



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Simulación computacional de plegado de chapa
Computational simulation of sheet metal bending

Autor

Pilar Gómez Burgos

Director

Jorge Grasa Orús

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2025

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Transformados Técnicos Aragón S.L. por los conocimientos, la confianza y la experiencia que han hecho posible este trabajo.

A mi tutor, Jorge Grasa, por su implicación y orientación fundamentales en la realización de este trabajo.

A mis padres, que siempre creyeron en mí mucho más de lo que yo lo hacía.

A todo aquel que me confió, me apoyó y me acompañó.

RESUMEN

El plegado de chapa metálica es un proceso de conformado de metal basado en la deformación, requiere de un punzón, una matriz y la lámina metálica. En el presente trabajo se van a simular computacionalmente dos técnicas de plegado: plegado a fondo, mediante un plegado de 60° y plegado al aire, mediante un plegado a 90° . En el plegado a fondo, la lámina alcanza la profundidad máxima de la matriz, a diferencia del plegado al aire, en el que esto no ocurre, y la lámina solo se deforma hasta la profundidad máxima necesaria para el ángulo que se requiere plegar.

En el software Comsol Multiphysics se han desarrollado simulaciones del proceso de plegado, considerando diferentes formulaciones de plasticidad, condiciones de contacto y estrategias de mallado orientadas a la optimización del proceso. El objetivo principal es evaluar la influencia de estos modelos en los resultados de tensiones, desplazamientos y en la convergencia numérica.

En el desarrollo de este estudio se han considerado distintas configuraciones de simulación. El modelo bidimensional permite un análisis detallado del proceso de plegado, tanto para 90° como para 60° . Por su parte, el modelo tridimensional ha sido comparado con el modelo bidimensional, mostrando unos resultados similares, aunque con un coste computacional elevado.

Índice

1. Introducción y objetivos	1
1.1. Elementos del proceso plegado	2
1.2. Tipos de técnicas de plegado	4
1.2.1. Plegado a fondo	4
1.2.2. Plegado al aire	5
1.2.3. Estampado	6
1.2.4. Curvado mediante plegadora	7
1.3. Motivación	8
1.4. Objetivos	9
2. Definición del modelo	11
2.1. Diseño Geométrico del Utillaje	11
2.2. Material de trabajo	13
2.3. Relación entre ángulo y desplazamiento	13
2.4. Modelo bidimensional	14
2.4.1. Malla de elementos finitos	14
2.4.2. Modelo dinámico	15
2.5. Modelo tridimensional	15
2.5.1. Modelo lámina	15
2.5.2. Modelo con elementos sólidos 3D	17
2.6. Modelos de plastificación	17
2.6.1. Plastificación perfecta	18

2.6.2.	Plastificación lineal	18
2.6.3.	Plastificación Ludwik	18
2.7.	Modelos de contacto	19
2.7.1.	Multiplicadores de Lagrange	21
2.7.2.	Penalización	21
3.	Resultados	23
3.1.	Modelo bidimensional	23
3.1.1.	Análisis de sensibilidad de tamaño de malla	23
3.1.2.	Modelos de plastificación	24
3.1.3.	Modelos de contacto	26
3.1.4.	Modelo dinámico	29
3.2.	Modelo tridimensional	30
3.2.1.	Modelo lámina (<i>Shell</i>)	30
3.2.2.	Modelo con elementos sólidos 3D	36
4.	Conclusiones	37
5.	Líneas de actuación futuras	39
6.	Bibliografía	41
	Lista de Figuras	43
	Lista de Tablas	49
	Anexos	50
A.	Resultados análisis de sensibilidad de malla	53
B.	Resultados análisis modelos de plastificación	67
C.	Resultados análisis modelos de contacto	69

1. Introducción y objetivos

Los numerosos avances tecnológicos han ocasionado una gran expansión en los métodos de conformado metálico, generando una mayor demanda, eficiencia y versatilidad. En el caso del sector automotriz, se conforman chasis, carrocería y elementos del motor; en construcción e infraestructura, techos, vigas y componentes de fachadas; aeroespacial y náutica, alas, motores y estructuras de barcos; y finalmente, uso cotidiano, electrodomésticos, envases y herramientas.

