endurecimiento por deformación se traduce en la consecución de unos valores muy altos de resistencia mecánica y ductilidad. La resistencia a la tracción de este tipo de aceros llega a valores de unos 1100MPa, en tanto que los alargamientos a la rotura pueden superar el 90% para un acero con un 25% de manganeso, 3% de silicio y 3% de aluminio [7-8].

La acción de maclado se produce únicamente cuando la energía de defectos de apilamiento se sitúa entre 18 y 50- 80mJ/m².. Para valores inferiores a éstos se produce la transformación de la austenita en martensita, en tanto que si la energía de defectos de apilamiento supera el máximo de ese intervalo el único mecanismo operante es el deslizamiento de dislocaciones [9]. Sin embargo, es sobradamente conocido, que la transformación de la austenita en martensita se puede ver favorecida por una reducción de la temperatura a la que se encuentra el acero, transformación que además se ve favorecida por la reducción de la energía de defectos de apilamiento que conlleva esta disminución de temperatura. Éste es un aspecto que deberá ser tenido en consideración a la hora de valorar las prestaciones de una carrocería de automóvil.



2.2 Estado de la Técnica de simulación

Como consecuencia de la competencia de mercado y las regulaciones gubernamentales, un componente muy importante de este esfuerzo se centra en la reducción de los costes de las herramientas y el tiempo de entrega. Con las crecientes dificultades tecnológicas, tales como el uso de aleaciones de aluminio y aceros de alta resistencia, y los requisitos para una mayor precisión geométrica de las piezas estampadas, los métodos numéricos para la simulación de conformado de chapa son cada vez más importante en la puesta a punto de los procesos.

El éxito de la simulación numérica depende principalmente de los avances en la formación de los códigos de simulación, pero los avances en otras tecnologías relacionadas también es importante. Ejemplos de tecnologías relacionadas son los sistemas CAD que rápidamente construir y modificar las superficies de herramientas, generadores modernos de malla, más o menos automáticamente, crear mallados en las superficies de CAD, el hardware y el software de visualización, que permite a los usuarios a comprender la gran cantidad de datos, y, por último, el hardware del ordenador, que permite realizar simulaciones a gran escala en un plazo razonable.

El objetivo de este trabajo es presentar una visión general del estado actual de la simulación de conformado de chapa metálica y tecnologías relacionados realizadas en las industrias, y sugerir el rumbo futuro de la investigación. Muchas conferencias internacionales han llevado a cabo y numerosos artículos se publican en relación con la simulación de conformado de chapa en los años 1980 y 1990. Sin embargo, la información obtenida a través de estos eventos no es suficiente para abordar las cuestiones antes mencionadas. Por esta razón, los autores decidieron visitar a la industria automotriz y los proveedores de chapa de acero en Europa.

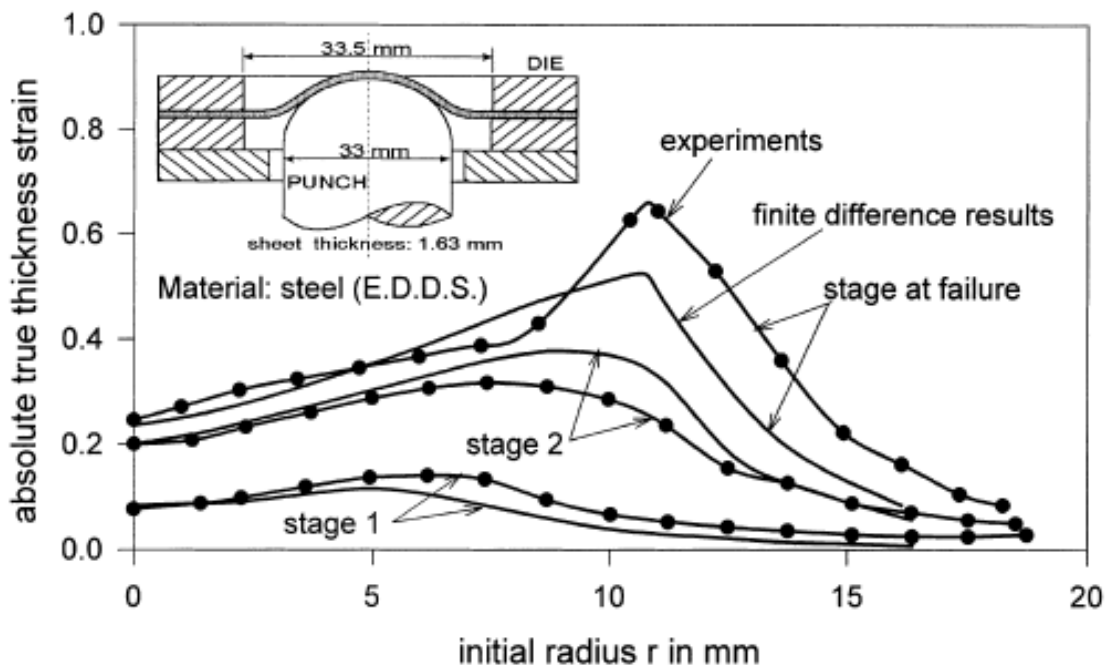
Japón y los Estados Unidos para discutir estos temas específicos con los ingenieros e investigadores que trabajan en las tiendas de morir y en las secciones hoja de sellado de las industrias.

En el pasado, se introducía tres nuevos modelos cada 10 años, ahora se introduce 10 nuevos modelos cada 3 años. Esta drástica reducción de los períodos de desarrollo, así como la tendencia a reducir el peso de los coches con el fin de reducir el consumo de combustible

conduce sobre todo en la industria del automóvil a una reconstrucción del diseño convencional y procedimientos de fabricación.

El conformado de chapa metálica, como un proceso de producción importante, está fuertemente basado en la experiencia e implica un lazo cerrado de ensayo y error. En el procedimiento de proceso innovador de diseño, sin embargo, los bucles de prueba y error se reducen por medio de análisis modernos de aproximación numérica, también llamado producción virtual.

Los intentos de solución numérica aproximada de conformado de chapa metálica tiene su inicio en la década de 1960. Las primeras soluciones numéricas de los procesos de conformado de chapa han sido obtenidas por métodos de diferencias finitas. Un ejemplo típico utilizando el método de diferencias finitas para la solución del proceso de conformación por estirado se da en la figura 1. Aquí, una comparación con resultados experimentales muestran un similitud bastante aproximada hasta el incremento por el inicio de la fractura de la hoja. Estos métodos son, sin embargo, restringido a los problemas de axisimétrica.



Aunque hubo intentos en la década de los 90's para aplicar este método en 3D de embutición profunda, posteriormente hubo estudios pioneros utilizando una relación elasto-plástico y otros la ley rígido-plástico.

Los avances en la simulación de conformado de chapa metálica por el método de elementos finitos comenzó alrededor de 5 ± 6 años después de la simulación de conformado.

Geométricamente, en el conformado de chapa metálica de la pieza tiene una superficie más grande en proporción al volumen de metales a granel en la formación.

Esta es la razón básica para la utilización de elementos de la membrana o capa en la simulación de elementos finitos. Además, esto permite también la utilización eficiente de los métodos explícitos. Comportamiento del material en el conformado de chapa metálica se caracteriza a través de una anisotropía debido inicial para el proceso de fabricación (en general de rodadura) de los espacios en blanco.

En comparación con los metales en formación, en conformado de chapa metálicas puras son de magnitudes moderadas (por ejemplo, hasta 0,7), pero el desplazamiento puede ser incluso mayor que en los metales a granel en formación.

Esto nos lleva al hecho de que en el remallado de chapa formado debido a las distorsiones excesivas elemento no es el caso, como en la formación de metales. En cambio, remallado es necesario debido a la cambio de la zona de deformación en el tiempo. La cinemática de la deformación de chapa metálica que forma está exhibiendo también la inestabilidad macroscópica que lleva, las arrugas que complican el tratamiento numérico sustancialmente. Además, los fallos son en nombre de la pieza de trabajo en lugar de las herramientas de metal a granel como en forma.

Esto requiere precauciones especiales en el análisis. Recuperación elástica y tensiones residuales son los temas más críticos. Estos fenómenos se deben a la descarga elástica después de la deformación elástico-plástico. Por lo tanto, un cálculo muy exacto en la parte elástico-plástica de la deformación es necesario ya que el estado de equilibrio después de la descarga depende de las diferencias en las cepas de plástico que están en el orden de las deformaciones elásticas. Todos estos hechos conducen hasta la entrada posterior de la

aplicación industrial de la simulación de la chapa. Por otro lado, hoy en día, conformado de chapa metálica de simulación es de aproximadamente 5 años antes de que el metal industrial a granel 3D simulación de conformado.

Las necesidades industriales de la simulación numérica de procesos de conformado de chapa metálica son altamente expresado por Budiansky (Harvard) de mediados de la década de 1970.

En la actualidad, los objetivos industriales de la simulación de la formación se puede resumir en tres grandes grupos.

1. La reducción del tiempo:

- Reducción de los tiempos de desarrollo,
- Reducción de los tiempos de prueba,
- Respuesta rápida a los deseos de modificación.

2. Reducción de costes:

- Productos más baratos,
- La reducción de los costos muertos,
- Presione hacia abajo el tamaño,
- Aumento de la fiabilidad.

3. Aumento de la calidad del producto:

- Selección óptima del material de la pieza,
- La producción de las partes más complicadas,
- Know-how de acumulación de nuevos materiales,
- Proceso de repetición,
- Optimización de las variantes.

Los requisitos correspondientes a estos objetivos son diversas

1. Procesos y operaciones.

Se espera que la herramienta de simulación es capaz de modelar diversos procesos y operaciones de conformado de chapa metálica de uno en uno, o incluso en combinación:

2. La facilidad de uso.

Este es un tema crítico para la aplicación de la herramienta de simulación en la industria. La industria espera que el uso del código debe ser simple, que no hay necesidad de ser experto. Además, la herramienta de simulación debe estar disponible allí donde se necesita, es decir, debe ser utilizable en la oficina de diseño y no sólo en el departamento de computación de la empresa.

3. CAD \pm FEM \pm interfaz CAD.

El requisito ideal es que el modelo CAD de las herramientas se pueden transferir fácilmente al código de elementos finito, y que cualquier modificación geométrica realizada durante el proceso de simulación pueden ser transferidos de nuevo al modelo de CAD y de allí al sistema CAM.

4. La eficiencia de la simulación.

Dependiendo de la etapa de diseño y desarrollo en el que se utiliza la herramienta de simulación computacional diferentes tiempos de los deseados. Mientras que los tiempos de respuesta de menos de 1 h se requieren en las fases de diseño preliminar, durante la noche las respuestas son tolerados en la etapa de diseño o etapas de resolución de problemas. Sin embargo, incluso en las etapas de diseño principal de la presión de tener tiempos de respuesta de menos de 2 h está aumentando debido a la finalidad de optimizar el proceso.

5. Simulación de salida.

El ingeniero industrial desea evaluar los siguientes resultados calculados numéricamente, en cuanto a distribución del espesor de la hoja, indicadores de fractura de las arrugas, zonas de metal sueltos, forma óptima de la pieza, recuperación elástica, tensiones residuales en el producto acabado, etc

7. Precisión.

Por lo general los requisitos de precisión se han incrementado con el uso de la herramienta de simulación. Especialmente de alta precisión que se espera para la determinación de la fractura. Estos requieren una mayor precisión en los materiales y modelos de fricción, sino también en las técnicas de solución numérica.

2.3 Método de los elementos finitos

El método de elementos finitos permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio (medio continuo) —sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema— dividiéndolo en un número elevado de subdominios no-intersectantes entre sí denominados «elementos finitos».

El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «malla».

Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para discretización del dominio en elementos finitos. La generación de la malla se realiza usualmente con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad.

El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, las relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo. .

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

El Método de Elementos Finitos (MEF) fue al principio desarrollado en 1943 por Richard Courant, quien utilizó el método de Ritz de análisis numérico y minimización de las variables de cálculo para obtener soluciones aproximadas a un sistema de vibración. Poco después, un documento publicado en 1956 por M. J. Turner, R. W. Clough, H. C. Martin, y L. J. Topp estableció una definición más amplia del análisis numérico.¹ El documento se centró en “la rigidez y deformación de estructuras complejas”. Con la llegada de los primeros ordenadores instaure el cálculo matricial de estructuras. Éste parte de la discretización de la estructura en elementos lineales tipo barra de los que se conoce su rigidez frente a los desplazamientos de sus nodos. Se plantea entonces un sistema de ecuaciones resultado de aplicar las ecuaciones de equilibrio a los nodos de la estructura. Este sistema de ecuaciones se esquematiza de la siguiente manera:

Durante los 60’s, cuando las aplicaciones prácticas de elementos finitos crecieron en tamaño junto con los requerimientos de tiempo de cálculo y memoria de los ordenadores. En ese punto el desarrollo de algoritmos más eficientes. Para la resolución de los sistemas de ecuaciones se potencia el estudio de la adaptabilidad de los algoritmos ya conocidos (Gauss, Cholesky, Crout, Gradiente conjugado, etc). El ahorro de tiempo es importante y con ello el uso del método matricial se extiende. Este desarrollo se hace especialmente notable en estructuras de edificación donde la discretización de los pórticos en barras, es prácticamente inmediata a partir de las vigas y los pilares.

Sin embargo, y a pesar de desarrollarse modelizaciones de elementos superficiales mediante barras (losas con emparrillados, elementos curvos mediante aproximaciones de elementos rectos, etc.), se plantean grandes dificultades ante estructuras continuas (superficies y volúmenes) y con geometrías complejas. De ahí que sea precisamente dentro del campo aeroespacial donde comienzan a desarrollarse las nuevas técnicas del MEF. Dada su generalidad el método se amplió a otros campos no estructurales como la conducción de calor, la mecánica de fluidos, etc. donde compitió con otros métodos numéricos como el de método de las diferencias finitas que aún siendo más intuitivos, tenían de nuevo dificultades de planteamiento para geometrías complejas.

Con la llegada de los centros de cálculo y los primeros programas comerciales en los años 60, el MEF a la vez que se populariza en la industria refuerza sus bases teóricas en los centros universitarios.

En los años 70 se produce un gran crecimiento de la bibliografía así como la extensión del método a otros problemas como los no lineales. En esta década, el MEF estaba limitado a caros ordenadores centrales generalmente poseído por las industrias aeronáuticas, de automoción, de defensa y nucleares. Se estudian nuevos tipos de elementos y se sientan las bases matemáticas rigurosas del método, que había aparecido antes más como técnica de la ingeniería que como método numérico de la matemática.

Por último, a partir de la década de los 80, con la generalización de los ordenadores personales, se extiende el uso de los programas comerciales que se especializan en los diversos campos, instaurándose el uso de pre y post-procesadores gráficos que realizan el mallado y la representación gráfica de los resultados. Se continúa en el estudio de la aplicación del método a nuevos modelos de comportamiento (plasticidad, fractura, daño continuo, etc.) y en el análisis de los errores.

En la actualidad, dentro del campo estructural, el MEF comparte protagonismo con el método matricial, siendo muchos los programas que mezclan el análisis por ambos métodos, debido sobre todo a la mayor necesidad de memoria que requiere el análisis por elementos finitos. Así se ha dejado la aplicación del MEF para el análisis de elementos continuos tipo losa o pantalla, mientras que los pórticos siguen todavía discretizándose en barras y utilizando el método matricial. Y desde el rápido declive en el coste de los ordenadores y el fenomenal incremento en la potencia de cálculo, el MEF ha desarrollado una increíble precisión. A día de hoy, los superordenadores son capaces de dar resultados exactos para todo tipo de parámetros.

El desarrollo de un algoritmo de elementos finitos para resolver un problema definido mediante ecuaciones diferenciales y condiciones de contorno requiere en general cuatro etapas:

1. El problema debe reformularse en forma variacional.
2. El dominio de variables independientes debe dividirse mediante una partición en subdominios, llamados elementos finitos.
3. Se obtiene la proyección del problema variacional original sobre el espacio de elementos finitos obtenido de la partición. Esto da lugar a un sistema con un número de ecuaciones finito, aunque en general con un número elevado de ecuaciones incógnitas. El número de incógnitas será igual a la dimensión del espacio vectorial de elementos finitos obtenido y, en general, cuanto mayor sea dicha dimensión tanto mejor será la aproximación numérica obtenida.

4. El último paso es el cálculo numérico de la solución del sistema de ecuaciones.

Los pasos anteriores permiten construir un problema de cálculo diferencial en un problema de álgebra lineal. Dicho problema en general se plantea sobre un espacio vectorial de dimensión no-finita, pero que puede resolverse aproximadamente encontrando una proyección sobre un subespacio de dimensión finita, y por tanto con un número finito de ecuaciones (aunque en general el número de ecuaciones será elevado típicamente de miles o incluso centenares de miles).

La discretización en elementos finitos ayuda a construir un algoritmo de proyección sencillo, logrando además que la solución por el método de elementos finitos sea generalmente exacta en un conjunto finito de puntos. Estos puntos coinciden usualmente con los vértices de los elementos finitos o puntos destacados de los mismos. Para la resolución concreta del enorme sistema de ecuaciones algebraicas en general pueden usarse los métodos convencionales del álgebra lineal en espacios de dimensión finita.

En primer lugar, en el campo de desplazamientos, se puede definir según sus tres componentes de la forma:

$$\mathbf{u}(x, y, z) = \begin{bmatrix} u(x, y, z) \\ v(x, y, z) \\ w(x, y, z) \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Siendo $u(x; y; z)$, $v(x; y; z)$ y $w(x; y; z)$ los desplazamientos en las tres direcciones según los ejes cartesianos x , y i z , respectivamente.

A partir del campo de desplazamientos, se pueden extraer las deformaciones según la teoría general de la elasticidad. Así se obtienen las siguientes expresiones.

$$\begin{aligned}\epsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} \\ \epsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\end{aligned}\quad (1.2)$$

Siendo ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z las deformaciones normales.

2.4 Fundamentos de la Conformación Plástica en los metales

Para la Hipótesis, en el método general de análisis empleado en la resistencia de materiales, se parte de la suposición de que el miembro está en equilibrio. Se aplican las condiciones de equilibrio estático a las fuerzas que actúan en algunas partes del cuerpo para encontrar relaciones entre las fuerzas externas e internas. Como las ecuaciones de equilibrio deben expresarse en términos de fuerzas externas que actúan sobre el cuerpo, es necesario transformar las fuerzas resistentes internas en fuerzas externas.

Otras condiciones iniciales son: el cuerpo que se estudia es continuo, homogéneo e isótropo. Continuo pues no hay espacios vacíos, homogéneo porque tiene propiedades idénticas en todos sus puntos, e isótropo respecto de alguna propiedad cuando esta no varía con la dirección u orientación.

A gran escala, el acero, puede considerarse como tal, pero a escala microscópica están constituidos por más de una fase por lo que son heterogéneos. Los metales están constituidos como una agregación de granos cristalinos que poseen distintas propiedades en las diferentes direcciones cristalográficas, pero los granos son tan pequeños frente a nuestro volumen macroscópico que debe considerarlo homogéneo e isótropo. Sin embargo cuando los materiales se deforman severamente en una dirección particular las propiedades pueden ser anisotrópicas en macro escala.

La elasticidad se manifiesta cuando al cargar un cuerpo y luego descargarlo el mismo recupera su configuración geométrica inicial. La recuperación no tiene que ser instantánea, pero siempre que el cuerpo recupere su configuración inicial (en forma instantánea o no), se dirá que el mismo es elástico.

La plasticidad es el caso en que un cuerpo sometido a la acción de cargas exteriores, no recupera su configuración geométrica inicial luego de ser retiradas las mismas. Es decir queda una deformación plástica permanente o remanente que es lo que caracteriza a la plasticidad.

Los procesos de conformación se pueden ser: de compresión indirecta, de compresión directa, de tracción, de plegados o flexión y de cizallamiento.

En los procesos de compresión la fuerza se aplica a la superficie de la pieza que se trabaja y el metal fluye formando ángulo recto con la dirección de la compresión. Los ejemplos principales son la forja y la laminación.

Los procesos de compresión indirecta incluyen el estirado de tubos y alambres, la extrusión y el embutido profundo de una copa.

Las fuerzas aplicadas son frecuentemente de tracción, pero se desarrollan fuerzas de compresión elevadas por reacción entre la pieza que se trabaja y la matriz. El metal fluye bajo un estado de tensiones combinadas en el que hay fuerzas de compresión elevadas en una de las direcciones principales, por lo menos.

La conformación plástica se lleva a cabo por cuatro razones principalmente.

1. Obtener la forma deseada
2. Mejorar las propiedades del material por modificación de la distribución de micro constituyentes.
3. Mejorar las propiedades del material por afinado del tamaño de grano.
4. Introducir endurecimiento por deformación.

Los procesos de conformación plástica destinados a transformar un lingote o palanquilla en un producto tipificado de forma sencilla (Chapa, plancha o barra) se llaman procesos primarios de trabajo mecánico.

Los métodos de conformación que producen piezas de la forma acabada definitiva se llaman procesos secundarios de trabajo mecánico.

La conformación en frío acarrea un aumento en la resistencia mecánica y una disminución de la ductilidad. Si provocamos grandes deformaciones el metal puede romperse antes de alcanzar la forma deseada. Por esta razón, puede realizarse en varias etapas, intercalando tratamientos térmicos intermedios (Ej. Recocido) que restauran la ductilidad y disminuyen la resistencia.

Ajustando convenientemente el ciclo de trabajo en frío y tratamientos térmicos se pueden obtener piezas con cualquier grado de endurecimiento.

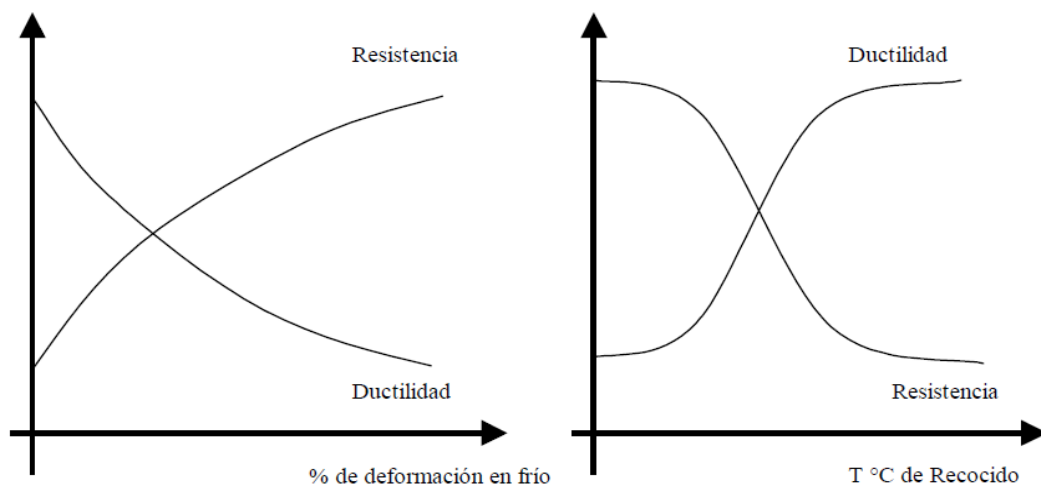
La respuesta de un metal a la conformación depende de la velocidad de deformación.

Ciertos metales pueden romperse por debajo de una temperatura determinada si se les aplica una carga a mucha velocidad o por el choque. Los valores típicos de velocidad en distintos ensayos de deformación son los siguientes:

OPERACIÓN	VELOCIDAD [m/seg.]
Ensayo de Tracción	5×10^{-5} a 5×10^{-1}
Extrusión con prensa hidráulica	0,003 a 3
Prensa Mecánica	0,15 a 1,5
Ensayo Charpy	3 a 6
Martillo de Forja	3 a 10

Las velocidades en la mayor parte de los procesos industriales son mayores que en un ensayo de tracción por lo que los valores del límite elástico determinados en dicho ensayo no pueden ser aplicados directamente al cálculo de cargas empleadas en la conformación.

En el trabajo en frío, la velocidad de deformación tiene poca influencia, salvo algunos materiales de comportamiento frágil en ciertos intervalos de temperatura para elevadas velocidades de deformación.



El límite elástico para el trabajo en caliente es fuertemente afectado por la velocidad de deformación. Para medir el límite elástico durante las operaciones de conformación en caliente se emplea una máquina de compresión a alta velocidad.

A grandes velocidades la temperatura de trabajo en caliente debe ser más elevada pues el tiempo de permanencia a esa temperatura es más breve. Pero esto aumenta el peligro de la fragilidad en caliente.

Efecto de las estructuras metalúrgicas en los procesos de conformación

Las fuerzas necesarias para realizar la conformación están íntimamente ligadas al límite elástico, que a su vez depende de la estructura metalúrgica y la composición de la aleación.

En los metales puros, la facilidad del trabajo mecánico disminuye al aumentar el punto de fusión, y la temperatura mínima de trabajo en caliente aumentará también con el punto de fusión.

La adición de elementos de aleación eleva la curva de fluencia cuando forman solución sólida y por consiguiente aumentan las fuerzas necesarias, a su vez hacen descender el punto de fusión por lo que las temperaturas de trabajo serán mas bajas.

Las características de trabajo plástico de las aleaciones de dos fases dependen de la distribución microscópica de la segunda fase.

- La presencia de una fracción grande de partículas duras uniformemente distribuidas incrementa el límite de fluencia.
- Si en cambio son blandas no producen gran variación en las condiciones de trabajo,
- Si tienen bajo punto de fusión pueden dar fragilidad en caliente.
- En el acero recocido, un tratamiento de globalización que convierte laminillas de cementita de la perlita en glóbulos mejora el trabajo en frío.
- Si la segunda fase dura se localiza en el límite de grano dificulta la conformación, pues se puede producir fractura en límite de grano.

Las partículas de segunda fase tenderán a tomar la forma y distribución que corresponde a la deformación del cuerpo.

- Si son más blandas y dúctiles que la matriz, las partículas que son originalmente esféricas tomaran una forma elipsoidal.
- Si son mas duras, no se deformarán.

La orientación de estas partículas (en trabajo en caliente) y la fragmentación de los granos (trabajo en frío) son responsables de la estructura fibrosa típica que puede ponerse de manifiesto por macro ataque.

Una consecuencia de este fibrado mecánico es que las propiedades mecánicas pueden ser diferentes para distintas orientaciones de las probetas de ensayo con respecto a la dirección principal de conformación.

En general, la ductilidad en tracción, las propiedades de fatiga y las de choque serán más bajas en la dirección transversal que en la longitudinal.

Si en una aleación se produce una precipitación mientras el metal se está conformando, aumenta el límite elástico y disminuye su ductilidad pudiendo producirse el agrietamiento. La precipitación se produce normalmente cuando la velocidad de conformación es pequeña y la temperatura elevada.

Si en cambio se produce un cambio de fase esto contribuye a aumentar el límite elástico de los productos laminados en frío, y puede producirse el agrietamiento.

Uno de los objetivos es llegar a expresar las fuerzas y las deformaciones de los procesos en el lenguaje de la mecánica aplicada para poder predecir las fuerzas que se necesitan para obtener una forma determinada.

Es necesario el empleo de hipótesis simplificadoras. El criterio de fluencia de Von Mises o de la energía de deformación es el que da resultados que están más de acuerdo con los experimentales.

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 \times \sigma_o^2$$

En tanto que los criterios de la máxima tensión cizallante difieren solo en un 15% que teniendo en cuenta las imprecisiones de los análisis de las operaciones complejas se puede considerar análogo al anterior.

LA FRICCIÓN EN LAS OPERACIONES DE CONFORMACIÓN

Es muy importante tomar en cuenta las fuerzas de fricción engendradas entre la pieza que se trabaja y las herramientas, ya que aumentan materialmente la resistencia a la deformación.

Son muy difíciles de medir y constituyen el factor más incierto en el análisis de las operaciones de conformación. Se emplean diversos métodos de lubricación para aminorar todo lo posible las fuerzas de fricción.

La fricción entre la pieza y las herramientas originan tensiones cizallantes a lo largo de las superficies en contacto verificándose:

$$\tau / \sigma = f$$

f depende del material que se trabaja, del de las herramientas, de la rugosidad de la superficie, del lubricante, de la velocidad de deformación y de la temperatura.

La fricción aumenta con el movimiento relativo de la pieza y herramienta, pero disminuye apreciablemente para altas velocidades.

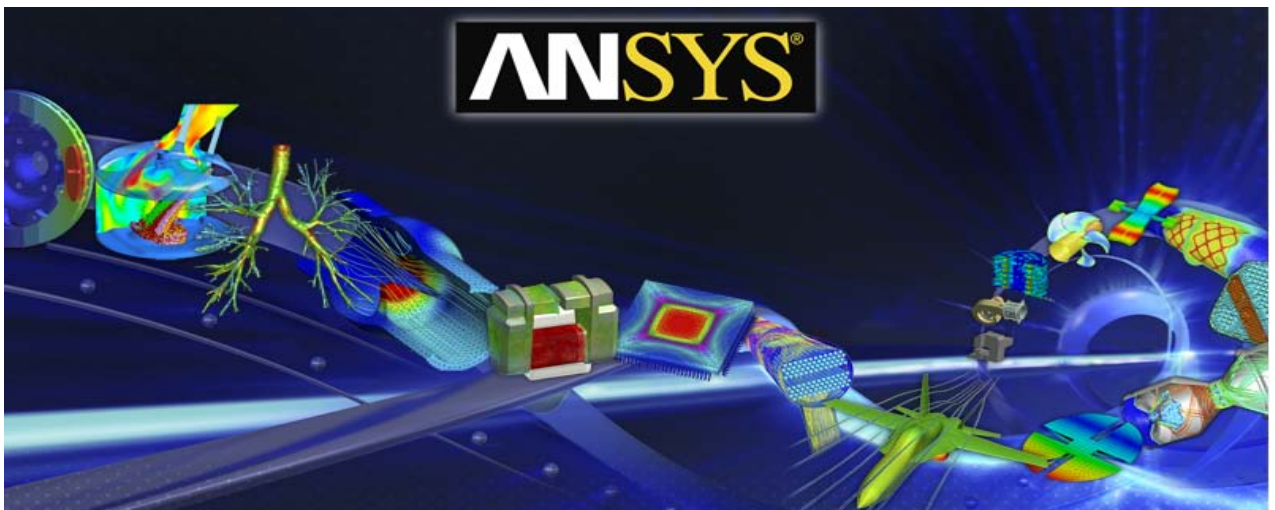
Suelen ser mayores en los trabajos en caliente debido a que la oxidación empasta las superficies del material.

Capítulo 3

MODELIZACION

3.1 Introducción

El programa ANSYS es un programa de elementos finitos de uso general desarrollado y mantenido por Swanson Analysis Systems Inc. Está estructurado en un conjunto de rutinas que se agrupan en tres, grandes bloques, en correspondencia con las tres fases en que se divide la resolución de un problema numérico.



Un programa de elementos finitos tiene tres fases a seguir. En la primera fase, el **Pre-proceso**, reúne aquellas rutinas que permiten definir la malla que se utilizará en el cálculo, establecer condiciones geométricas y materiales, y condiciones de contorno y de carga, siendo posible representar gráficamente todo el modelo generado.

La segunda fase de solución es interna y en ella el programa no se comunica con el usuario. Durante esta fase se calcula la matriz de rigidez de la estructura, con la que se ejecuta el análisis de la malla y se determinan tensiones, desplazamientos y otros datos básicos en cada elemento.

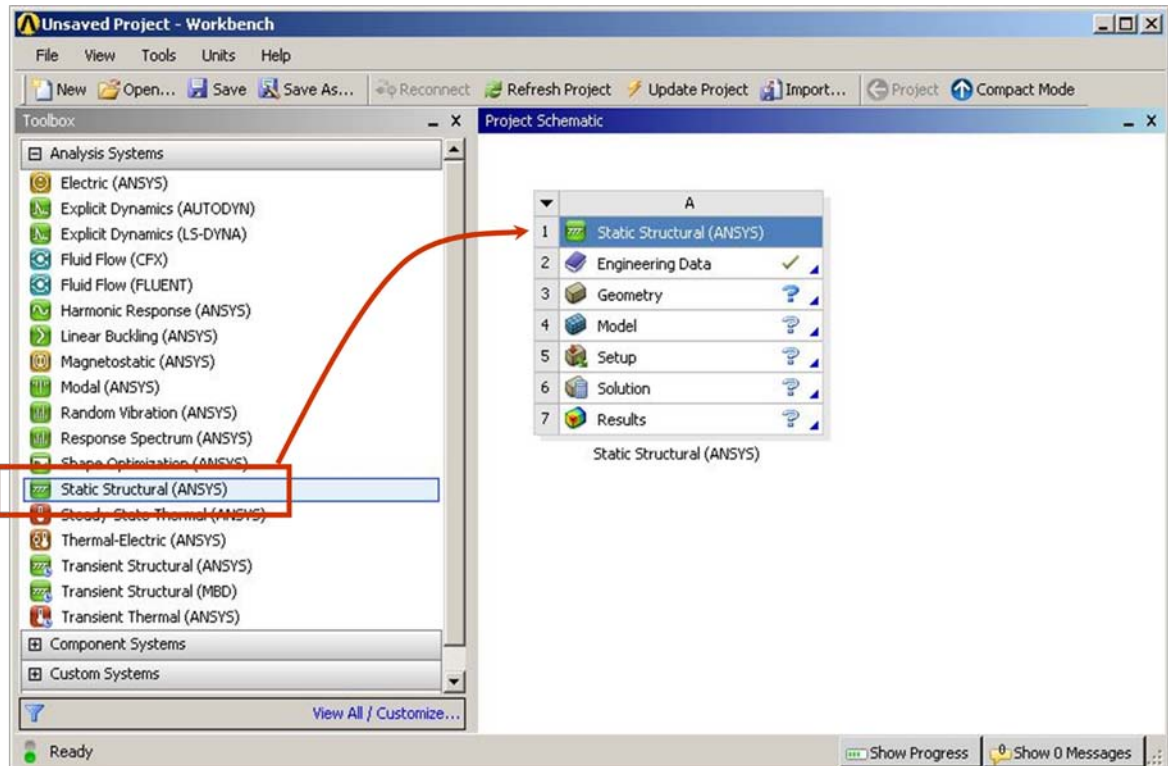
El proceso acaba con la tercera fase, el **Post-proceso**, en la que el usuario tiene acceso a la información generada y puede realizar operaciones con los datos obtenidos, imprimirlos o dibujarlos.

3.2 Pre-procesado

3.2.1 Geometría

El software de Elementos Finitos ANSYS Workbench, permite realizar tareas de construcción o importación de modelos, aplicación de cargas, determinar las respuestas físicas como esfuerzos, distribuciones de temperatura o campos electromagnéticos, optimizar diseños existentes, realizar pruebas virtuales sobre componentes en etapa de diseño.

Proporciona potentes métodos para interactuar con las aplicaciones de Ansys ofreciendo una interfaz grafica de sencillo uso como el Workbench, mediante la caja de herramientas nos permite visualizar y configurar.



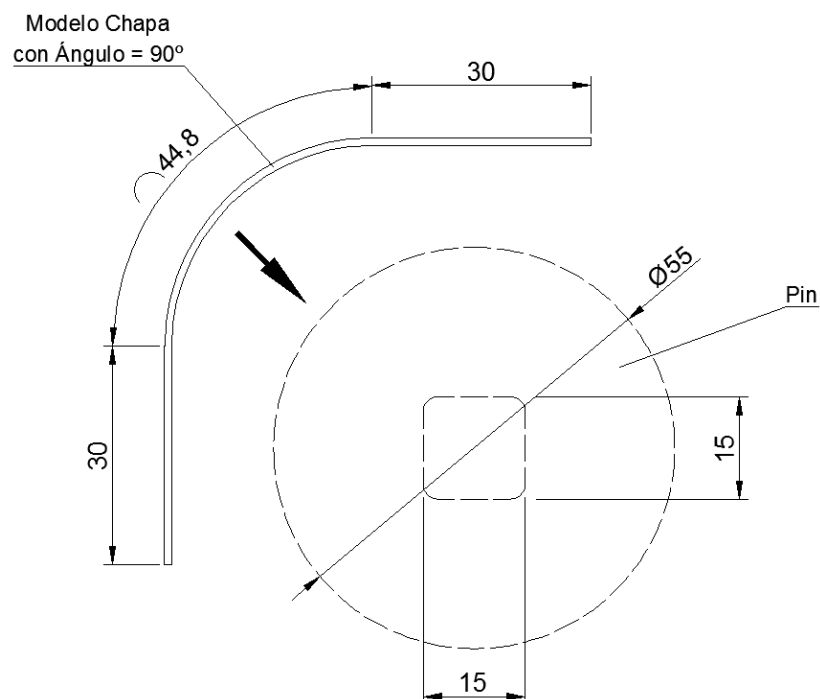
El esquema del Workbench es una representación gráfica del flujo de trabajo de la definición de un sistema o grupo de sistemas. El flujo de trabajo en el esquema del proyecto es

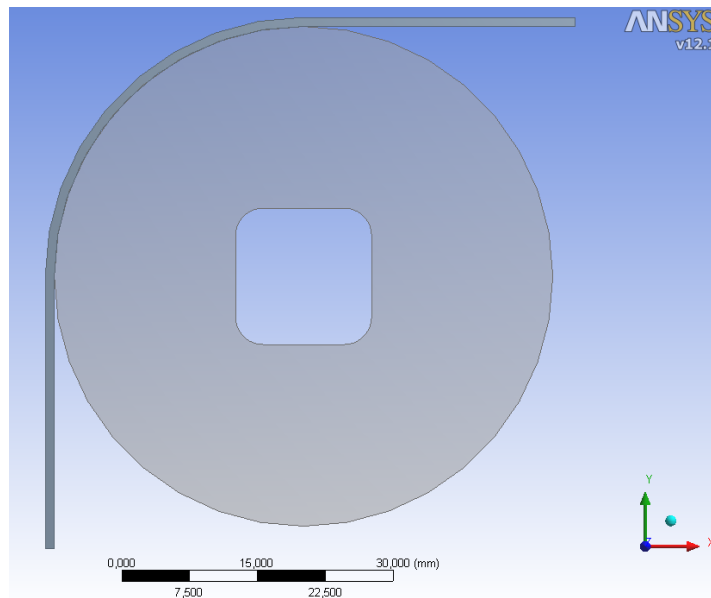
siempre de izquierda a derecha, entre las que se encuentra el esquema del proyecto, los datos de ingeniería y el diseño de exploración.

La representación del modelo en 2D para el análisis estructural se realiza partiendo desde cero, para lo cual dibujaremos el modelo directamente en el software de ANSYS para modelado DesignModeler, el cual cuenta con una tecnología que también proporciona potentes herramientas para la construcción de la geometría a partir de cero. Un modelo complejo puede ser producido mediante las conocidas operaciones de modelado de sólidos.

DesignModeler permite importar y exportar modelos CAD en distintos formatos de intercambio. Los dibujos de dos dimensiones pueden ser extruidos en 3-D y luego los sólidos pueden ser modificados con operaciones booleanas. Una historia de la construcción se registra durante la creación de la geometría, lo que permite al usuario hacer cambios y actualizar el diseño.

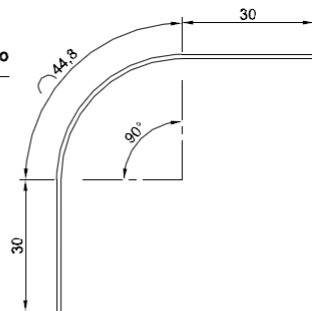
Para la construcción de nuestro modelo en el diseño inicial, tendremos un pin giratorio de 55 mm de diámetro y una chapa de espesor 1 mm, en ángulo variable para las distintas simulaciones, que se deformaría sobre el pin.



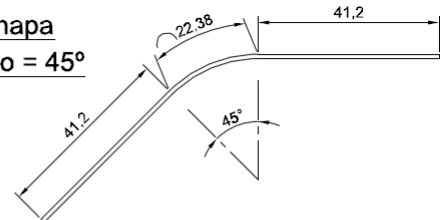


Se determinan los parámetros principales de la geometría, a fin de permitir un rápido cambio y ajuste de diseño para cada una de las condiciones de simulación que aplicaremos.

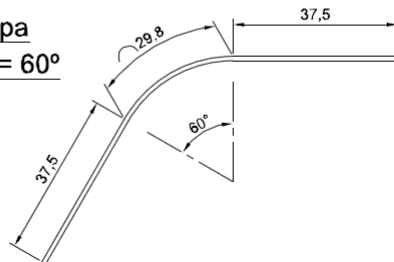
Modelo Chapa con Ángulo = 90°



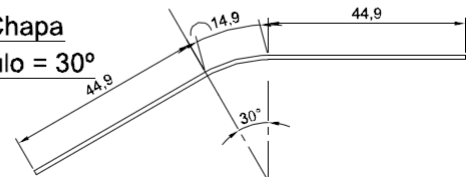
Modelo Chapa con Ángulo = 45°



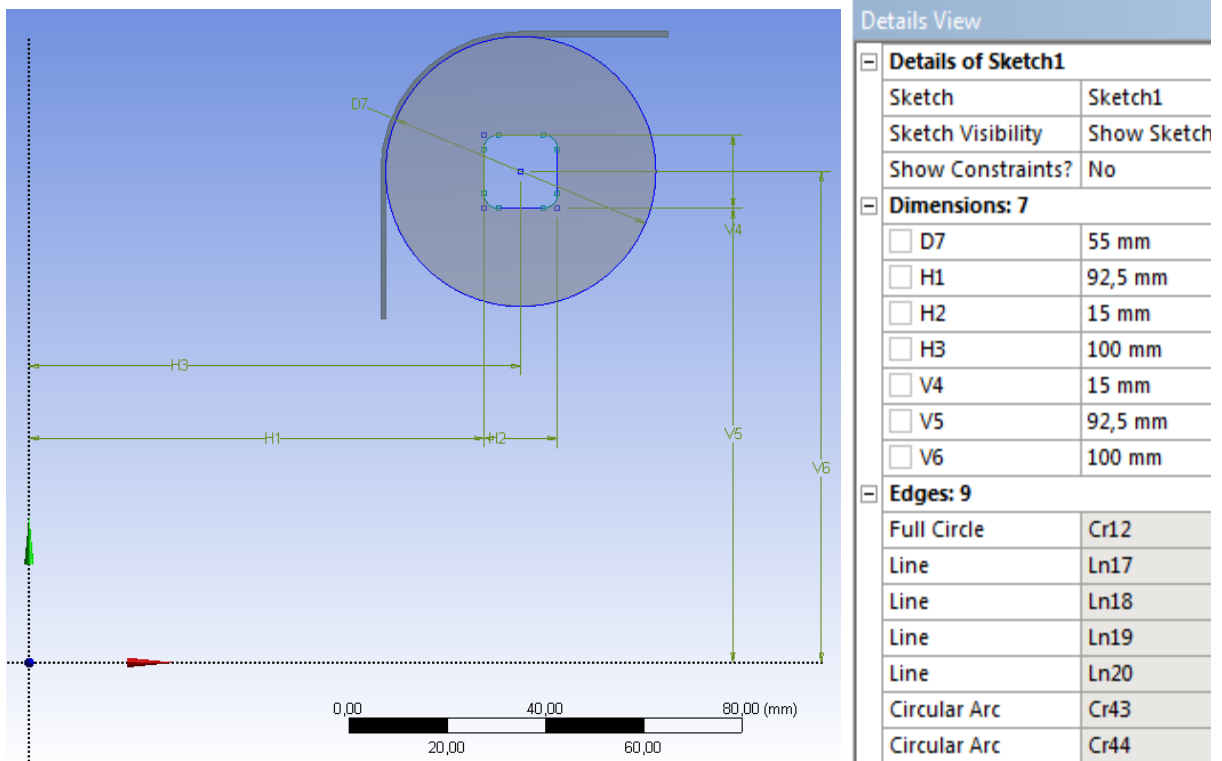
Modelo Chapa con Ángulo = 60°



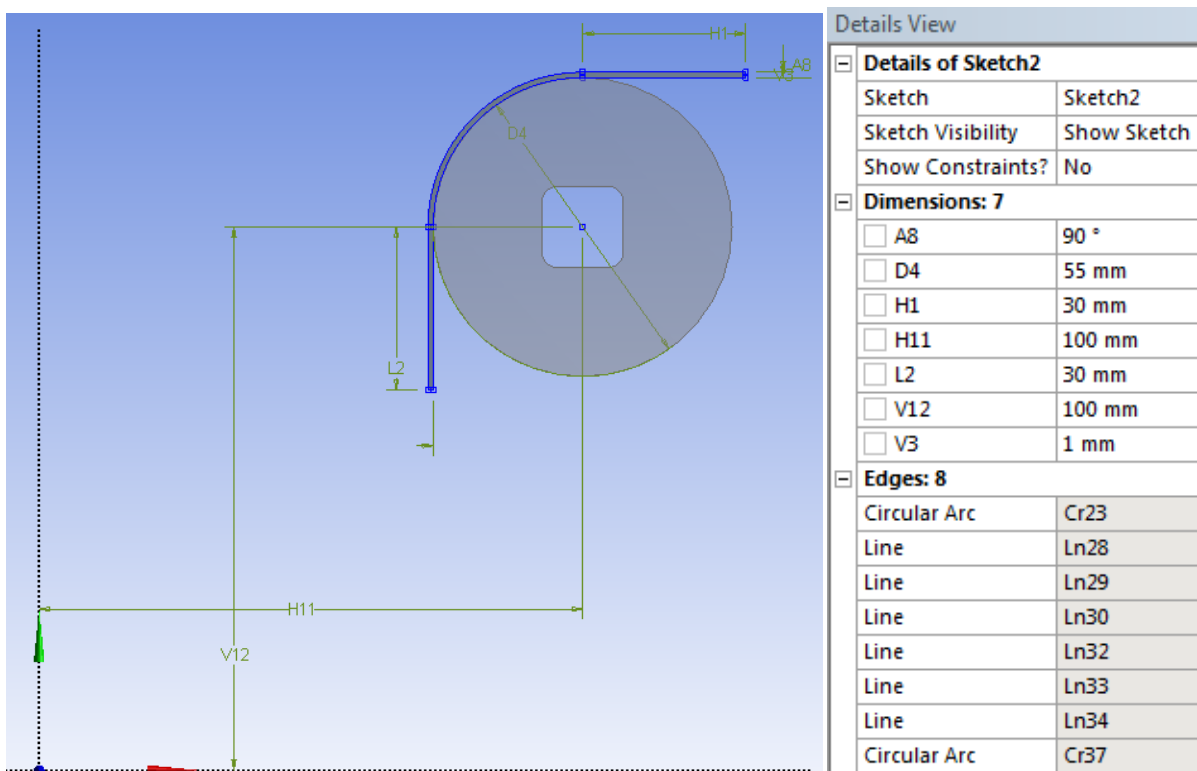
Modelo Chapa con Ángulo = 30°



Modelado del pin:



Modelo de la chapa a 90°:

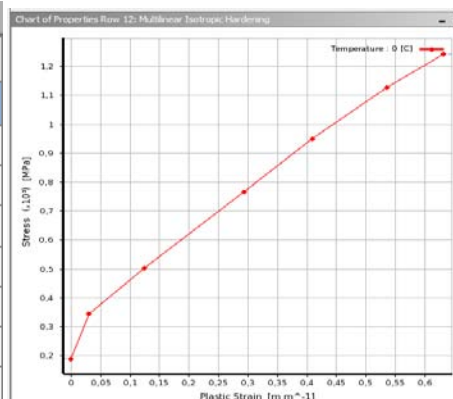


3.2.2 Características de materiales

Para introducir las características del acero TWIP, seleccionamos Multilinear Isotropic Hardening, donde definimos la curva característica de dicho material

Properties of Outline Row 4: TWIP			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	7850	kg m ⁻³
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion		
6	Isotropic Elasticity		
12	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular	
13	Scale	1	
14	Offset	0	MPa

Table of Properties Row 12: Multilinear Isotropic Hardening		
	B	C
1	Plastic Strain (m m ⁻¹)	Stress (MPa)
2	0	189,9
3	0,031	345,1
4	0,1256	504,7
5	0,2936	767
6	0,4098	951,4
7	0,5357	1127,4
8	0,6323	1243



3.2.3 Tipos de elementos

El programa cuenta con un gran número de tipos de elementos. Un tipo de elemento se identifica por un nombre, por ejemplo BEAM3, que se compone de una etiqueta de grupo BEAM y un número de identificación.