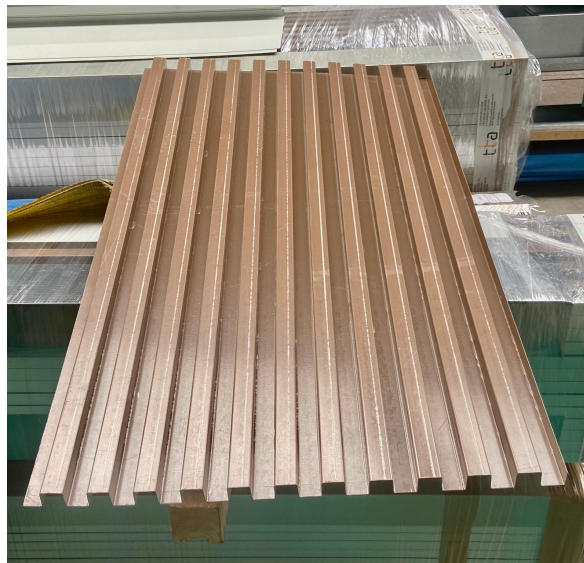


Figura 1.1: Lámina plegada para revestimiento de fachada. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.

En la actualidad, podemos encontrar una gran variedad de procesos de conformado del metal, los cuales pueden diferenciarse según la complejidad de la operación, la temperatura a la que se realizan o el tipo de esfuerzo que requieren.

El presente estudio tiene como objeto la simulación computacional del proceso de conformado por plegado de chapa metálica para la creación de componentes estructurales, tales como perfiles, cubiertas o refuerzos. Este proceso, el cual se puede observar en la Figura 1.2, consiste en la deformación plástica de una lámina metálica plana hasta generar el ángulo deseado, ejerciendo presión sobre la misma. En este

proyecto, se analizan diferentes modelos de plasticidad, contacto y distintas estrategias de mallado para la optimización del proceso de simulación de plegado de ángulos de 60° y 90° . La técnica de plegado requiere el entendimiento de las propiedades de los distintos materiales y el conocimiento del mecanismo de plegado para poder preveer el comportamiento del material durante el proceso.



Figura 1.2: Proceso de plegado. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.

1.1. Elementos del proceso plegado

El proceso de plegado consta principalmente de cuatro elementos: la lámina a deformar, la matriz, el punzón y los topes o guías, como se pueden apreciar en la Figura 1.3. En los siguientes apartados se describen estos componentes y su relevancia en la técnica de plegado.

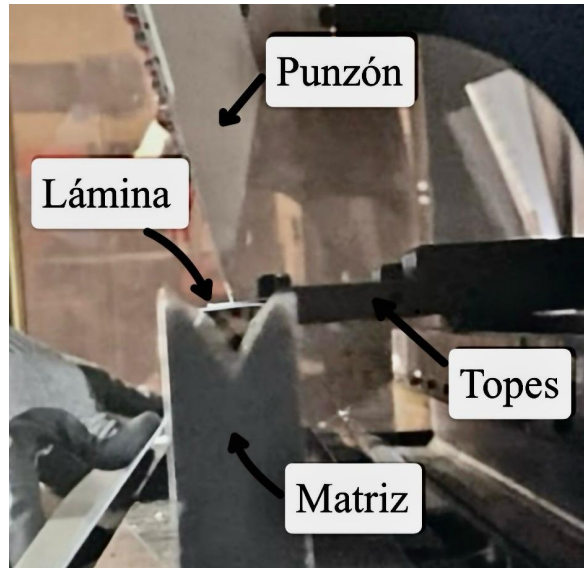


Figura 1.3: Elementos proceso de plegado. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.

Lámina

La lámina es la pieza sobre la cual se ejecuta el proceso de plegado. Es de material maleable, plana y con unas dimensiones determinadas. El espesor y el tipo de material de este elemento determinan las propiedades del punzón y de la matriz. En caso de que la lámina tenga un recubrimiento de pintura, se le suele aplicar una película plástica para protegerla durante el proceso de plegado.

Punzón

El punzón es la herramienta superior de la plegadora, está caracterizado por su forma triangular. Desciende verticalmente para presionar la lámina y deformarla hasta obtener el ángulo deseado. Presenta un sutil redondeo diseñado para adaptarse a los requerimientos del plegado, puede ser pequeño, para pliegues cerrados, o grande, para conseguir radios de curvaturas mayores.

Matriz

La matriz es la herramienta inferior de la plegadora, está diseñada para sostener la lámina durante el proceso de conformado. Dispone de una abertura en forma de “V”, en la cual, el punzón introduce la plancha metálica deformándola. La lámina adquiere la abertura determinada por las dimensiones de la matriz.

Topes o guías

Son los sistemas de referencia y apoyo de la plegadora sobre los que se coloca la lámina antes de realizar el plegado. Se encuentran situados en la zona posterior de la máquina, justo detrás de la matriz. Se ajustan dependiendo de las dimensiones de la lámina y de la distancia a la que se quiera realizar el pliegue. Así se asegura con precisión que el plegado se realizará a la distancia deseada.