Los modelos pueden ser bidimensionales o tridimensionales, dependiendo del tipo de elementos que se utilice. Los modelos bidimensionales se definen en el plano X-Y. También se consideran bidimensionales los modelos axisimétricos. Si se incluye algún tipo de elemento tridimensional, el modelo pasa a ser tridimensional.

En general hay cuatro formas características de elementos: punto, línea, área o volumen.

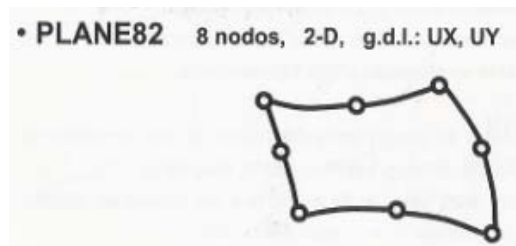
Un elemento puede estar definido por un nodo por ejemplo una masa. Un elemento línea se representa normalmente por una línea recta o curva que conecta dos o tres nodos, como vigas, barras, tubos y laminas axisimétricas. Un elemento de área tiene forma triangular o cuadrilátera y puede ser un elemento sólido 2-D o un elemento lámina. Un elemento de

volumen tiene forma de tetraedro o hexaedro y es normalmente un elemento solido tridimensional.

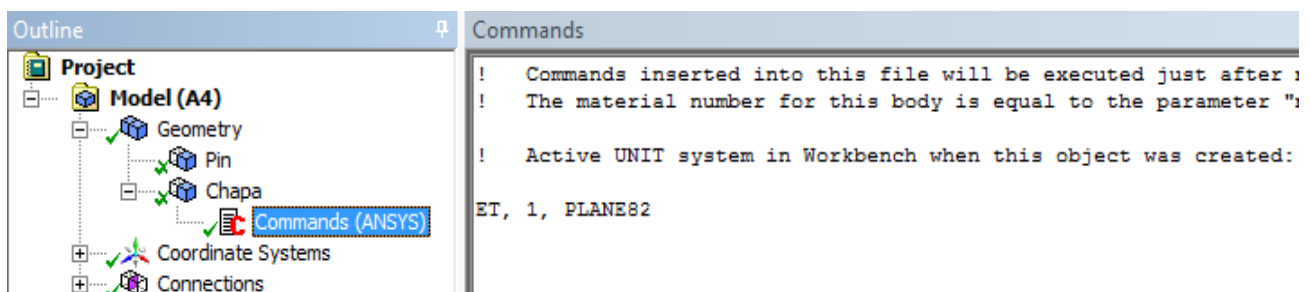
El elemento utilizado es el PLANE82 de 8 nodos estructurales sólidos es una versión de mayor orden de las dos dimensiones, de cuatro nodos elemento (PLANE42). Que proporciona resultados más precisos para mixta (cuadrilátero triangular) automático mallas y puede tolerar formas irregulares sin perder la mayor cantidad de precisión.

Los elementos de 8 nodos tienen una forma compatible con el desplazamiento y se adaptan bien a los límites modelo curvo.

El elemento de 8 nodos se define por ocho nodos con dos grados de libertad en cada nodo: traducciones en el nodo y las direcciones x y. El elemento puede ser utilizado como un elemento plano o como un elemento de simetría axial. El elemento tiene plasticidad, fluencia, rigidez inflamación, el estrés, la desviación grande, y las capacidades de gran tensión. Diversas opciones de impresión también están disponibles.

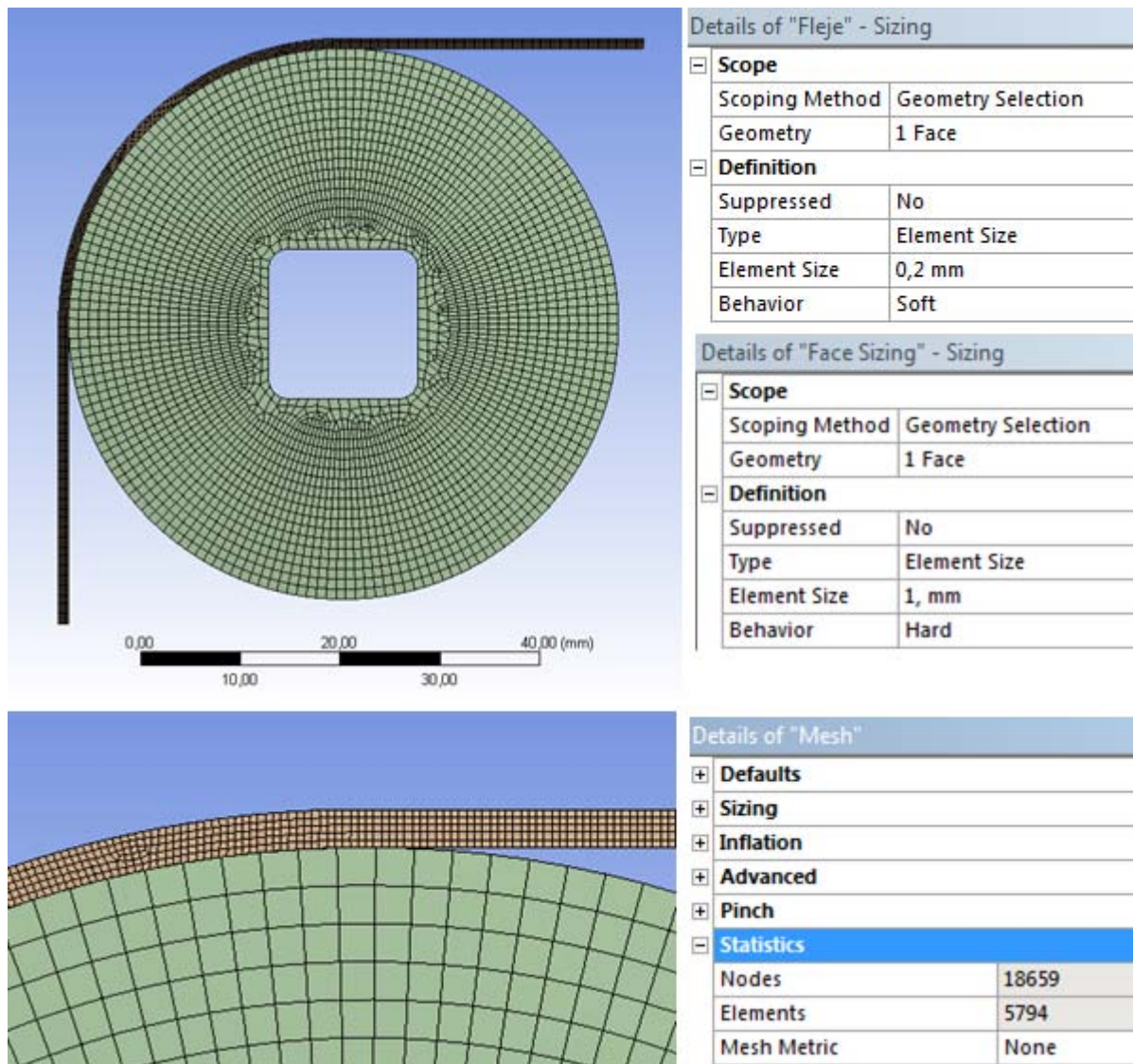


Insertando un cuadro de dialogo de “Comands”, definimos el tipo de elemento para la chapa.



3.2.4 Mallado de la geometría.

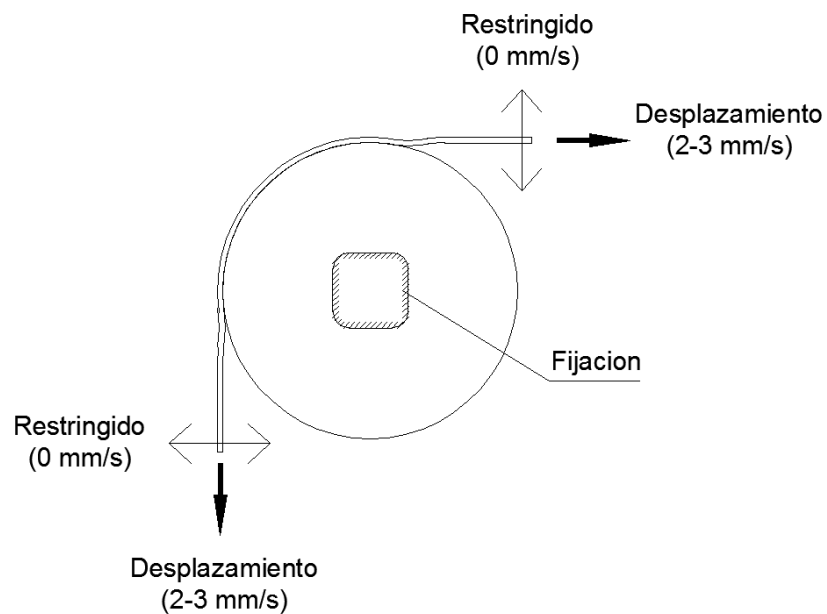
Las superficies creadas han de ser malladas. En primer lugar especificamos para cada superficie su correspondiente tamaño del elemento a utilizar. Una vez definidas las áreas de la chapa y del pin, se ejecuta el mallado, obteniendo el siguiente resultado:



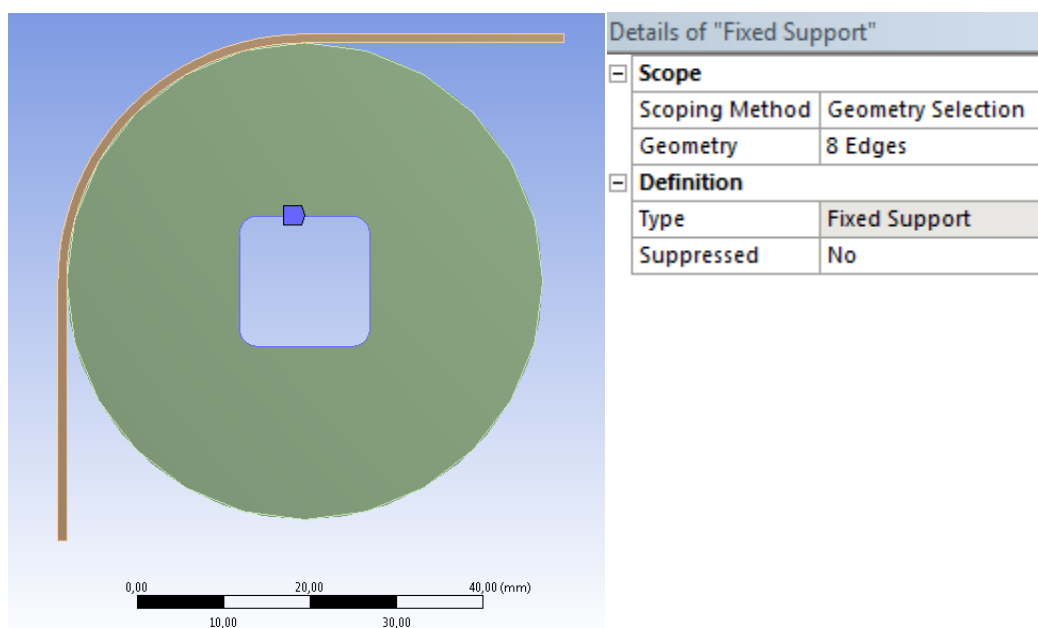
Se ha realizado un mallado mas fino en las zonas que la geometría lo requería, como ser la chapa, las cuales deberán ser justificadas por la robustez de los resultados.

3.2.5 Condiciones de contorno iniciales (apoyos y solicitaciones)

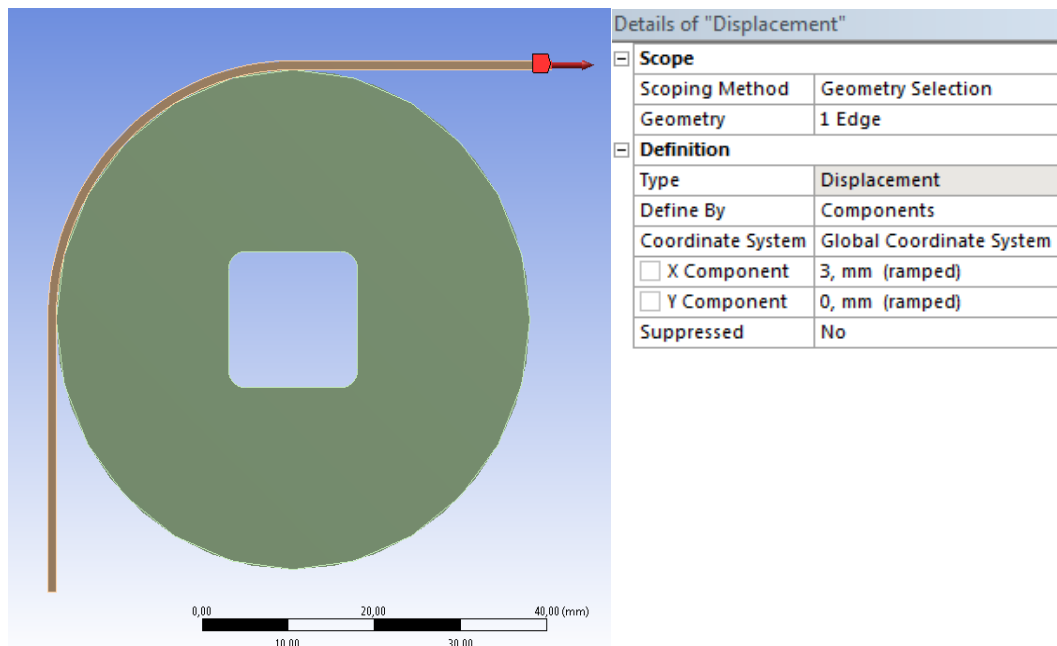
Para la definición de los parámetros de contorno, estableceremos la fijación del centro de pin, como fijo, a fin de estudiar en primera instancia la deformación del estirado de la chapa. Cada uno de los extremos de la chapa, en el sentido a lo largo de la dimensión principal de la chapa, constantes que variaran para cada simulación entre 2 a 3 mm/s. En el sentido transversal lo estableceremos restringido, tal como se muestra en la siguiente figura.



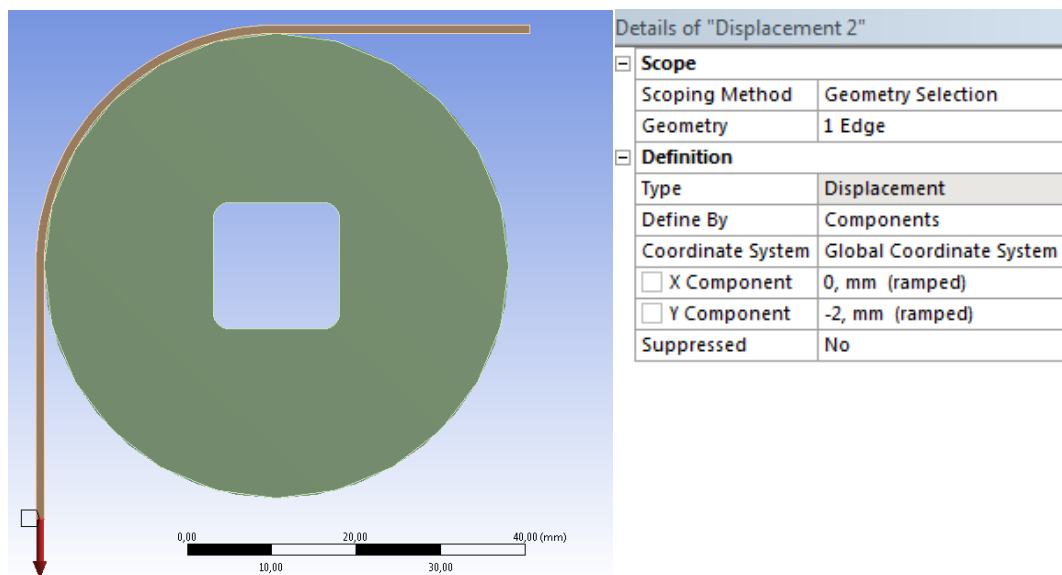
El pin tendrá en su eje central la fijación.



Para los desplazamientos fijos extremos en la dirección longitudinal de la chapa:



Para el otro extremo la configuración dependerá del ángulo de la chapa:



3.2.6 Definición de las condiciones en la Zona de contacto.

Inicialmente hemos considerado el modelo de fricción rígida de Coulomb, sin posibilidad de incorporar un coeficiente de rozamiento dinámico, siendo el carácter cuasi-estático de los ensayos, siendo en una primera instancia los coeficientes de fricción analizados para la zona de contacto varían entre $\mu = 0,05$ y $0,2$.

Cuando dos superficies se tocan entre si de forma que se vuelven tangentes la una a la otra, se dice que están en contacto.

Características:

- No se penetran
- Pueden transmitir fuerzas normales compresivas y fuerzas tangenciales de fricción
- No transmiten fuerzas normales a tensión.
- Es una no-linealidad de cambio de estado. La rigidez del sistema depende del estado del contacto

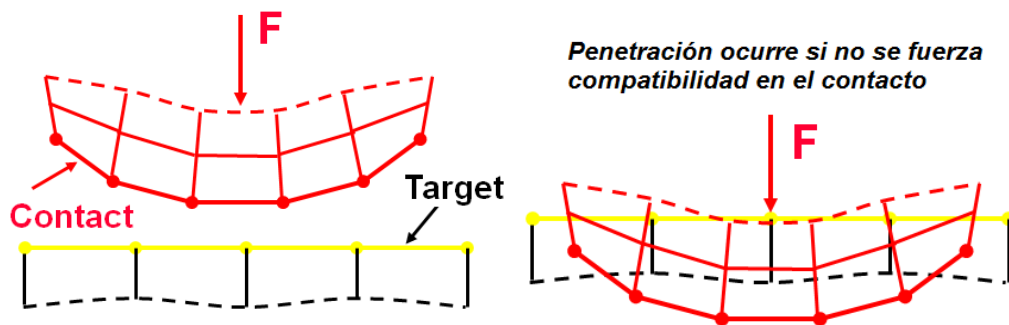
Los problemas de contacto son altamente no lineales y son típicamente los más desafiantes de resolver. Los principales desafíos al resolver un problema con contacto son:

- En la mayoría de los problemas la región de contacto es desconocida. Las superficies entran en contacto y salen de el de manera abrupta lo cual resulta en cambios abruptos en la rigidez del sistema.
- La mayoría de los problemas de contacto incluyen fricción. La fricción es un fenómeno que depende de la trayectoria lo cual requiere un preciso registro de la carga. Finalmente la respuesta a la fricción también puede ser caótica lo cual hace la convergencia de la solución más difícil.

Los problemas de Contacto se clasifican en dos clases generales: rígido-a-flexible y flexible-a-flexible. En la primera, Rígido-a-Flexible, una o mas de las superficies de contacto es tratada como rígida. (Una superficie es significativamente más rígida que la otra.) Muchos problemas de formado de metal caen en esta categoría.

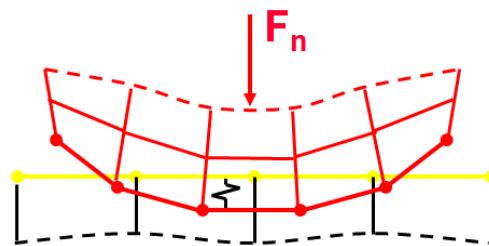
En la segunda, flexible-a-Flexible, ambos o todos los cuerpos en contacto se deforman. (Todas las superficies tienen rigidez similar.)

Para prevenir que las superficies de contacto se penetren la una en la otra se debe establecer una relación entre ambas. De otra forma cuando se comienzan a deformar se previene que una de ellas pueda penetrar la otra.

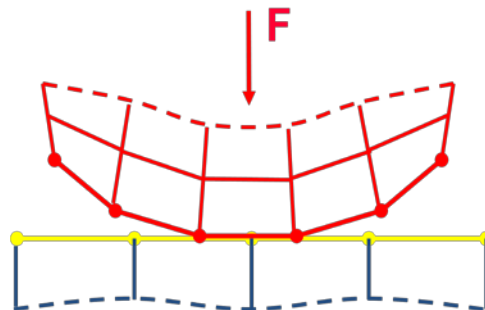


El uso de resortes para forzar las compatibilidades en el contacto se denomina el método de Penalización. La rigidez del resorte o la rigidez del contacto se denomina el parámetro de penalización. El resorte se deflejará una cantidad Δ tal que el equilibrio es satisfecho, $F = k \Delta$

Entre más alta la rigidez del contacto (k) menor ocurrirá la penetración en la superficie de contacto. Sin embargo un valor muy alto puede llevar a problemas de convergencia.



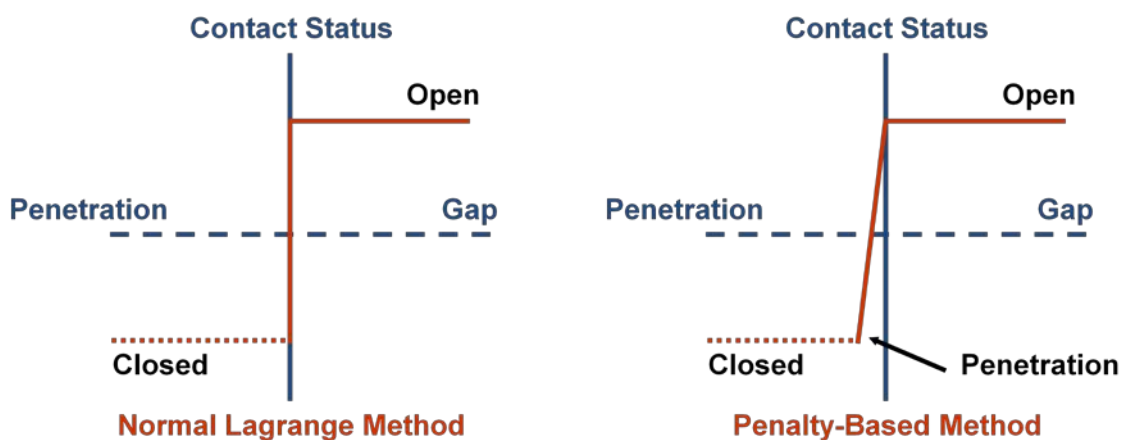
Un método alternativo es el de multiplicadores de Lagrange. Este añade un grado de libertad adicional (la presión de contacto F), para satisfacer la condición de impenetrabilidad.



Se fuerza cero penetración con la presión de contacto Requiere un Solucionador directo (más costoso).

Si no hay penetración (siguiente figura, izquierda), Entonces el estado del contacto es abierto o cerrado (una función de paso). Esto puede hacer que la convergencia sea lenta porque los puntos de contacto pueden oscilar entre abiertos y cerrados. Esto se llama Chattering.

– Si algo de penetración es permitida (derecha) puede hacer que el algoritmo converja ya que la función es una rampa y no un paso discreto.

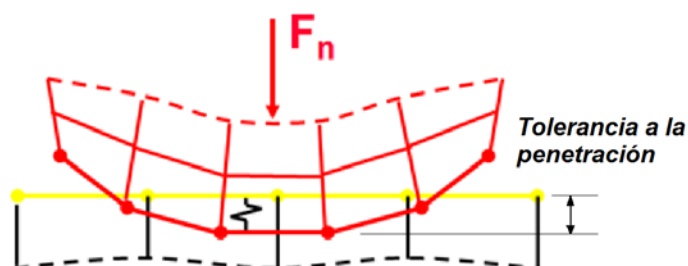


La combinación de ambos métodos, el de penalización y el de multiplicadores de Lagrange, para garantizar la compatibilidad se denomina el Lagrangiano Aumentado.

$$\bullet F = k \Delta + \lambda$$

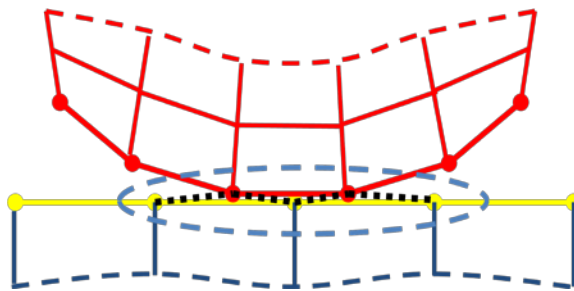
En las primeras iteraciones, el contacto es determinado con base en la rigidez de la penalización. Una vez el equilibrio es establecido se verifica la tolerancia a la penetración.

En este punto si es necesario se aumenta la presión de contacto y se continúan las iteraciones.



Para casos específicos del tipo “Bonded” (pegado) y “si Separación” entre caras, existe una formulación: multi-point constraint (MPC).

- MPC añade restricciones a las ecuaciones para pegar los desplazamientos entre las superficies de contacto.
- No es basado en las anteriores formulaciones. Es una forma directa y eficiente de relacionar superficies de contacto que sabemos que están pegadas
- Efectos como grandes deformaciones están soportadas por la formulación MPC



Los métodos mencionados relacionan el contacto en la dirección normal. Si la fricción o las superficies son rugosas entonces una situación similar ocurre en la dirección tangencial

- parecido a la condición de impenetrabilidad, en la dirección tangencial, las dos superficies no deben deslizarse el uno con respecto al otro si están pegados por esta condición.
- Se usa un algoritmo de penalización en esta dirección.
- Se tienen parámetros análogos:

$$\text{Si están pegados } F_{\text{tangential}} = k_{\text{tangential}} x_{\text{sliding}}$$

donde x_{sliding} es idealmente cero para pegado (aunque se permite algún desplazamiento relativo pequeño).

En ANSYS estos parámetros no se pueden cambiar por el usuario. Hay tres tipos de elementos de Contacto:

- Nudo-a-Nudo - Esto implica que la localización final del contacto es conocida de antemano.
- Nudo-a-Superficie - Las áreas de contacto son desconocidas y se permite el deslizamiento.

- Superficie-a-Superficie - Las áreas de contacto son desconocidas y se permite gran cantidad de deslizamiento.

Resumen de opciones en Workbench Mechanical:

Formulation	Normal	Tangential	Normal Stiffness	Tangential Stiffness	Type
Augmented Lagrange	Augmented Lagrange	Penalty	Yes	Yes ¹	Any
Pure Penalty	Penalty	Penalty	Yes	Yes ¹	Any
MPC	MPC	MPC	-	-	Bonded, No Separation
Normal Lagrange	Lagrange Multiplier	Penalty	-	Yes ¹	Any

(1) La rigidez tangencial no es introducida directamente por el usuario

El método "Normal Lagrange" se llama así porque se usa una formulación de multiplicadores de Lagrange en la dirección normal mientras que se usa un método basado en penalización en la dirección tangencial.

Elementos de contacto Nodo-a-Nodo pueden usarse para modelar un contacto punto a punto. Casos donde el contacto entre las superficies es bien conocido.

Estos elementos también pueden ser usados para modelar problemas en los cuales las dos superficies están alineadas, la cantidad de deslizamiento es despreciable y las deflexiones y rotaciones de las dos superficies permanecen pequeñas. Un problema de interferencia entre dos superficies de contacto es un buen ejemplo de este caso.

También pueden usarse para modelar contacto entre superficies si se definen muchos elementos entre ellas. Las superficies pueden ser rígidas o deformables

La localización del punto de contacto no tiene que ser conocida. Se permiten grandes deformaciones, grandes rotaciones y tipos diferentes de malla entre las superficies de contacto

Estos elementos pueden usarse solo con elementos de bajo orden.

Ambos tipos de contacto requieren que se especifique la rigidez de la penalización. Entre más alta la rigidez menos penetración ocurrirá. Sin embargo un valor muy alto en la penalización puede llevar a problemas de convergencia debido a problemas de mala condicionamiento en la matriz resultante.

Se puede requerir de algo de experimentación para determinar el valor adecuado de la constante de rigidez

La rigidez del contacto es función de la rigidez relativa de las áreas en contacto.

Para sólidos gruesos la rigidez de contacto de Hertz es normalmente un valor apropiado para la rigidez de penalización, y puede ser estimado por:

$$k = f E$$

donde f es un factor entre 0.1 y 10, y E es el modulo de elasticidad de el material en contacto más suave. Colocar un valor de $f=1$ es normalmente un buen valor para comenzar.

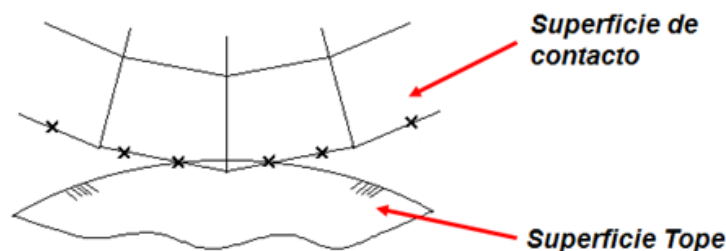
Para componentes flexibles (vigas y conchas) la rigidez del sistema puede ser mucho mas baja que la rigidez de contacto de Hertz.

En esta situación se puede correr un análisis estático con una carga unitaria de contacto aplicada en el área de contacto esperada para determinar la rigidez local del modelo Entonces, la rigidez del contacto se puede estimar de:

$$k = f(P/\Delta)$$

donde para el cuerpo de contacto flexible f es un factor entre 1 y 100. De nuevo, colocar $f=1$ es normalmente un buen valor para comenzar

Existen elementos superficie-a-superficie para contacto entre entre cuerpos rigido-flexibles y flexibles-flexibles. Estos elementos usan el concepto de "target surface" y una "contact surface" para formar un par de contacto.

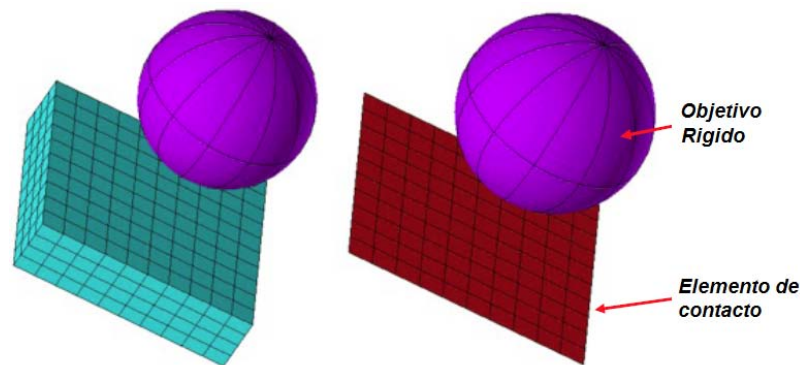


Estos elementos usan por defecto el Lagrangiano Aumentado para asegurar la compatibilidad de la deformación

- Compatible con elementos de bajo orden y alto orden
- Soporta grandes deformaciones con deslizamiento y fricción.

- Dan mejores resultados (Fácil de postprocesar la presión de contacto y los esfuerzos por fricción).
- Tienen en cuenta el espesor de vigas y conchas y también cambios en el espesor de las conchas.
- Solución semi-automática de los cálculos de rigidez de contacto
- Opciones a tipo “Pilot node” y Wizard para colocar los parámetros de la optimización).

Pares de Contacto



Identificación de las superficies de contacto

Se designa las superficies “target” y “contact”.

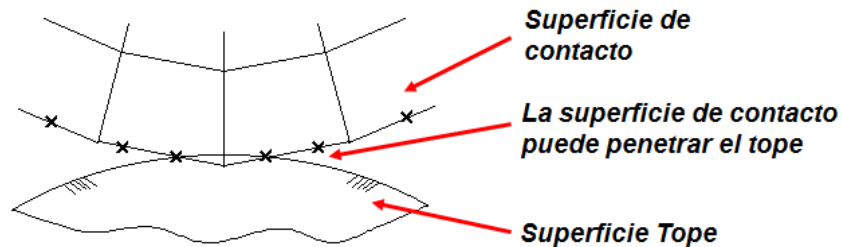
Para contacto rígido a flexible la superficie rígida es siempre designada como la superficie “target”.

Los elementos de contacto están restringidos para que no penetren la superficie “target”. Sin embargo los elementos “target” pueden penetrar la superficie de “contacto”

Pasos Generales en un análisis de Contacto:

- 1.- Crear el modelo de elementos Finitos del problema
- 2.- Designar las superficies “contact” y “target”
- 3.- Colocar las opciones y variables reales
- 4.- Crear los elementos de la superficie “target”
- 5.- Crear los elementos de la superficie de “contacto”
- 6.- Aplicar las condiciones de frontera
- 7.- Defina las opciones del solucionador y los pasos de carga
- 8.- Resuelva
- 9.- Revise los resultados.

La meta es minimizar el número de puntos de detección del contacto. Para contacto rígido-flexible la superficie "target" es siempre la rígida. Para contactos flexible-a-flexible la selección de las superficies "target" y "contact" puede causar diferentes cantidades de penetración y así afectar la precisión de la solución.



Se pueden usar diferentes patrones de enmallado de la superficie rígida usando elementos de bajo y alto orden

Elementos de bajo orden son menos costosos computacionalmente pero más elementos son necesarios.

Elementos de alto orden son más costosos, pero pocos elementos son necesarios

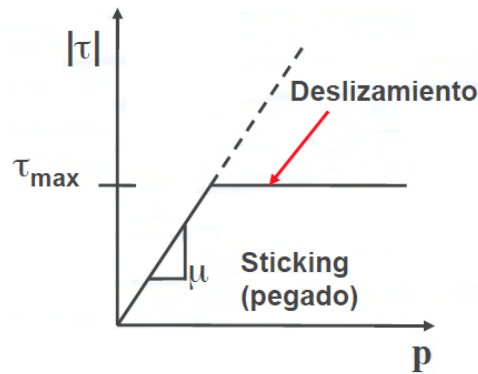
Incluir fricción en un modelo de contacto permite que se desarrollen fuerzas cortantes entre las superficies de contacto. En un modelo de fricción de Coulomb las dos superficies soportan esfuerzos cortantes hasta que comienzan a deslizarse la una con respecto a la otra.

El modelo de Coulomb define el esfuerzo de fricción equivalente τ al cual ocurre deslizamiento como $\tau = \mu \times p$

Donde p es la presión de contacto y μ es el coeficiente de fricción (definido como la propiedad del material μ). Una vez el esfuerzo cortante excede este valor las superficies se deslizan. El coeficiente de fricción μ puede ser cualquier valor no negativo.

ANSYS provee una constante Tau para definir el esfuerzo cortante equivalente máximo total que a pesar de la magnitud de la fuerza de contacto habrá deslizamiento

El cortante limite es usado en casos que la presión de contacto se vuelve muy larga. Un valor razonable esta dado por donde σ_y es el esfuerzo a la cedencia de von Mises del material adyacente a la superficie. Datos empíricos generalmente son la mejor fuente para Tau.



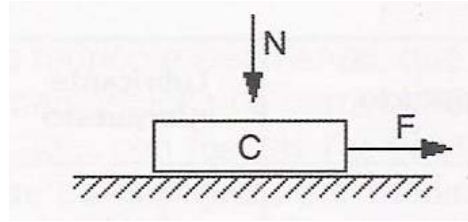
Los problemas de contacto que involucran fricción producen matrices que no son simétricas. Sin embargo la solución de ecuaciones asimétricas es computacionalmente más lento que el simétrico. Algunos programas comerciales como ANSYS usan un algoritmo para volver simétrico el problema de tal forma que todos los problemas de contacto pueden ser solucionados.

Usar contacto asimétrico es mas eficiente para problemas que involucran auto contacto pero puede ser mas difícil de predecir las superficies "contact" y "target". Para usar contacto simétrico se colocan elementos "target" y "contact" en la misma superficie

Para analizar los efectos del rozamiento sobre los efectos y energías de deformación, lo haremos, por simplicidad matemática, en el caso de estirado de chapa, pero también nos servirá para su extensión al resto de casos de deformación en frio.

Vamos a analizar dos tipos de rozamiento: el rozamiento solido que se produce cuando los cuerpos que se rozan resultan indeformables; y el rozamiento viscoplastico que se produce si los cuerpos que rozan pueden deformarse mientras se esta produciendo el frotamiento.

Cuando un cuerpo solido indeformable es obligado a deslizar sobre una superficie por acción de una fuerza F , paralela a la superficie, a la vez que es sometido a un a fuerza N perpendicular a la misma, se comprueba experimentalmente:



Si F es menor que el producto $\mu_e \cdot N$, donde μ_e es un coeficiente característico del estado y de la naturaleza de los materiales en contacto, el cuerpo no se mueve.

Si F es estrictamente igual al producto $\mu_e \cdot N$ el cuerpo inicia su movimiento que luego se mantiene aunque F disminuya algo hasta el valor límite $\mu_d \cdot N$, siendo μ_d un nuevo coeficiente de valor algo menor que el anterior ($\mu_d < \mu_e$) que como el anterior, depende de las características y de la naturaleza de los materiales en contacto.

Los coeficientes μ_e y μ_d se denominan “coeficiente estático de rozamiento” y “coeficiente dinámico de rozamiento”. Realmente no se diferencian mucho entre sí, por lo que se suele definir, para cada caso de materiales en contacto, un único “coeficiente de rozamiento” μ . El valor:

$$F_R = \mu \cdot N$$

F_R es la fuerza de rozamiento, o mejor expresado, la fuerza necesaria para vencer el rozamiento entre las superficies en contacto de ambos cuerpos, y paralela a estas superficies. Es la fuerza que permite iniciar y mantener el deslizamiento de un cuerpo sobre el otro.

Los coeficientes de rozamiento no dependen ni de la extensión de la superficie de contacto de los cuerpos, ni del valor del esfuerzo normal, sino exclusivamente de la naturaleza de los cuerpos en contacto, de su temperatura, y de su estado superficial.

Para disminuir el rozamiento es práctica usual en la industria interponer entre las superficies en contacto un lubricante que permita más fácilmente su movimiento relativo. Como ejemplo, son valores normales de μ los dados en la siguiente tabla, para los materiales y lubricantes que se indican, a temperatura ambiente (valores usuales de los coeficientes de rozamiento sólido, para algunos casos particulares):

Materiales en contacto	Lubricante Interpuesto	Coefficiente de rozamiento (μ)
Acero con acero	Grafito	0,15
Bronce con acero	Aceite	0,07
Fundición gris con acero	Seco	0,30
Cáñamo con madera	Seco	0,50

A medida que aumenta la temperatura de los cuerpos en contacto, aun tratándose de rozamiento solido, varia el coeficiente que, normalmente, aumenta al aumentar la temperatura. Por ejemplo cuando rozan con acero con una película lubricante intercalada de grafito coloidal disuelto en agua, se obtienen experimentalmente los siguientes valores:

Temperatura < 900°C $\mu = 0,15$

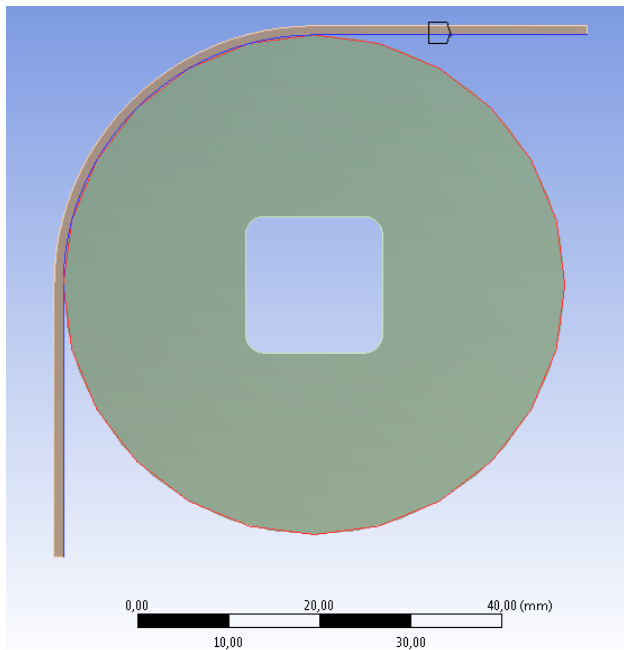
Temperatura = 1.000°C $\mu = 0,16$

Temperatura = 1.100°C $\mu = 0,17$

Las razones para producirse el rozamiento solido se encuentran en varias causas, de entre las que las mas importantes son: los engranes que se producen entre las crestas y los valles microscópicos debidos a las rugosidades superficiales de los materiales en contacto; el efecto de las microsoldaduras superficiales originadas por la fuerza N; y las fuerzas eléctricas de cohesión que se originan entre los átomos superficiales próximos de los dos diferentes materiales.

Si el esfuerzo N es de tal magnitud que resulta superior a la carga de fluencia del cuerpo sobre el que actúa, es decir, si este cuerpo sufre deformación plástica, se produce además del rozamiento solido estudiado un efecto suplementario de adherencia entre los dos cuerpos en deslizamiento relativo.

En esas condiciones no se conserva la igualdad $F_R = \mu \cdot N$ y se observa que, si se desea seguir utilizando esa expresión, debe corregirse el valor de μ . Ya no aumenta μ con la temperatura sino que normalmente disminuye, y además ahora el valor de F_R resulta afectado por la extensión de las superficies en contacto. Diremos que se esta produciendo un rozamiento viscoplastico, en lugar del rozamiento solido que hemos analizado anteriormente.



Details of "Frictional - Surface Body To Surface Body"

Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Contact	1 Edge
Target	3 Edges
Contact Bodies	Pin
Target Bodies	Chapa
Definition	
Type	Frictional
<input type="checkbox"/> Friction Coefficient	0,2
Scope Mode	Automatic
Behavior	Asymmetric
Suppressed	No
Advanced	
Formulation	Augmented Lagrange
Interface Treatment	Adjust to Touch
Normal Stiffness	Program Controlled
Update Stiffness	Never
Pinball Region	Program Controlled
Time Step Controls	None

Capítulo 4

RESULTADOS

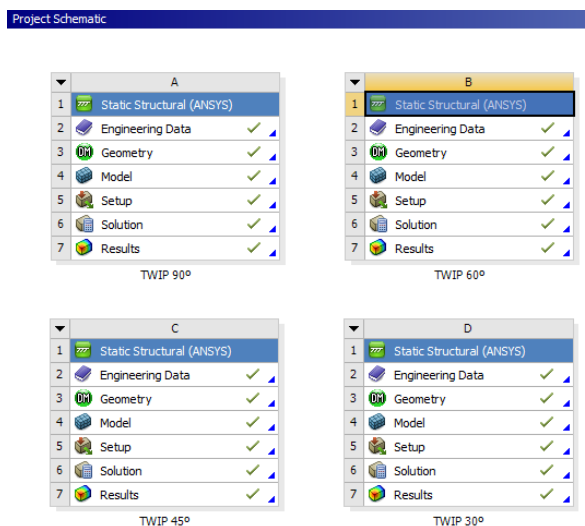
4.1 Aspectos generales

Vamos a obtener los resultados para distintas condiciones de trabajo, que dependerán de los siguientes factores:

- Angulo de la chapa en contacto sobre el pin
- Desplazamientos iguales y distintos en los extremos de las chapas
- Incidencia del coeficiente de rozamiento sobre los distintos resultados
- Distintos diámetro de pin.