1.2. Tipos de técnicas de plegado

Mediante la técnica de plegado se pueden elaborar una gran variedad de tipos de pliegues dependiendo del proceso que se emplee. En los siguientes apartados se tratan los distintos tipos de plegado y sus principales características. En este estudio se detallan y se evalúan los métodos de plegado a fondo y plegado al aire.

1.2.1. Plegado a fondo

El plegado a fondo es un proceso mediante el cual una lámina metálica se deforma al ser presionada con un punzón hasta alcanzar la profundidad máxima de la matriz. En esta técnica se deben escoger con mucha precisión la matriz y el punzón, ya que la plancha de metal se deformará obteniendo el ángulo, la abertura y el radio que los utillajes presenten. La matriz y el punzón deberán tener el mismo ángulo.

Entre las principales ventajas de esta técnica se encuentra la alta precisión en el proceso, siendo adecuado para pliegues que requieren una gran exactitud. Otro aspecto a destacar de este método es que el retorno elástico de la chapa tras la deformación es considerablemente reducido, es decir, el material conserva el ángulo tras el plegado.

Sin embargo, una de las limitaciones que presenta el plegado a fondo es la necesidad de mayor variedad de utillajes, ya que se requieren matrices y punzones específicos para cada ángulo que se quiera obtener y además, requiere una mayor presión para la elaboración de los pliegues. Así mismo, los utillajes tienen una menor vida útil debido a la alta fricción que se genera en cada pliegue.

La Figura 1.4 muestra un ejemplo de una pieza conformada mediante esta técnica en la que se aprecian una serie de pliegues consecutivos con ángulos detallados y uniformes, resultado de la gran precisión que ofrece esta técnica.

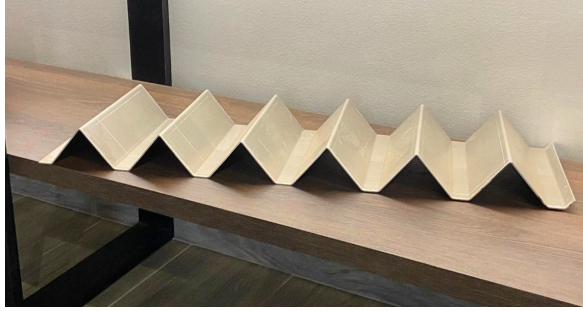


Figura 1.4: Pieza realizada mediante plegado a fondo. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.

1.2.2. Plegado al aire

El plegado al aire consiste en la deformación de la plancha metálica sin que ésta alcance la profundidad máxima de la matriz al ser presionada por el punzón. En esta técnica, siempre se queda un espacio libre entre la lámina y el fondo de la matriz.

Este método se realiza con mucha frecuencia dado que permite realizar una amplia gama de ángulos de plegado empleando un único conjunto de utillajes. Entre sus ventajas destacan la menor presión que se necesita para realizar los pliegues y la mayor vida útil de las herramientas, debido a la menor fricción y desgaste de los punzones y matrices en esta técnica. Además, es un proceso más ágil, ya que para obtener ángulos agudos simplemente se requiere desplazar el punzón unos milímetros hacia abajo, sin tener que dejar un tiempo de reposo el punzón en el punto de máximo desplazamiento.

Por el contrario, este método tiene una menor precisión y un mayor retorno elástico, es decir, se requiere mayor control y corrección del ángulo obtenido. Este último inconveniente, el retorno elástico, se ve corregido gracias al control numérico computarizado (CNC), que consiste en el ajuste automático del descenso del punzón, aumentando el desplazamiento vertical del mismo para compensar este efecto.

La Figura 1.5 muestra una pieza conformada mediante el proceso de plegado al aire, donde se observan pliegues de grandes ángulos realizados sin necesidad de que la chapa llegue al fondo de la matriz.

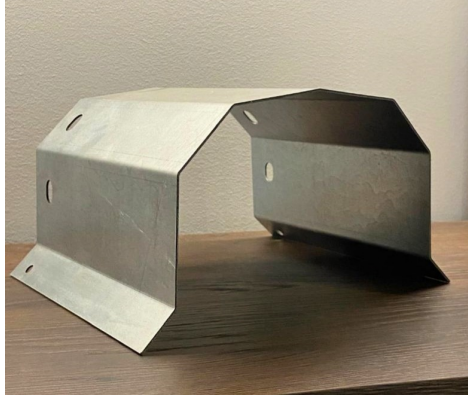


Figura 1.5: Pieza realizada mediante plegado al aire. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.