Es importante destacar lo que va a afectar a las simulaciones es el desplazamiento de la chapa sobre el pin, para lo cual obtenemos la grafica de la zona de contacto, indicando su resultado al final de la simulación (separado, cerca, deslizado, pegado).

Lo que vamos a observar en el estirado y desplazamiento de la chapa envuelta sobre el pin, es su tendencia a mantener su forma circular original, lo que se manifiesta por un curvado hacia el exterior o el interior, debido a la restricción impuesta de desplazamiento longitudinal en la dirección de la chapa.

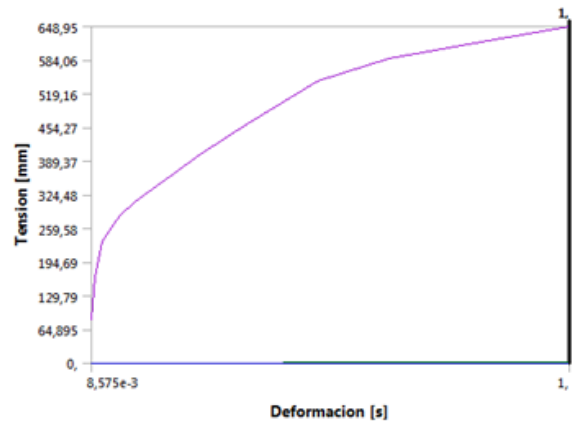
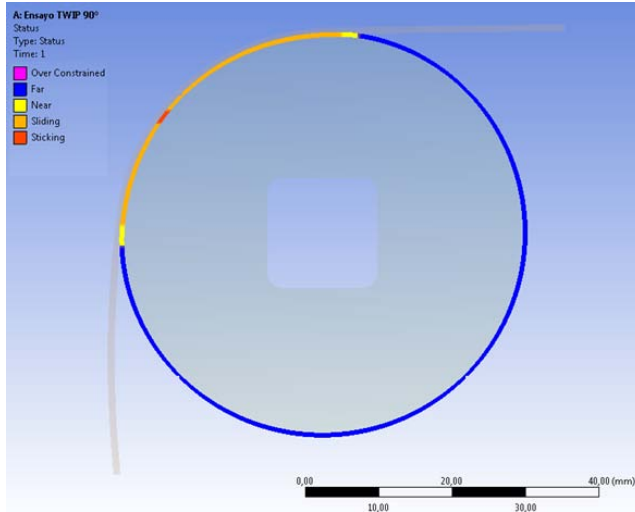
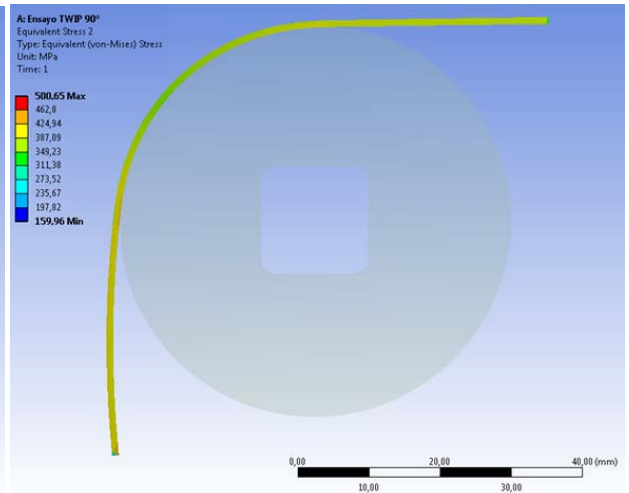
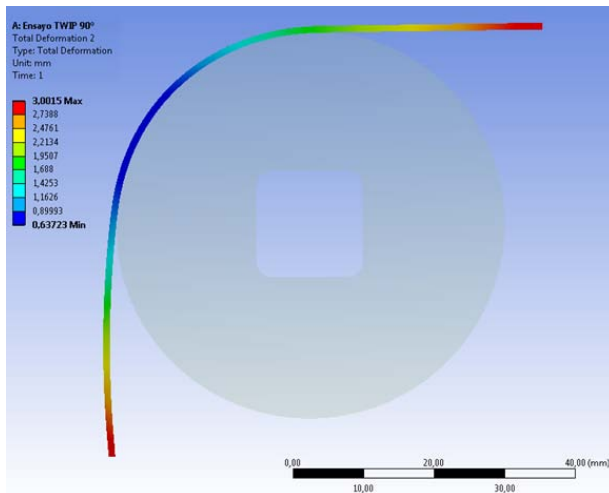


Ensayo: Diametro Pin 55 mm (fijo)

Espesor Chapa = 1,00 mm a 90°

Coef. Rozam. 0,20 – Desplazamientos extremos 3,0 y 3,0 mm/s

Resultados: Deformación, Tensión y Contacto

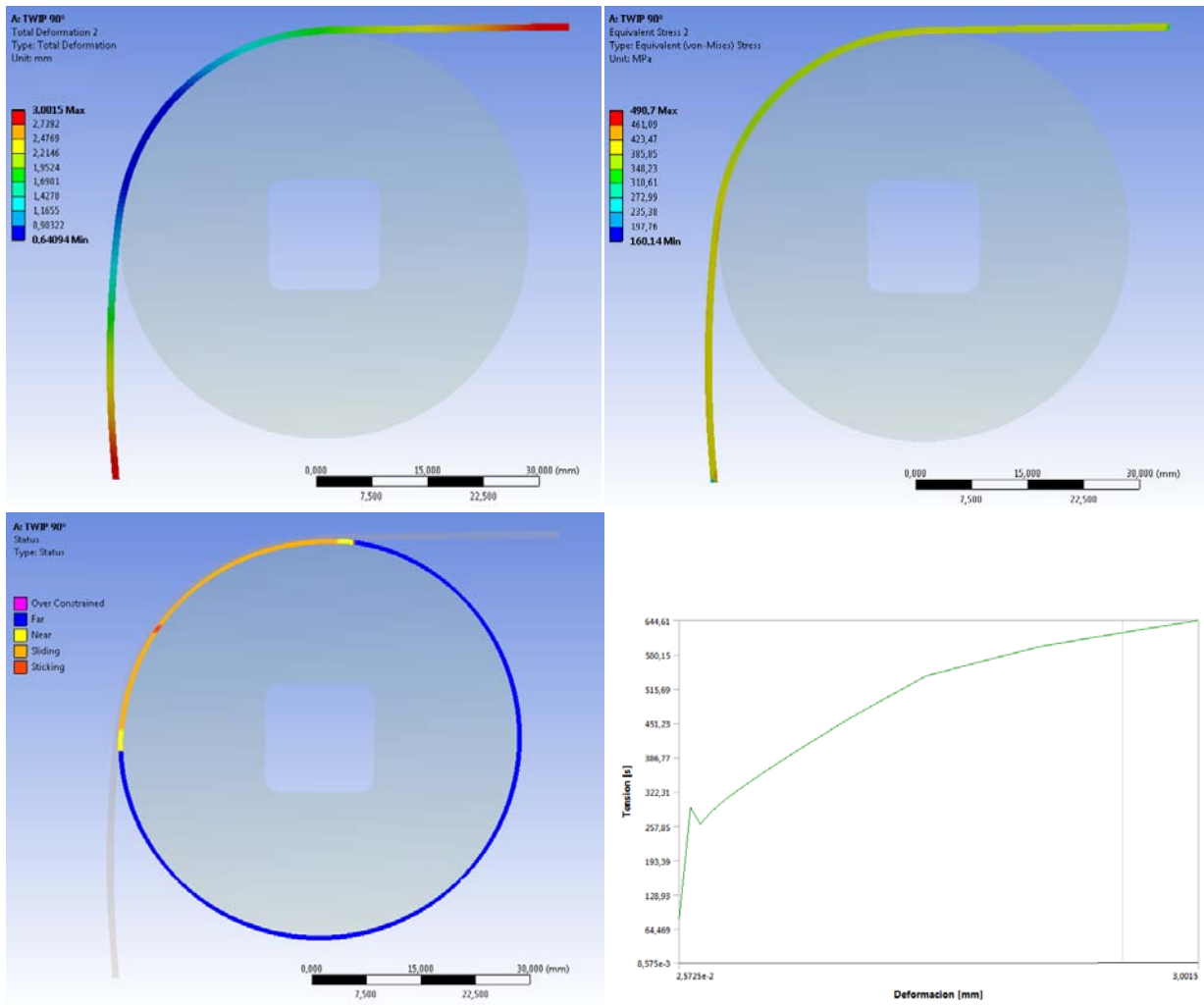


Ensayo: Diametro Pin 55 mm (fijo)

Espesor Chapa = 1,00 mm a 90°

Coef. Rozam. 0,15 – Desplazamientos extremos 3,0 y 3,0 mm/s

Resultados: Deformación y tensión

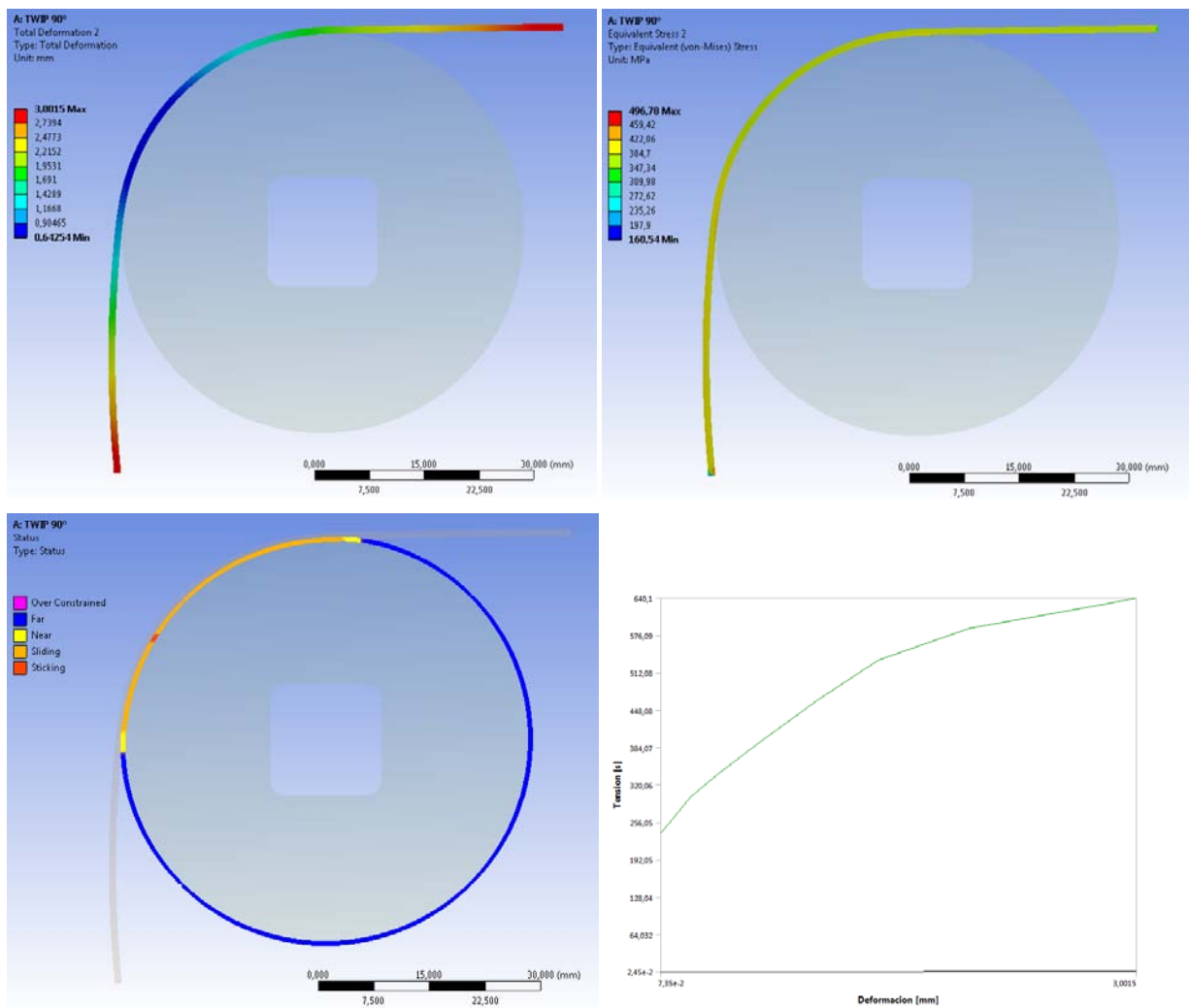


Ensayo: Diametro Pin 55 mm (fijo)

Espesor Chapa = 1,00 mm a 90°

Coef. Rozam. 0,10 – Desplazamientos extremos 3,0 y 3,0 mm/s

Resultados: Deformación y tensión

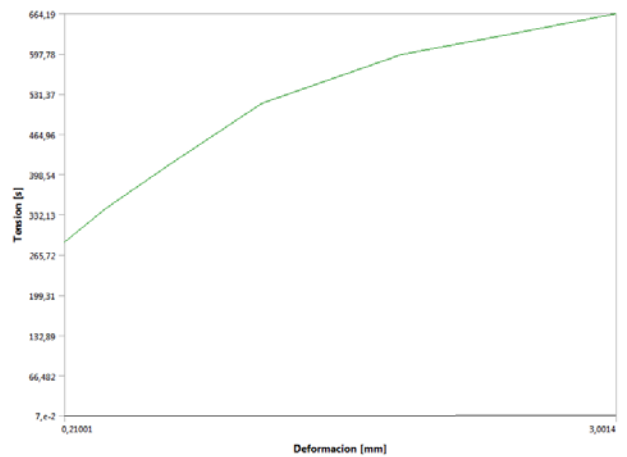
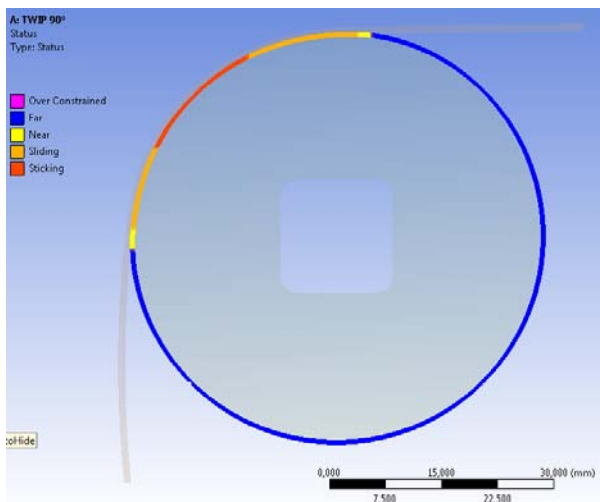
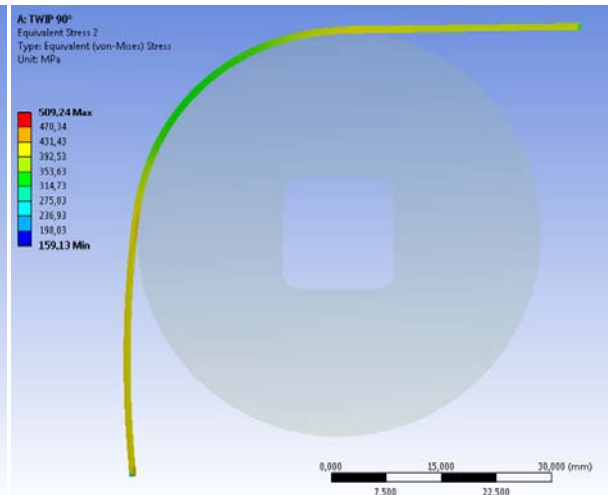
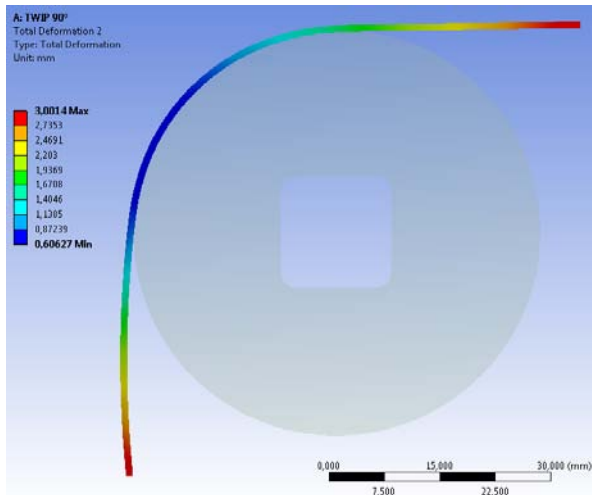


Ensayo: Diametro Pin 55 mm (fijo)

Espesor Chapa = 1,00 mm a 90°

Coef. Rozam. 0,05 – Desplazamientos extremos 3,0 y 3,0 mm/s

Resultados: Deformación y tensión



PIN 90°	Deformacion	Tension
C=0,20	mm	Mpa
	0,0	83
	0,1	167
	0,1	234
	0,1	263
	0,2	284
	0,3	310
	0,4	330
	0,5	359
	0,7	402
	1,0	463
	1,4	544
	1,9	588
	2,5	623
	3,0	649

PIN 90°	Deformacion	Tension
C=0,15	mm	Mpa
	0,0	82,9
	0,1	166,0
	0,1	292,3
	0,1	262,2
	0,2	283,6
	0,3	308,8
	0,4	328,9
	0,5	358,2
	0,7	400,1
	1,0	460,2
	1,4	540,7
	2,1	596,7
	2,8	631,3
	3,0	644,6

PIN 90°	Deformacion	Tension
C=0,10	mm	Mpa
	0,1	236,9
	0,1	260,9
	0,3	299,0
	0,4	337,9
	0,7	390,9
	1,0	466,0
	1,4	533,3
	2,0	588,1
	2,8	630,0
	3,0	640,1

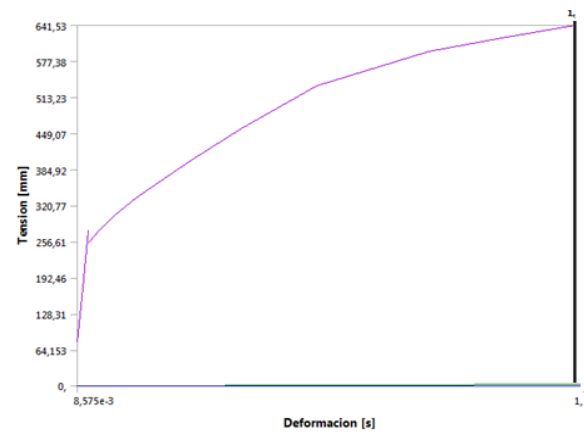
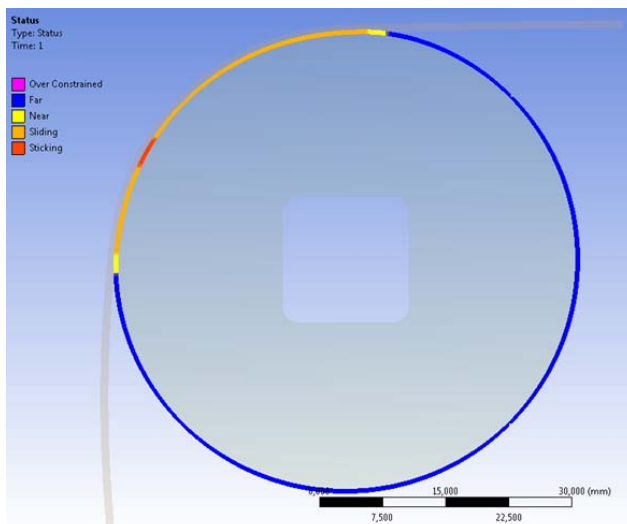
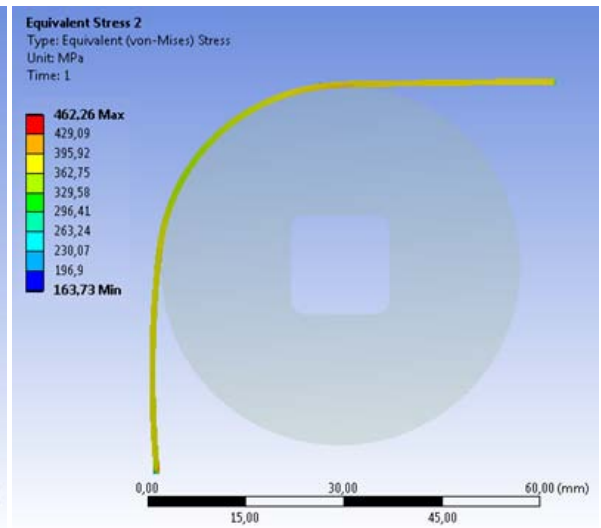
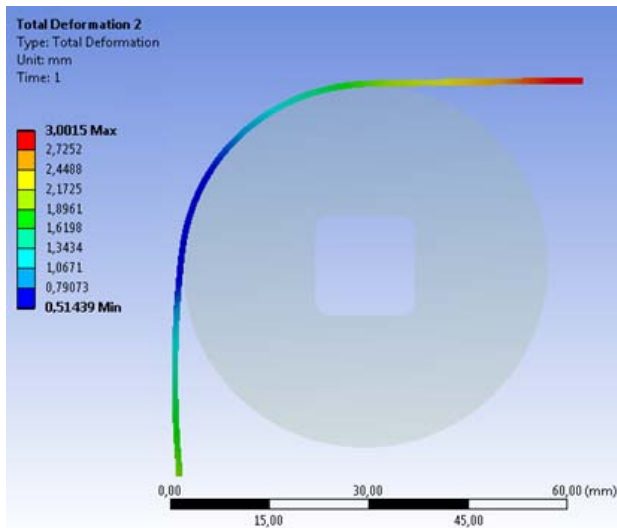
PIN 90°	Deformacion	Tension
C=0,05	mm	Mpa
	0,2	287,3
	0,4	342,7
	0,7	414,7
	1,2	516,1
	1,9	596,1
	2,5	630,0
	3,0	664,2

Ensayo: Diametro Pin 55 mm (fijo)

Espesor Chapa = 1,00 mm a 90°

Coef. Rozam. 0,20 – Desplazamientos extremos 3,0 y 2,0 mm/s

Resultados: Deformación y tensión

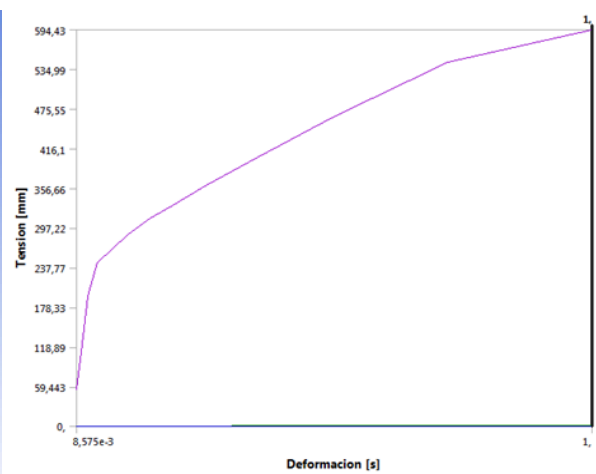
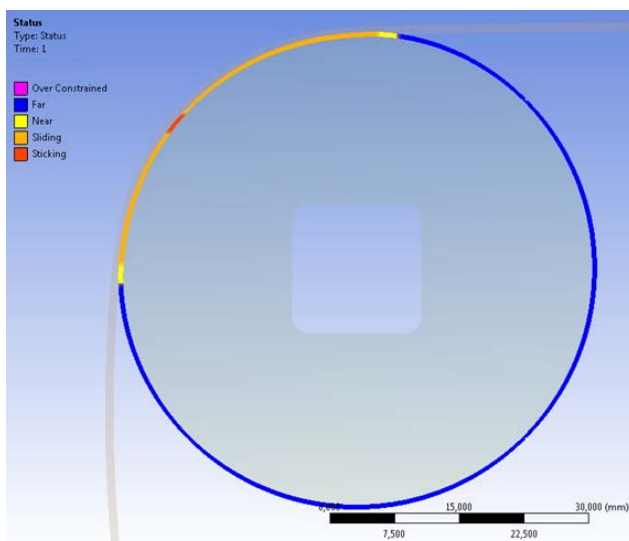
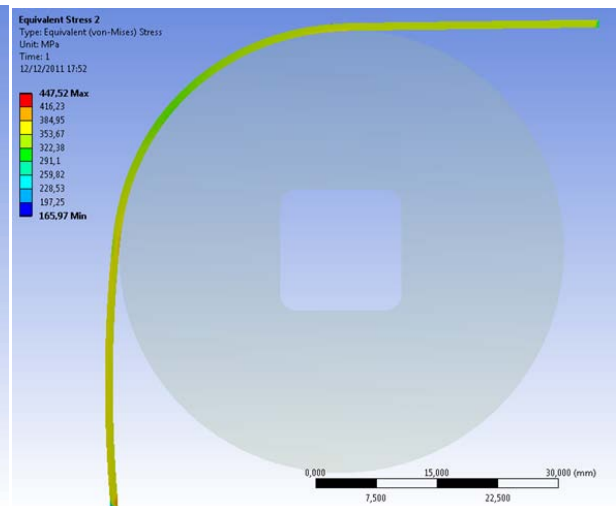
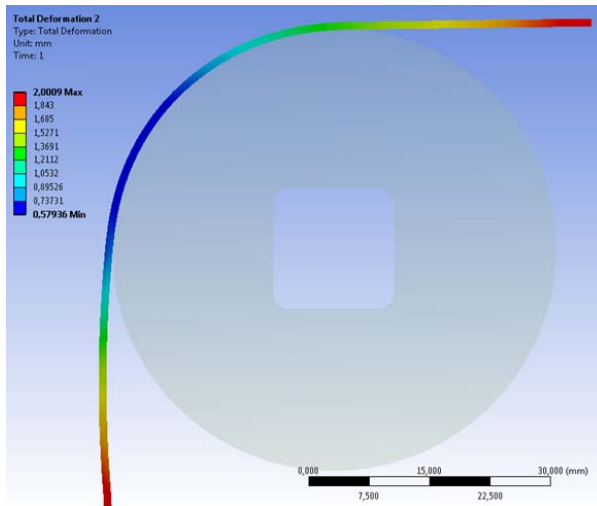


Ensayo: Diametro Pin 55 mm (fijo)

Espesor Chapa = 1,00 mm a 90°

Coef. Rozam. 0,20 – Desplazamientos extremos 2,0 y 2,0 mm/s

Resultados: Deformación y tensión

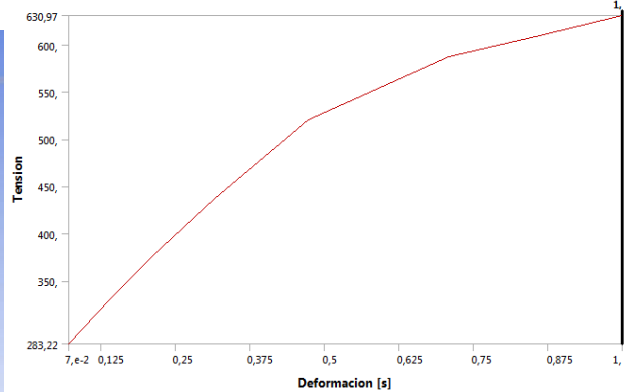
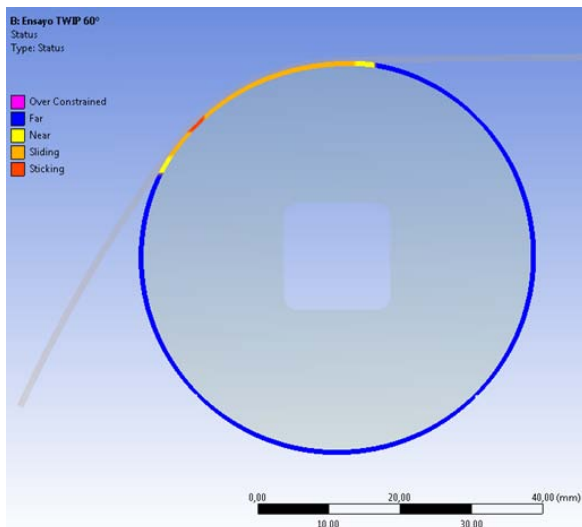
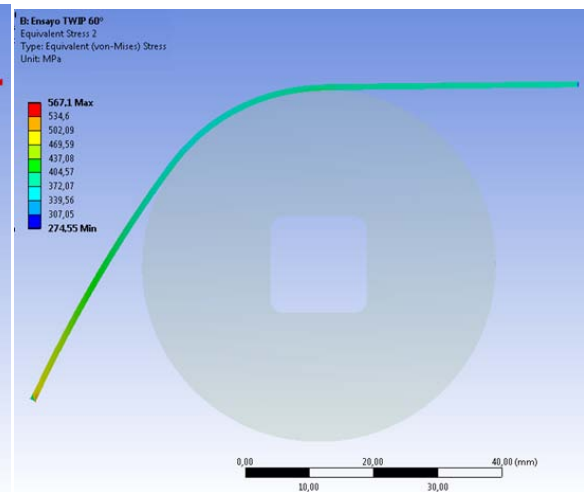
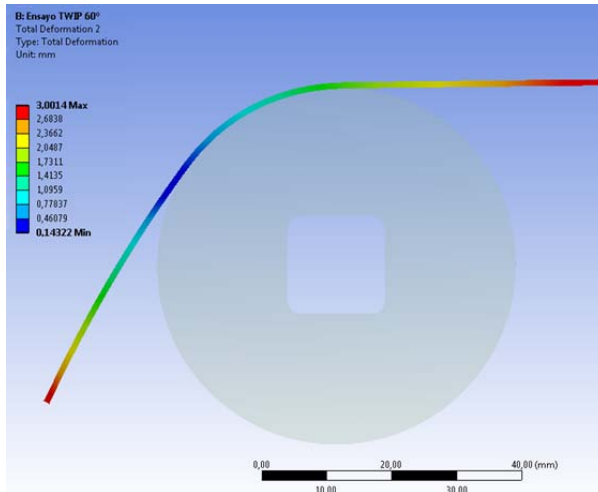


Ensayo: Diametro Pin 55 mm (fijo)

Espesor Chapa = 1,00 mm a 60°

Coef. Rozam. 0,20 – Desplazamientos extremos 3,0 y 3,0 mm/s

Resultados: Deformación y tensión

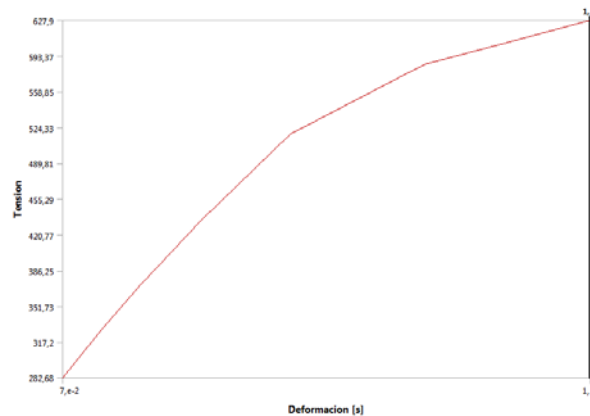
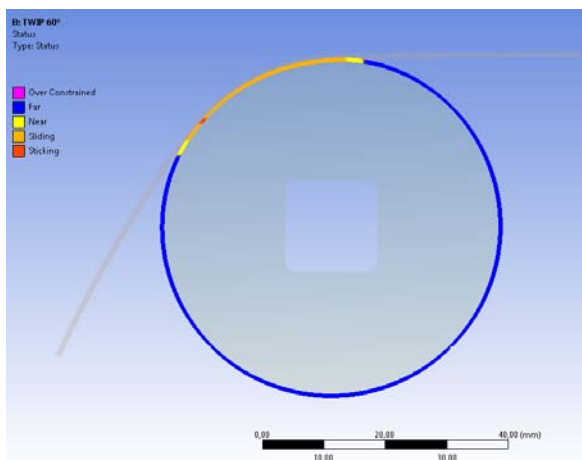
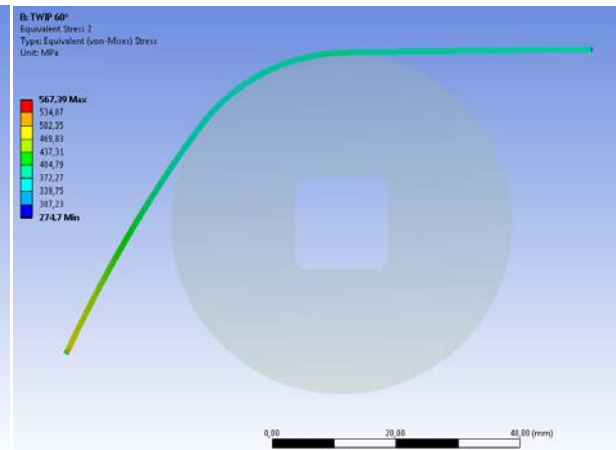
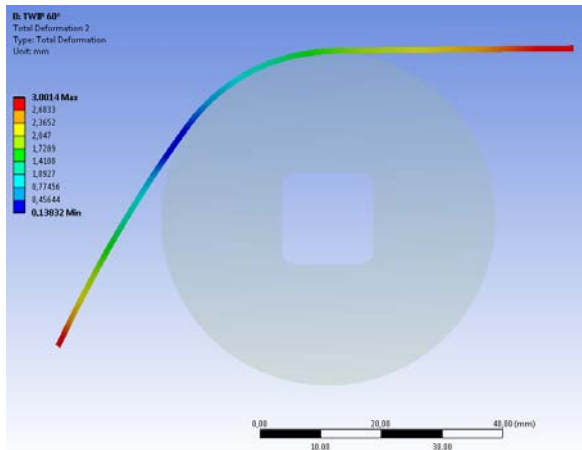


Ensayo: Diametro Pin 55 mm (fijo)

Espesor Chapa = 1,00 mm a 60°

Coef. Rozam. 0,15 – Desplazamientos extremos 3,0 y 3,0 mm/s

Resultados: Deformación y tensión

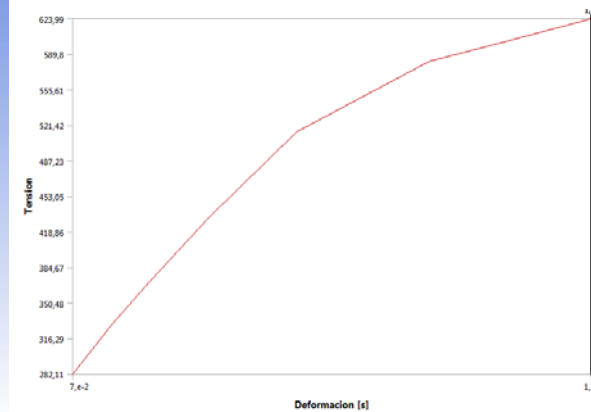
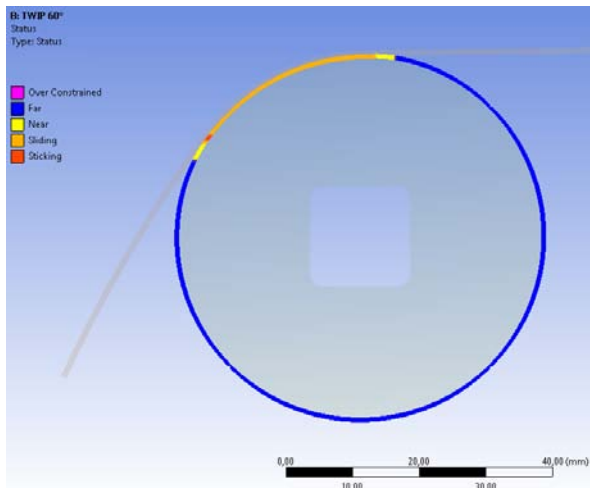
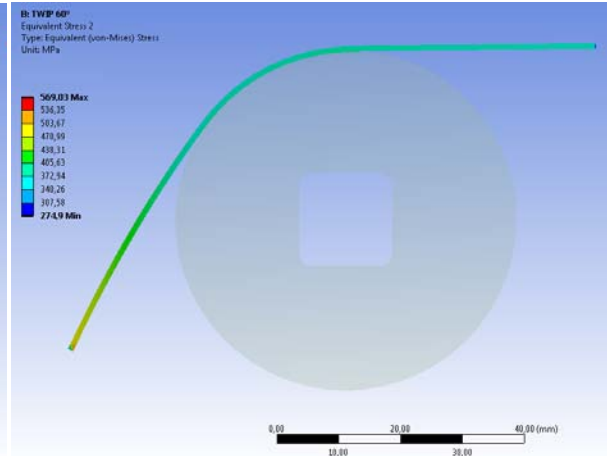
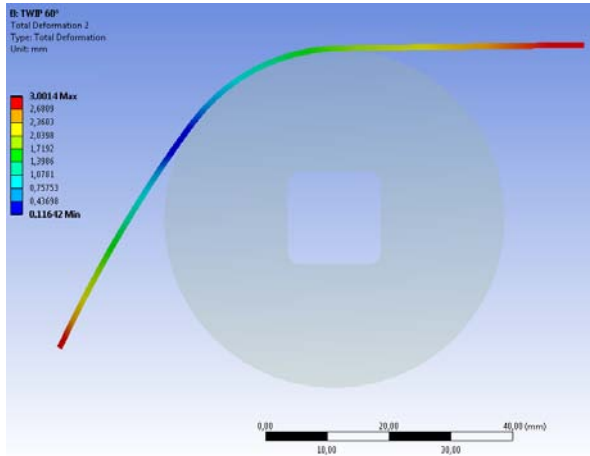


Ensayo: Diametro Pin 55 mm (fijo)

Espesor Chapa = 1,00 mm a 60°

Coef. Rozam. 0,10 – Desplazamientos extremos 3,0 y 3,0 mm/s

Resultados: Deformación y tensión

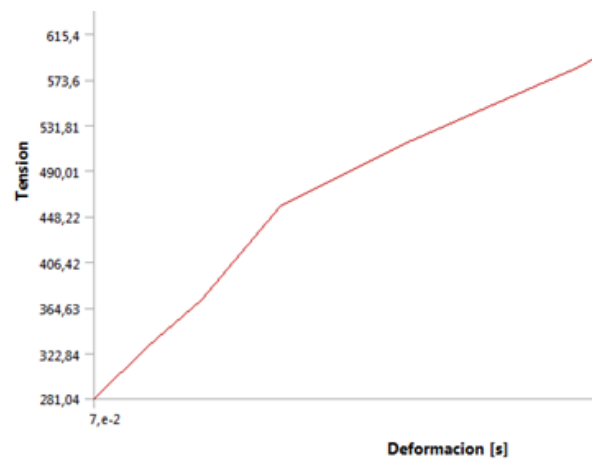
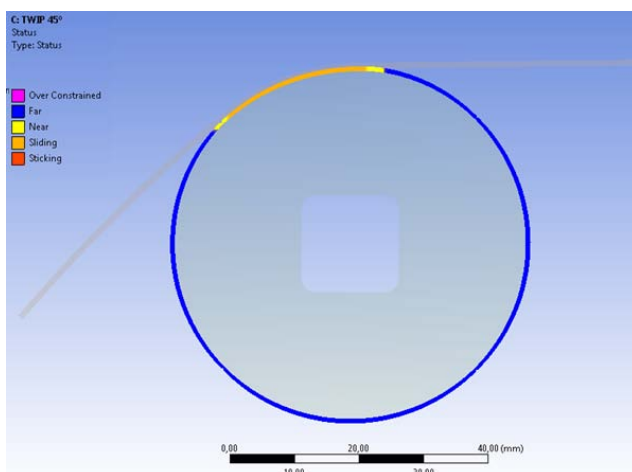
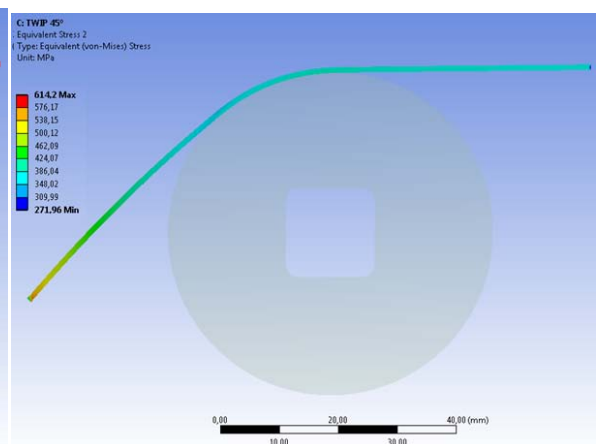
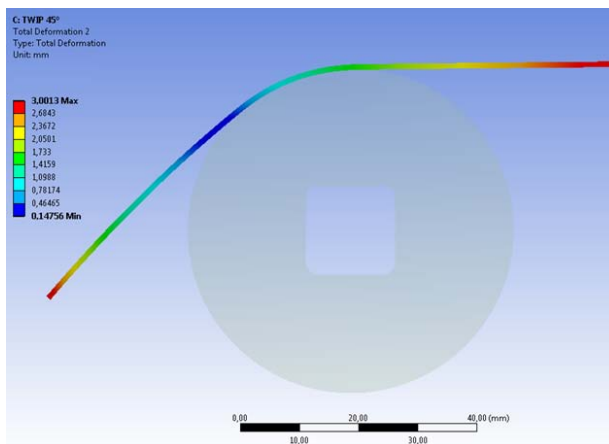


Ensayo: Diametro Pin 55 mm (fijo)

Espesor Chapa = 1,00 mm a 45°

Coef. Rozam. 0,20 – Desplazamientos extremos 3,0 y 3,0 mm/s

Resultados: Deformación y tensión

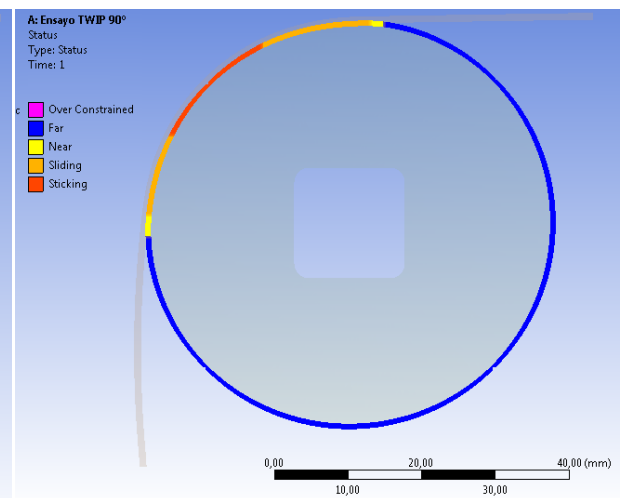
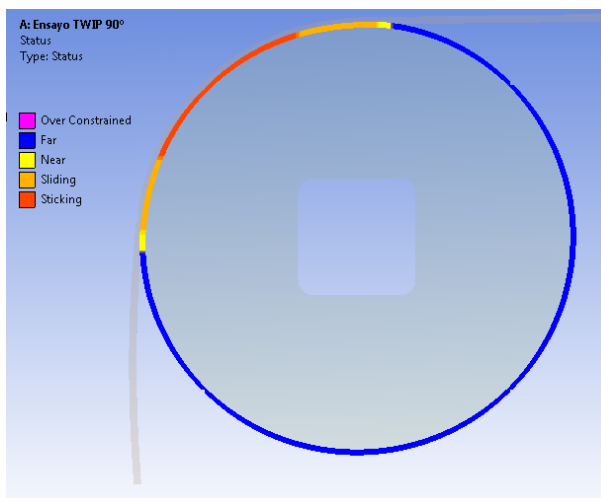
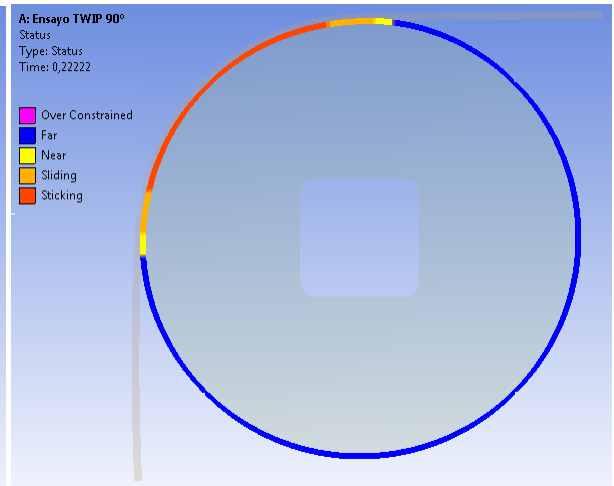
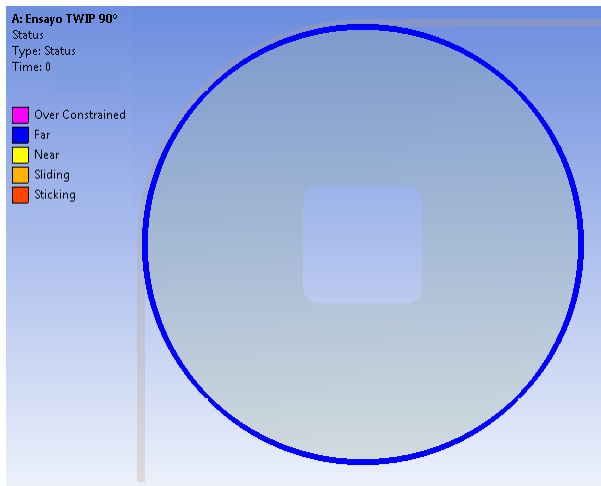


Ensayo: Diametro Pin 55 mm (fijo)

Espesor Chapa = 1,00 mm a 90°

Coef. Rozam. 0,50 – Desplazamientos extremos 3,0 y 3,0 mm/s

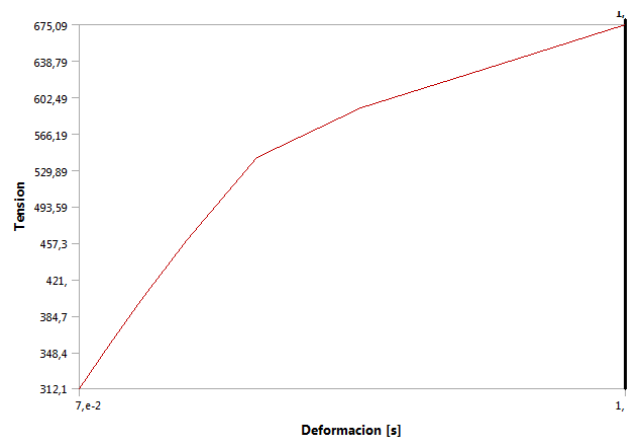
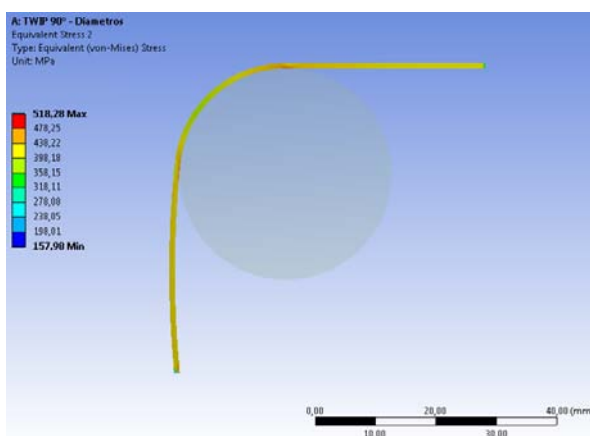
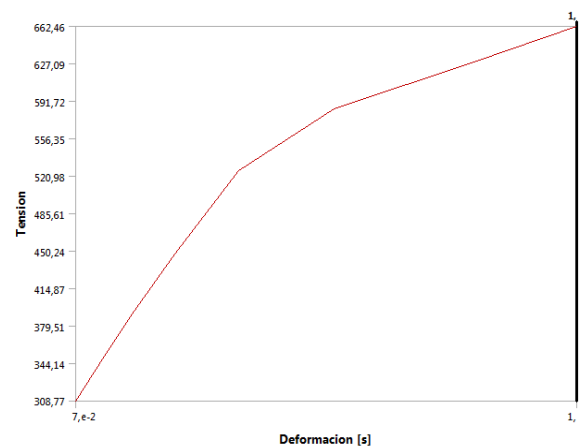
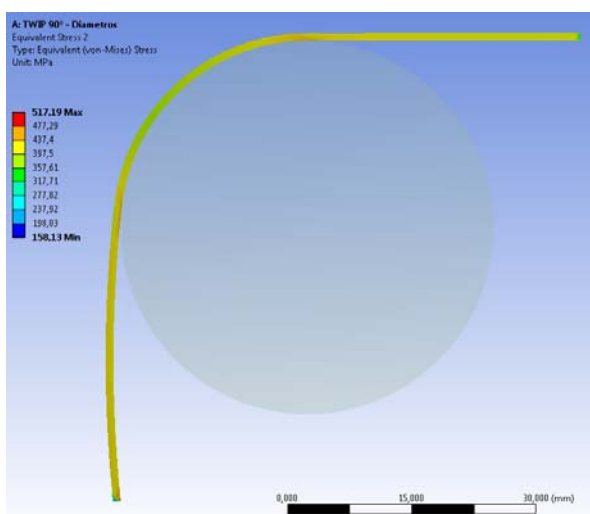
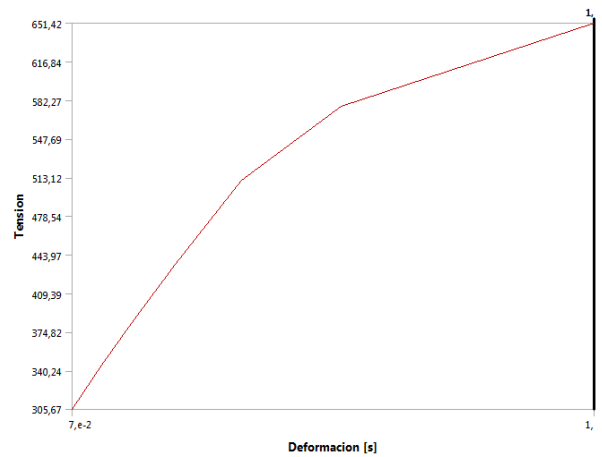
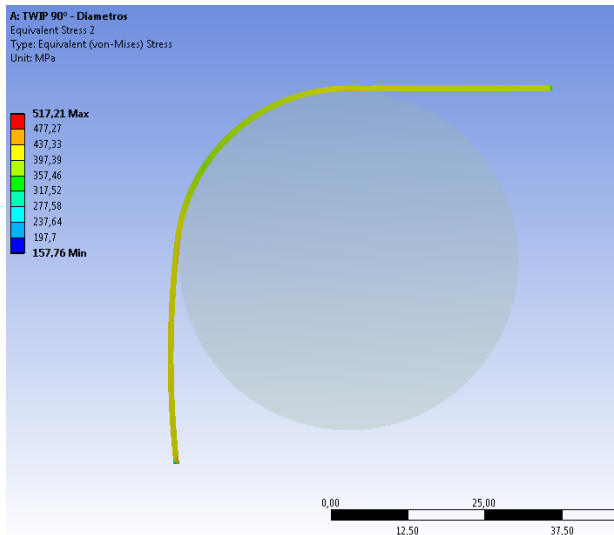
Resultados: Contacto (Zonas de contacto: cerca-deslizado-pegado)



Ensayo: Diametro Pin 55, 45, 35 mm (fijo)

Espesor Chapa = 1,00 mm a 90°

Coef. Rozam. 0,20 – Desplazamientos extremos 3,0 y 3,0 mm/s

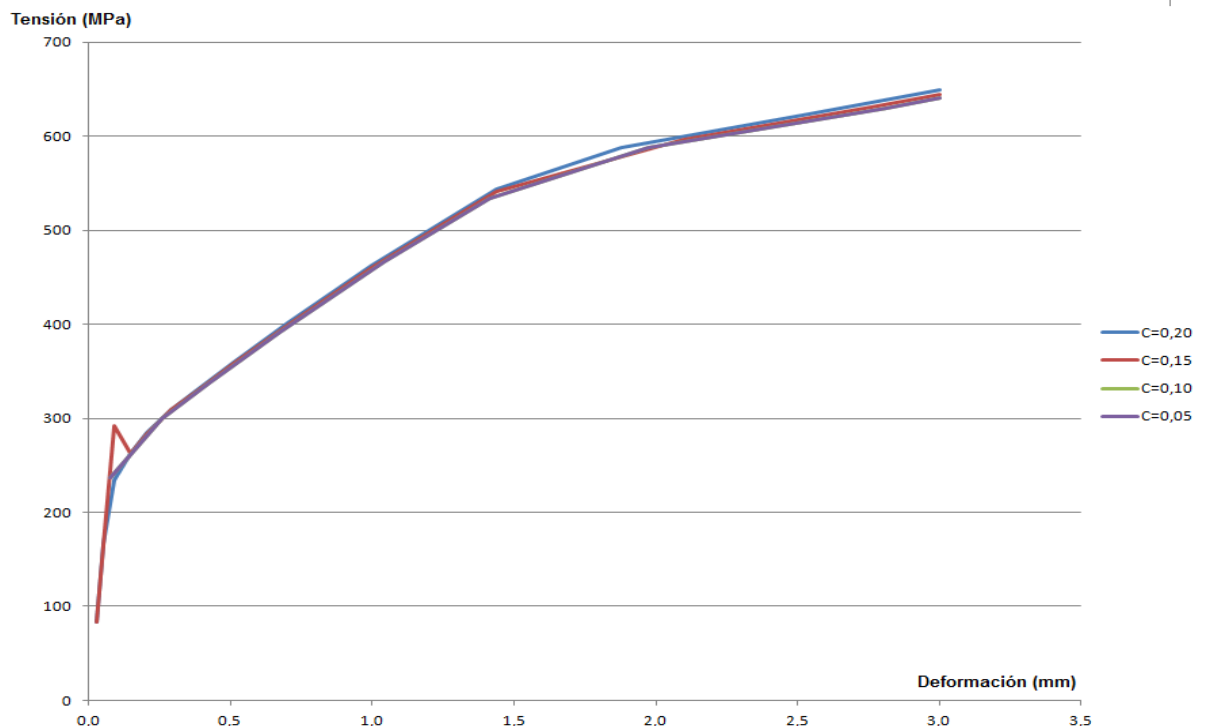


Capítulo 5

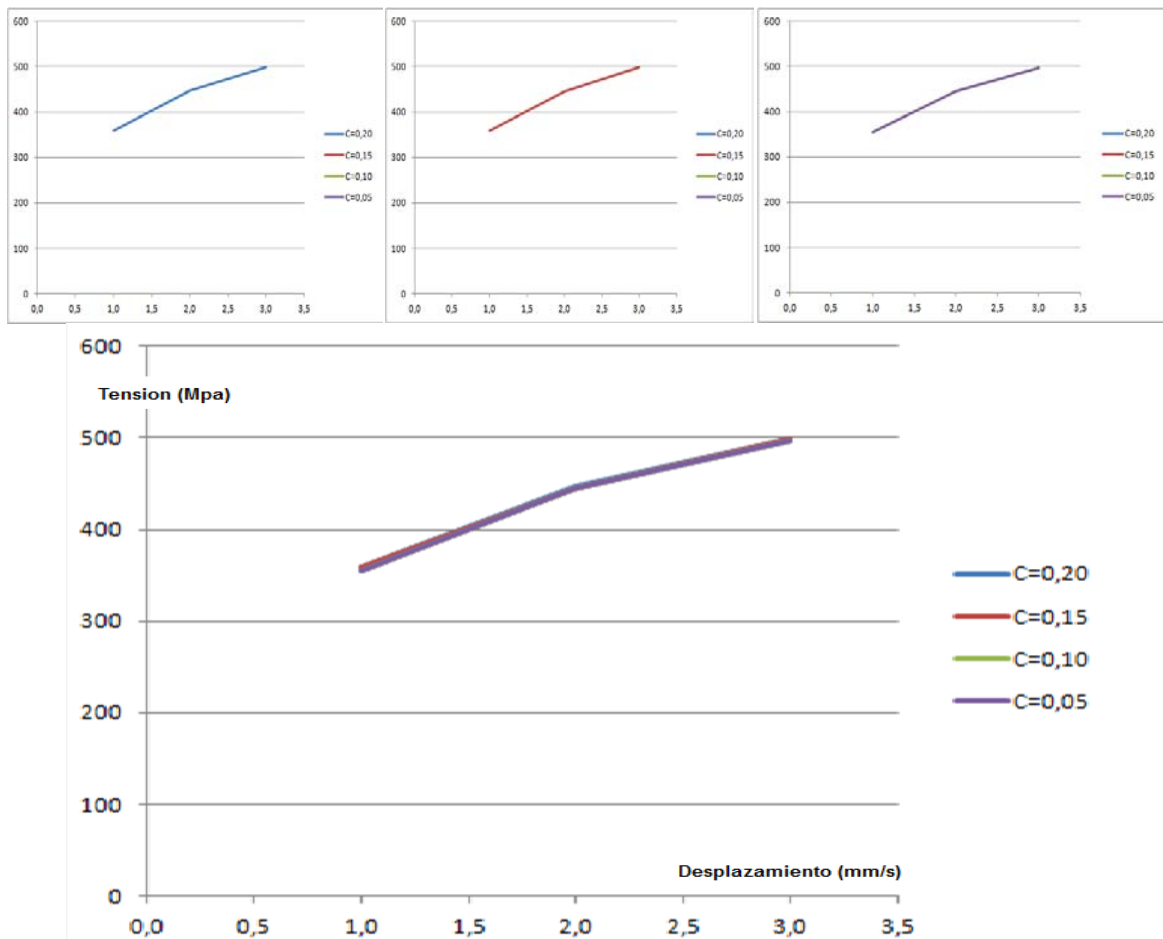
CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en este proyecto podemos comentar las siguientes conclusiones generales:

- Como consecuencia de utilizar el software Ansys, el cual considera el modelo de fricción rígida de Coulomb, sin posibilidad de incorporar un coeficiente de rozamiento dinámico en las simulaciones, no es representativo los comportamientos de las zonas donde se producen deslizamientos.
- Para un coeficiente de rozamiento en el rango desde 0,05 hasta 0,20 no presenta variaciones las tensiones alcanzadas en la chapa.



- La variación del diámetro del pin en los distintos ensayos no influye en los resultados finales de tensiones.
- La variación de los desplazamientos extremos no provoca variación de los datos de salida.



- Es sabido que el coeficiente de fricción del acero, entre la chapa y el pin es un parámetro que puede tomar valores en función de factores muy diversos. Los valores límites adoptados del coeficiente de fricción de 0,05 y 0,2 no pueden justificar por sí solos las diferencias observadas en los ensayos.
- La simulación es una simplificación de la realidad basada en métodos numéricos aproximados y constituye una herramienta para la ingeniería pero no puede sustituir a la experimentación por las limitaciones con que nos encontramos.

6 TRABAJOS FUTUROS

Con el fin de comprobar los comportamientos modelizados en la presente línea de investigación, está previsto construir un banco de ensayos para caracterizar el comportamiento de este tipo de aceros mediante futuros ensayos en fase experimental.

Por lo tanto la continuación de este trabajo, mediante mejoras de los aspectos de la simulación, permitiría desarrollar la modelización del proceso de elaboración para aplicación industrial de este tipo de aceros TWIP. A su vez, las mejoras realizadas al presente trabajo, permitiría determinar las siguientes tareas en el Diseño Conceptual:

- Requerimientos y necesidades del banco de ensayo.
- Análisis de antecedentes y/o ensayos de similares características.
- Estudio de métodos actuales empleados

La construcción de un equipo de ensayos, permitirá contrastar los resultados aquí obtenidos.

Capítulo 7

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Kwansoo Chung, Kanghwan Ahn, Dong-Hoon Yoo, Kyung-Hwan Chung, Min-Hong Seo, Sung-Ho Park – Formability of TWIP (Twinning Induced Plasticity) automotive sheets - 2010
- [2] Kwansoo Chung, Ning Maa, Taejoon Park, Dongun Kim, Donghoon Yoo, Chongmin Kim – 2011 - A modified damage model for advanced high strength steel sheets.
- [3] Jiri Sobotka – Deformation Properties of TWIP Sheets – 2.010
- [4] E. Silveira, I. Eizagirre, X. Azpiroz, C. Jiménez y A. M. Irisarri – Efecto de la velocidad de deformación y la temperatura sobre las propiedades mecánicas de un acero de alta resistencia. – 2.008
- [5] B. C. De Cooman, Kwang-geun Chin, and Jinkyung Kim¹ - High Mn TWIP Steels for Automotive Applications
- [6] Thomas Gebhardt, Denis Music, Daniel Kossmann, Marcus Ekholm b, Igor A. Abrikosov, Levente Vitos, Jochen M. Schneider - Elastic properties of fcc Fe–Mn–X (X = Al, Si) alloys studied by theory and experiment - 2011
- [7] Kanghwan Ahn, Donghoon Yoo, Min Hong Seo, Sung-Ho Park, and Kwansoo Chung - Springback Prediction of TWIP Automotive Sheets - 2009
- [8] A. Erman Tekkaya – State of the art of simulation of sheet metal forming – 2000
- [9] Jesus del Rio – Conformacion plastic de materials metalicos – 2005

[10] A. Makinouchi', C. Teodosiu² and T. Nakagawa – Advance in FEM simulation its Related Technologies in sheet metal Forming – 1998

[11] Centro Formación Profesional UPV – Curso de Ingeniería Asistida por Ordenador con ANSYS – 2011

[12] Saeed Moaveni – Finite Element Analysis – 2008

[13] Kent L. Lawrance – ANSYS Tutorial - 2007

Capítulo 8

ANEXOS

ANEXO: Salida solución Ansys

```
*****
*                               ANSYS 12.1 LEGAL NOTICES                               *
*****
*
* COPYRIGHT AND TRADEMARK INFORMATION                                             *
*
* Copyright 2009 SAS IP, Inc. All rights reserved.                               *
* Unauthorized use, distribution or duplication is prohibited.                   *
*
* See the ANSYS, Inc. online documentation or the ANSYS, Inc.                   *
* documentation CD for the complete Legal Notice.                               *
*
*****
*
* DISCLAIMER NOTICE                                                             *
*
* THIS ANSYS SOFTWARE PRODUCT AND PROGRAM DOCUMENTATION                         *
* EMBODY TRADE SECRETS AND CONFIDENTIAL AND PROPRIETARY                         *
* INFORMATION OF ANSYS, INC., ITS SUBSIDIARIES, OR LICENSORS.                   *
* The software products and documentation are furnished by                       *
* ANSYS, Inc. or its subsidiaries under a software license                       *
* agreement that contains provisions concerning                                   *
* non-disclosure, copying, length and nature of use,                             *
* compliance with exporting laws, warranties, disclaimers,                     *
* limitations of liability, and remedies, and other                             *
* provisions. The software products and documentation may be                     *
* used, disclosed, transferred, or copied only in accordance                    *
* with the terms and conditions of that software license                         *
* agreement.                                                                      *
*
* ANSYS, Inc. and ANSYS Europe, Ltd. are UL registered                           *
* ISO 9001:2000 Companies.                                                         *
*
*****
*
* U.S. GOVERNMENT RIGHTS                                                         *
*
* For U.S. Government users, except as specifically granted                     *
* by the ANSYS, Inc. software license agreement, the use,                       *
* duplication, or disclosure by the United States Government                     *
* is subject to restrictions stated in the ANSYS, Inc.                           *
* software license agreement and FAR 12.212 (for non-DOD                         *
* licenses).                                                                      *
*
*****
```

Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de aleaciones especiales de acero TWIP en condiciones de estirado con rozamiento.

```
***** ANSYS COMMAND LINE ARGUMENTS *****
BATCH MODE REQUESTED (-b)      = NOLIST
INPUT FILE COPY MODE (-c)      = COPY
  2 PARALLEL CPUS REQUESTED
MEMORY REQUESTED (MB)          = 127
START-UP FILE MODE              = NOREAD
STOP FILE MODE                  = NOREAD
DATABASE SIZE REQUESTED (MB)    = 63

00000000          VERSION=INTEL NT          RELEASE= 12.1          UP20091102
CURRENT JOBNAME=file  04:12:34  DEC 13, 2011 CP=          0.983

PARAMETER _DS_PROGRESS =          999.0000000

/INPUT FILE= ds.dat  LINE=          0

DO NOT WRITE ELEMENT RESULTS INTO DATABASE

*GET _WALLSTRT FROM ACTI ITEM=TIME WALL VALUE= 4.20944444

TITLE=
Ensayo_Modelo--Static Structural (A5)

--- Data in consistent NMM units.

MPA UNITS SPECIFIED FOR INTERNAL
LENGTH      = MILLIMETERS (mm)
MASS        = TONNE (Mg)
TIME        = SECONDS (sec)
TEMPERATURE = CELSIUS (C)
TOFFSET     = 273.0
FORCE       = NEWTON (N)
HEAT        = MILLIJOULES (mJ)

INPUT UNITS ARE ALSO SET TO MPA

*****TRACK MONITOR LEVEL= -1
          TRACK PRINT LEVEL = 0
          TRACK SUMMARY LEVEL= 0
1

***** ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM  RELEASE 12.1          *****
ANSYS Multiphysics
00000000          VERSION=INTEL NT          04:12:34  DEC 13, 2011 CP=          0.998

Ensayo_Modelo--Static Structural (A5)

          ***** ANSYS ANALYSIS DEFINITION (PREP7) *****
          ***** Nodes for the whole assembly *****
          ***** Elements for Body 1 "Pin" *****
          ***** Elements for Body 2 "Chapa" *****
          ***** Send User Defined Coordinate System(s) *****
          ***** Set Reference Temperature *****
          ***** Send Materials *****
          ***** Send Sheet Properties *****
          ***** Create Contact "Frictional - Surface Body To Surface Body" *****
          Real Contact Set For Above Contact Is 4 & 3
          ***** Fixed Supports *****
          ***** Constant Zero Displacement X *****
          ***** Constant Zero Displacement Y *****
```

Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de aleaciones especiales de acero TWIP en condiciones de estirado con rozamiento.

***** Create Displacement Tables and Functions *****

LIST DATA TABLE PLAS FOR MATERIAL 2

1

***** ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 12.1 *****
ANSYS Multiphysics
00000000 VERSION=INTEL NT 04:12:35 DEC 13, 2011 CP= 1.186

Ensayo_Modelo--Static Structural (A5)

PLASTIC (PLAS) Table For Material 2

ISOTROPIC HARDENING PLASTICITY

Temperature = 0.000000

Point	PlStrain	Stress
1	0.000000e+000	1.899000e+002
2	3.100000e-002	3.451000e+002
3	1.256000e-001	5.047000e+002
4	2.936000e-001	7.670000e+002
5	4.098000e-001	9.514000e+002
6	5.357000e-001	1.127400e+003
7	6.323000e-001	1.243000e+003

***** ROUTINE COMPLETED ***** CP = 1.186

--- Number of total nodes = 18659
--- Number of contact elements = 689
--- Number of spring elements = 0
--- Number of solid elements = 5794
--- Number of total elements = 6483

*GET _WALLBSOL FROM ACTI ITEM=TIME WALL VALUE= 4.20972222

***** SOLUTION *****

***** ANSYS SOLUTION ROUTINE *****

PERFORM A STATIC ANALYSIS
THIS WILL BE A NEW ANALYSIS

LARGE DEFORMATION ANALYSIS

NEW SOLUTION CONTROL OPTION IS ACTIVATED,
THE FOLLOWING COMMANDS ARE RESET TO NEW DEFAULTS:
AUTOTS, DELTIM, NSUB, CNVTOL, LNSRCH, PRED, NROPT,
TINTP, CUTCONTROL, OPNCONTROL, MONITOR, NEQIT, SSTIF, KBC.

CONTACT TIME PREDICTIONS ARE BASED ON ELEMENT KEYOPT(7) SPECIFIED

DO NOT SAVE ANY RESTART FILES AT ALL

CONTACT INFORMATION PRINTOUT LEVEL 1

NLDIAG: Nonlinear diagnostics CONT option is set to ON.
Writing frequency : each ITERATION.

Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de aleaciones especiales de acero TWIP en condiciones de estirado con rozamiento.

```
***** SOLVE FOR LS 1 *****
*** Set Displacements ***
CMBLOCK read of NODE component _CM38UX_XP completed

SELECT      COMPONENT _CM38UX_XP

SPECIFIED CONSTRAINT UX  FOR SELECTED NODES      1 TO 18659 BY      1
SET ACCORDING TO TABLE PARAMETER = _LOADVARI38XP
CMBLOCK read of NODE component _CM40UY_YP completed

SELECT      COMPONENT _CM40UY_YP

SPECIFIED CONSTRAINT UY  FOR SELECTED NODES      1 TO 18659 BY      1
SET ACCORDING TO TABLE PARAMETER = _LOADVARI40YP

ALL SELECT   FOR ITEM=NODE COMPONENT=
  IN RANGE   1 TO 18659 STEP      1

      18659 NODES (OF 18659 DEFINED) SELECTED BY NSEL COMMAND.

PRINTOUT RESUMED BY /GOP

USE AUTOMATIC TIME STEPPING THIS LOAD STEP

USE      5 SUBSTEPS INITIALLY THIS LOAD STEP FOR ALL DEGREES OF FREEDOM
FOR AUTOMATIC TIME STEPPING:
  USE 1000 SUBSTEPS AS A MAXIMUM
  USE   1 SUBSTEPS AS A MINIMUM

TIME= 1.0000

ERASE THE CURRENT DATABASE OUTPUT CONTROL TABLE.

WRITE ALL ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF NONE
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE NSOL ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF ALL
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE RSOL ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF ALL
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE NLOA ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF ALL
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE STRS ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF ALL
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE EPEL ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF ALL
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

WRITE EPPL ITEMS TO THE DATABASE WITH A FREQUENCY OF ALL
FOR ALL APPLICABLE ENTITIES

PRINTOUT RESUMED BY /GOP

*GET ANSINTER_ FROM ACTI ITEM=INT VALUE= 0.0000000

*IF ANSINTER_ ( = 0.00000 ) NE
  0 ( = 0.00000 ) THEN

*ENDIF

***** ANSYS SOLVE COMMAND *****
```

Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de aleaciones especiales de acero TWIP en condiciones de estirado con rozamiento.

*** WARNING *** CP = 1.217 TIME= 04:12:35
Element shape checking is currently inactive. Issue SHPP,ON or
SHPP,WARN to reactivate, if desired.

*** NOTE *** CP = 1.217 TIME= 04:12:35
Axisymmetric elements are present. The nodal loads input with the F
commands and the reaction forces are on a full circle basis. This
differs from the pre-ANSYS 5.0 interpretation.

*** NOTE *** CP = 1.217 TIME= 04:12:35
The model data was checked and warning messages were found.
Please review output or errors file (
C:\Users\ra\Documents____TFM_10_ProjectScratch\Scr98BC\file.err)
for these warning messages.

*** SELECTION OF ELEMENT TECHNOLOGIES FOR APPLICABLE ELEMENTS ***
--- GIVE SUGGESTIONS AND RESET THE KEY OPTIONS ---

ELEMENT TYPE 2 IS PLANE183 WITH AXISYMMETRIC OPTION. IT IS NOT ASSOCIATED
WITH FULLY INCOMPRESSIBLE HYPERELASTIC MATERIALS. NO SUGGESTION IS AVAILABLE
AND NO RESETTING IS NEEDED.

1

***** ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 12.1 *****
ANSYS Multiphysics
00000000 VERSION=INTEL NT 04:12:35 DEC 13, 2011 CP= 1.248

Ensayo_Modelo--Static Structural (A5)

S O L U T I O N O P T I O N S

PROBLEM DIMENSIONALITY.AXISYMMETRIC
DEGREES OF FREEDOM.UX UY
ANALYSIS TYPESTATIC (STEADY-STATE)
NONLINEAR GEOMETRIC EFFECTSON
PLASTIC MATERIAL PROPERTIES INCLUDED.YES
NEWTON-RAPHSON OPTIONPROGRAM CHOSEN
GLOBALLY ASSEMBLED MATRIXSYMMETRIC

*** WARNING *** CP = 1.248 TIME= 04:12:35
Material number 4 (used by element 5968) should normally have at least
one MP or one TB type command associated with it. Output of energy by
material may not be available.

*** NOTE *** CP = 1.248 TIME= 04:12:35
The step data was checked and warning messages were found.
Please review output or errors file (
C:\Users\ra\Documents____TFM_10_ProjectScratch\Scr98BC\file.err)
for these warning messages.

*** NOTE *** CP = 1.248 TIME= 04:12:35
This nonlinear analysis defaults to using the full Newton-Raphson
solution procedure. This can be modified using the NROPT command.

SOLCONTROL,ON uses sparse matrix direct solver

L O A D S T E P O P T I O N S

LOAD STEP NUMBER.1
TIME AT END OF THE LOAD STEP.1.0000
AUTOMATIC TIME STEPPINGON

Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de aleaciones especiales de acero TWIP en condiciones de estirado con rozamiento.

```
INITIAL NUMBER OF SUBSTEPS . . . . . 5
MAXIMUM NUMBER OF SUBSTEPS . . . . . 1000
MINIMUM NUMBER OF SUBSTEPS . . . . . 1
MAXIMUM NUMBER OF EQUILIBRIUM ITERATIONS. . . . . 15
STEP CHANGE BOUNDARY CONDITIONS . . . . . NO
STRESS-STIFFENING . . . . . ON
TERMINATE ANALYSIS IF NOT CONVERGED . . . . .YES (EXIT)
CONVERGENCE CONTROLS. . . . .USE DEFAULTS
COPY INTEGRATION POINT VALUES TO NODE . . . . .YES, FOR ELEMENTS WITH
ACTIVE MAT. NONLINEARITIES

PRINT OUTPUT CONTROLS . . . . .NO PRINTOUT
DATABASE OUTPUT CONTROLS
ITEM      FREQUENCY  COMPONENT
ALL       NONE
NSOL     ALL
RSOL     ALL
NLOA     ALL
STRS     ALL
EPEL     ALL
EPPL     ALL
```

SOLUTION MONITORING INFO IS WRITTEN TO FILE=
file.mntr

MAXIMUM NUMBER OF EQUILIBRIUM ITERATIONS HAS BEEN MODIFIED
TO BE, NEQIT = 25, BY SOLUTION CONTROL LOGIC.

*** NOTE *** CP = 1.622 TIME= 04:12:35
The default contact stiffness starting from Release 12.0 is no longer
affected by defined plasticities input by the TB commands. You should
confirm that appropriate contact stiffness was used.

*** NOTE *** CP = 1.622 TIME= 04:12:35
It is highly recommended to use the auto contact setting option by
issuing CNCHECK,AUTO command for this problem in order to achieve
better convergence.

*** NOTE *** CP = 1.622 TIME= 04:12:35
Deformable-deformable contact pair identified by real constant set 3
and contact element type 3 has been set up.
Contact algorithm: Augmented Lagrange method
Contact detection at: Gauss integration point
Contact stiffness factor FKN 1.0000
The resulting contact stiffness 0.40622E+07
Default penetration tolerance factor FTOLN 0.10000
The resulting penetration tolerance 0.98468E-01
Max. initial friction coefficient MU 0.20000
Default tangent stiffness factor FKT 1.0000
Default Max. friction stress TAUMAX 0.10000E+21
Average contact surface length 0.99872
Average contact pair depth 0.98468
User defined pinball region PINB 0.20683
Auto contact offset used to close gap 0.45544E-07
Initial penetration is excluded.

*** NOTE *** CP = 1.622 TIME= 04:12:35
Min. Initial gap 4.509344365E-08 was detected between contact element
5901 and target element 6140.
The gap is closed due to initial adjustment.

Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de aleaciones especiales de acero TWIP en condiciones de estirado con rozamiento.

```

*****
SUMMARY FOR CONTACT PAIR IDENTIFIED BY REAL CONSTANT SET          3
Min. Gap of 1.421085472E-14 has been detected between contact element
5901 and target element 6140.

Max. Closed gap 4.509345302E-08 has been detected between contact
element 5901 and target element 6140.
For total 173 contact elements, there are 1 elements are in contact.
There are 1 elements are in sticking.
Contact element 5901 has the highest number of status changes (total 1)
during this substep.
Max. Pinball distance 0.206828733.
One of the contact searching regions contains at least 12 target
elements.
Max. Pressure/force 3.603363576E-09.
Max. Normal stiffness 4062237.19.
Min. Normal stiffness 4062237.19.
*****

```

**** CENTER OF MASS, MASS, AND MASS MOMENTS OF INERTIA ****

CALCULATIONS ASSUME ELEMENT MASS AT ELEMENT CENTROID

TOTAL MASS = 0.47187E-03

MASS AND MOMENT VALUES ARE EVALUATED FOR AN AXISYMMETRIC 360. DEGREE MODEL.

CENTER OF MASS	MOM. OF INERTIA ABOUT ORIGIN	MOM. OF INERTIA ABOUT CENTER OF MASS	RADIUS OF GYRATION ABOUT CENTER OF MASS
XC = 0.0000	IXX = 8.304	IXX = 2.197	RGX = 68.24
YC = 113.76	IYY = 4.258	IYY = 4.258	RGY = 94.99

*** MASS SUMMARY BY ELEMENT TYPE ***

TYPE	MASS
1	0.169110E-04
2	0.454963E-03

Range of element maximum matrix coefficients in global coordinates
Maximum = 418707173 at element 2088.
Minimum = 336099.239 at element 5698.

*** ELEMENT MATRIX FORMULATION TIMES

TYPE	NUMBER	ENAME	TOTAL CP	AVE CP
1	3189	PLANE82	0.530	0.000166
2	2605	PLANE183	0.655	0.000252
3	173	CONTA172	0.031	0.000180
4	516	TARGE169	0.000	0.000000

Time at end of element matrix formulation CP = 2.3244149.
FORCE CONVERGENCE VALUE = 0.9404E+09 CRITERION= 0.4798E+07

SPARSE MATRIX DIRECT SOLVER.

Number of equations = 37034, Maximum wavefront = 42

*** NOTE *** CP = 2.870 TIME= 04:12:36
The initial memory allocation (-m) has been exceeded.
Supplemental memory allocations are being used.
Memory allocated for solver = 37.184 MB

Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de aleaciones especiales de acero TWIP en condiciones de estirado con rozamiento.

Memory required for in-core = 28.148 MB
Optimal memory required for out-of-core = 3.196 MB
Minimum memory required for out-of-core = 2.957 MB

*** NOTE *** CP = 2.886 TIME= 04:12:36

The Sparse Matrix solver is currently running in the in-core memory mode. This memory mode uses the most amount of memory in order to avoid using the hard drive as much as possible, which most often results in the fastest solution time. This mode is recommended if enough physical memory is present to accommodate all of the solver data.

Sparse solver maximum pivot= 834536049 at node 6481 UX.

Sparse solver minimum pivot= 58475.8155 at node 18172 UY.

Sparse solver minimum pivot in absolute value= 58475.8155 at node 18172 UY.

EQUIL ITER 1 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -1.040

*** WARNING *** CP = 3.853 TIME= 04:12:36

Contact element 5910 (real ID 3) status changes abruptly from no-contact -> contact (with target element 6461).

LINE SEARCH PARAMETER = 0.9990 SCALED MAX DOF INC = -1.039

2D CONTACT ELEMENTS: 9 CONTACT POINTS HAVE TOO MUCH PENETRATION

FORCE CONVERGENCE VALUE = 0.2671E+07 CRITERION= 4082.

EQUIL ITER 2 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -14.44

*** NOTE *** CP = 5.772 TIME= 04:12:38

The change in thickness in element 5632 exceeds the maximum allowable change in this iteration, which may cause bisection to occur.

*** ERROR *** CP = 5.772 TIME= 04:12:38

Negative Jacobian 2D.

*** NOTE *** CP = 5.772 TIME= 04:12:38

One or more elements have become highly distorted. Excessive distortion of elements is usually a symptom indicating the need for corrective action elsewhere. Try incrementing the load more slowly (increase the number of substeps or decrease the time step size). You may need to improve your mesh to obtain elements with better aspect ratios. Also consider the behavior of materials, contact pairs, and/or constraint equations. If this message appears in the first iteration of first substep, be sure to perform element shape checking.

*** LOAD STEP 1 SUBSTEP 1 NOT COMPLETED. CUM ITER = 3

*** BEGIN BISECTION NUMBER 1 NEW TIME INCREMENT= 0.70000E-01

SUMMARY FOR CONTACT PAIR IDENTIFIED BY REAL CONSTANT SET 3
Min. Gap of 1.421085472E-14 has been detected between contact element 5901 and target element 6140.

Max. Closed gap 4.509345302E-08 has been detected between contact element 5901 and target element 6140.

For total 173 contact elements, there are 1 elements are in contact.

There are 1 elements are in sticking.

Contact element 5901 has the highest number of status changes (total 1) during this substep.

Max. Pinball distance 0.206828733.

One of the contact searching regions contains at least 12 target elements.

Max. Pressure/force 3.603363576E-09.

Max. Normal stiffness 4062237.19.

Min. Normal stiffness 4062237.19.

Range of element maximum matrix coefficients in global coordinates

Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de aleaciones especiales de acero TWIP en condiciones de estirado con rozamiento.

Maximum = 418707173 at element 2088.

Minimum = 336099.239 at element 5698.

FORCE CONVERGENCE VALUE = 0.3291E+09 CRITERION= 0.1679E+07

SPARSE MATRIX DIRECT SOLVER.

Number of equations = 37034, Maximum wavefront = 42

Memory allocated for solver = 37.184 MB

Memory required for in-core = 30.544 MB

Optimal memory required for out-of-core = 5.082 MB

Minimum memory required for out-of-core = 4.842 MB

*** NOTE ***

CP = 7.160 TIME= 04:12:39

The Sparse Matrix solver is currently running in the in-core memory mode. This memory mode uses the most amount of memory in order to avoid using the hard drive as much as possible, which most often results in the fastest solution time. This mode is recommended if enough physical memory is present to accommodate all of the solver data.

Sparse solver maximum pivot= 834536049 at node 6481 UX.

Sparse solver minimum pivot= 58475.8155 at node 18172 UY.

Sparse solver minimum pivot in absolute value= 58475.8155 at node 18172 UY.

EQUIL ITER 1 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.3642

*** WARNING ***

CP = 7.909 TIME= 04:12:39

Contact element 5909 (real ID 3) status changes abruptly from no-contact -> contact (with target element 6467).

LINE SEARCH PARAMETER = 0.9854 SCALED MAX DOF INC = -0.3588

2D CONTACT ELEMENTS: 28 CONTACT POINTS HAVE TOO MUCH PENETRATION

FORCE CONVERGENCE VALUE = 0.5622E+07 CRITERION= 0.2214E+05

EQUIL ITER 2 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -2.768

LINE SEARCH PARAMETER = 0.6313 SCALED MAX DOF INC = -1.748

2D CONTACT ELEMENTS: 19 CONTACT POINTS HAVE TOO MUCH PENETRATION

FORCE CONVERGENCE VALUE = 0.3485E+07 CRITERION= 8063.

EQUIL ITER 3 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 9.711

*** NOTE ***

CP = 12.620 TIME= 04:12:42

The change in thickness in element 5636 exceeds the maximum allowable change in this iteration, which may cause bisection to occur.

*** ERROR ***

CP = 12.620 TIME= 04:12:42

Negative Jacobian 2D.

*** NOTE ***

CP = 12.620 TIME= 04:12:42

One or more elements have become highly distorted. Excessive distortion of elements is usually a symptom indicating the need for corrective action elsewhere. Try incrementing the load more slowly (increase the number of substeps or decrease the time step size). You may need to improve your mesh to obtain elements with better aspect ratios. Also consider the behavior of materials, contact pairs, and/or constraint equations. If this message appears in the first iteration of first substep, be sure to perform element shape checking.

*** LOAD STEP 1 SUBSTEP 1 NOT COMPLETED. CUM ITER = 6

*** BEGIN BISECTION NUMBER 2 NEW TIME INCREMENT= 0.24500E-01

SUMMARY FOR CONTACT PAIR IDENTIFIED BY REAL CONSTANT SET 3
Min. Gap of 1.421085472E-14 has been detected between contact element 5901 and target element 6140.

Max. Closed gap 4.509345302E-08 has been detected between contact element 5901 and target element 6140.

For total 173 contact elements, there are 1 elements are in contact.

There are 1 elements are in sticking.

Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de aleaciones especiales de acero TWIP en condiciones de estirado con rozamiento.

Contact element 5901 has the highest number of status changes (total 1) during this substep.

Max. Pinball distance 0.206828733.

One of the contact searching regions contains at least 12 target elements.

Max. Pressure/force 3.603363576E-09.

Max. Normal stiffness 4062237.19.

Min. Normal stiffness 4062237.19.

Range of element maximum matrix coefficients in global coordinates

Maximum = 418707173 at element 2088.

Minimum = 336099.239 at element 5698.

FORCE CONVERGENCE VALUE = 0.1152E+09 CRITERION= 0.5878E+06

SPARSE MATRIX DIRECT SOLVER.

Number of equations = 37034, Maximum wavefront = 42

Memory allocated for solver = 37.184 MB

Memory required for in-core = 30.544 MB

Optimal memory required for out-of-core = 5.082 MB

Minimum memory required for out-of-core = 4.842 MB

*** NOTE *** CP = 13.806 TIME= 04:12:43

The Sparse Matrix solver is currently running in the in-core memory mode. This memory mode uses the most amount of memory in order to avoid using the hard drive as much as possible, which most often results in the fastest solution time. This mode is recommended if enough physical memory is present to accommodate all of the solver data.

Sparse solver maximum pivot= 834536049 at node 6481 UX.

Sparse solver minimum pivot= 58475.8155 at node 18172 UY.

Sparse solver minimum pivot in absolute value= 58475.8155 at node 18172 UY.

EQUIL ITER 1 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -0.1275

LINE SEARCH PARAMETER = 0.9316 SCALED MAX DOF INC = -0.1187

2D CONTACT ELEMENTS: 22 CONTACT POINTS HAVE TOO MUCH PENETRATION

FORCE CONVERGENCE VALUE = 0.8303E+07 CRITERION= 0.4103E+05

EQUIL ITER 2 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= -1.747

LINE SEARCH PARAMETER = 0.5499 SCALED MAX DOF INC = -0.9609

FORCE CONVERGENCE VALUE = 0.3761E+07 CRITERION= 0.1884E+05

EQUIL ITER 3 COMPLETED. NEW TRIANG MATRIX. MAX DOF INC= 3.782

*** NOTE *** CP = 19.141 TIME= 04:12:46

The change in thickness in element 5644 exceeds the maximum allowable change in this iteration, which may cause bisection to occur.

*** ERROR *** CP = 19.141 TIME= 04:12:46

Negative Jacobian 2D.

*** NOTE *** CP = 19.141 TIME= 04:12:46

One or more elements have become highly distorted. Excessive distortion of elements is usually a symptom indicating the need for corrective action elsewhere. Try incrementing the load more slowly (increase the number of substeps or decrease the time step size). You may need to improve your mesh to obtain elements with better aspect ratios. Also consider the behavior of materials, contact pairs, and/or constraint equations. If this message appears in the first iteration of first substep, be sure to perform element shape checking.

*** LOAD STEP 1 SUBSTEP 1 NOT COMPLETED. CUM ITER = 9

*** BEGIN BISECTION NUMBER 3 NEW TIME INCREMENT= 0.85750E-02

SUMMARY FOR CONTACT PAIR IDENTIFIED BY REAL CONSTANT SET 3
Min. Gap of 1.421085472E-14 has been detected between contact element

Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de aleaciones especiales de acero TWIP en condiciones de estirado con rozamiento.

5901 and target element 6140.

Max. Closed gap 4.509345302E-08 has been detected between contact element 5901 and target element 6140.
For total 173 contact elements, there are 1 elements are in contact.
There are 1 elements are in sticking.
Contact element 5901 has the highest number of status changes (total 1) during this substep.
Max. Pinball distance 0.206828733.
One of the contact searching regions contains at least 12 target elements.
Max. Pressure/force 3.603363576E-09.
Max. Normal stiffness 4062237.19.
Min. Normal stiffness 4062237.19.

Range of element maximum matrix coefficients in global coordinates
Maximum = 418707173 at element 2088.
Minimum = 336099.239 at element 5698.
FORCE CONVERGENCE VALUE = 0.4032E+08 CRITERION= 0.2057E+06

SPARSE MATRIX DIRECT SOLVER.

Number of equations = 37034, Maximum wavefront = 42
Memory allocated for solver = 37.184 MB
Memory required for in-core = 30.544 MB
Optimal memory required for out-of-core = 5.082 MB
Minimum memory required for out-of-core = 4.842 MB

*** NOTE *** CP = 20.343 TIME= 04:12:47

The Sparse Matrix solver is currently running in the in-core memory mode. This memory mode uses the most amount of memory in order to avoid using the hard drive as much as possible, which most often results in the fastest solution time. This mode is recommended if enough physical memory is present to accommodate all of the solver data.

Sparse solver maximum pivot= 834536049 at node 6481 UX.

Sparse solver minimum pivot= 58475.8155 at node 18172 UY.

Sparse solver minimum pivot in absolute value= 58475.8155 at node 18172

*** MAX PLASTIC STRAIN STEP = 0.1540E-01 CRITERION = 0.1500

*** ANSYS BINARY FILE STATISTICS

BUFFER SIZE USED= 16384

8.188 MB WRITTEN ON ELEMENT MATRIX FILE: file.emat

12.875 MB WRITTEN ON ELEMENT SAVED DATA FILE: file.esav

9.562 MB WRITTEN ON ASSEMBLED MATRIX FILE: file.full

133.062 MB WRITTEN ON RESULTS FILE: file.rst

***** FINISHED SOLVE FOR LS 1 *****

PARAMETER _DS_PROGRESS DELETED.

*GET _WALLASOL FROM ACTI ITEM=TIME WALL VALUE= 4.25027778

FINISH SOLUTION PROCESSING

***** ROUTINE COMPLETED ***** CP = 246.872

1

***** ANSYS - ENGINEERING ANALYSIS SYSTEM RELEASE 12.1 *****

ANSYS Multiphysics

00000000

VERSION=INTEL NT

04:15:01

DEC 13, 2011 CP=

246.872

Estudio y simulación por elementos finitos del comportamiento de aleaciones especiales de acero TWIP en condiciones de estirado con rozamiento.

Number of cores: 2 (Shared Memory Parallel)

Job Name: file

Working Directory: C:\Users\ra\Documents____TFM_10_ProjectScratch\Scr98BC

Elapsed time spent pre-processing model (/PREP7) : 0.1 seconds
Elapsed time spent solution - preprocessing : 0.1 seconds
Elapsed time spent computing solution : 146.6 seconds
Elapsed time spent solution - postprocessing : 0.0 seconds
Elapsed time spent post-processing model (/POST1) : 0.0 seconds

Equation solver computational rate : 1564.5 Mflops
Equation solver effective I/O rate : 2782.7 Mbytes/sec

+----- E N D A N S Y S S T A T I S T I C S -----+

```
*-----*
                ANSYS RUN COMPLETED
-----
                Release 12.1                UP20091102                INTEL NT
-----
Maximum Scratch Memory Used = 18483904 Words 70.510 MB
-----
CP Time (sec) = 246.872 Time = 04:15:01
Elapsed Time (sec) = 151.000 Date = 12/13/2011
*-----*
```