1.2.3. Estampado

El estampado permite reproducir una forma determinada en la lámina metálica; para ello, se emplea una matriz cuya geometría sea exactamente idéntica a la que se quiere reproducir.

La ventaja principal es que se obtiene un resultado constante, aspecto positivo cuando se requiere la fabricación de grandes series. Esto es debido a que la geometría de la matriz favorece la repetibilidad de los resultados y minimiza los errores y posibles variaciones entre piezas.

Sin embargo, para esta técnica se requiere una presión mucho mayor que en las técnicas anteriormente descritas, lo que implica una mayor fricción y una menor vida útil de los utillajes. Además, sólo se puede emplear este método con espesores pequeños.

La Figura 1.6 muestra una pieza en la que se ha empleado la técnica de estampado para elaborar la hendidura de la base, donde la chapa metálica adquiere una geometría idéntica a la de la matriz empleada.



Figura 1.6: Pieza realizada mediante estampado. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.

1.2.4. Curvado mediante plegadora

Esta técnica es una variante del plegado al aire que permite conseguir distintos radios de curvatura mediante plegados consecutivos en la lámina metálica. Se obtiene una geometría con un radio más amplio o más cerrado dependiendo de los pliegues; a mayor ángulo, radios mayores en la pieza y a menor ángulo, radios menores.

Entre los beneficios que presenta este método, se encuentra la posibilidad de conformar piezas con curvaturas variadas sin recurrir a la técnica de curvado tradicional de rodillos. Además, permite obtener una gran variedad de radios de curvatura, requiere menor esfuerzo y reduce la fricción, debido a la baja presión ejercida por el punzón. Esto aumenta la vida útil de los utillajes empleados.

No obstante, el principal inconveniente es que, a diferencia del curvado tradicional mediante rodillos, este método deja visibles las marcas generadas en cada pliegue, lo cual afecta estéticamente a la pieza. Además, se debe tener en cuenta el retorno elástico, ya que al realizar múltiples pliegues, este efecto puede complicar el proceso y la obtención de piezas mediante este procedimiento.

En la Figura 1.7 se puede observar una pieza fabricada gracias a una sucesión de pliegues de ángulos muy abiertos. Cada pliegue permite controlar el radio de curvatura de la pieza.



Figura 1.7: Pieza realizada mediante curvado. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.

1.3. Motivación

El desarrollo de modelos para la simulación del proceso de plegado de chapa aporta una gran ventaja, frente a la experimentación de métodos convencionales basados en prueba y error. Gracias al análisis computacional, se puede llegar a predecir cómo reaccionará la lámina en diversas configuraciones de plegado, lo que puede conllevar un ahorro de tiempo, costes y recursos.

Este tipo de simulaciones puede anticipar la aparición de posibles defectos, como grietas en el material o el retorno elástico, también conocido como “*springback*”, lo cual puede mejorar considerablemente la calidad en el proceso de plegado. Otro de los principales beneficios de esta línea de acción es la posibilidad de ajustar los parámetros del proceso, como el radio del punzón, el espesor de la lámina o la velocidad del impulso del punzón para observar el resultado final sin tener que malgastar recursos realizando pruebas. Esto puede reducir el número de fallos durante la producción y optimizar el uso de herramientas y utillajes antes de ejecutar la deformación de la lámina metálica.

Además, la realización de modelos de simulación en determinados ángulos puede ser base para predecir la deformación de la chapa en otros ángulos, e incluso con otros materiales. Este tipo de técnicas en la industria pueden analizar y optimizar una amplia variedad de procesos y diseños en la industria metalúrgica, originando una fabricación más precisa, eficiente y sostenible.

En definitiva, la elaboración y simulación de modelos numéricos de plegado de chapa, no solo es un avance en la calidad y eficiencia del plegado de chapa, sino que ofrece la posibilidad de evolucionar hacia procesos más innovadores y adaptados a las necesidades reales de la industria metalúrgica promoviendo la sostenibilidad y la calidad.

1.4. Objetivos

En este TFG se va a simular computacionalmente el proceso de plegado de chapa metálica con el objetivo de analizar las posibilidades de la herramienta numérica, en este caso Comsol, estudiando diferentes modelos de plasticidad, contacto y distintas estrategias de mallado. Para ello se requiere tener conocimiento sobre las propiedades mecánicas del material seleccionado, las condiciones de contorno, la geometría de los utillajes (punzón y matriz) y las condiciones de contacto entre la chapa y los utillajes.

El software empleado será Comsol Multiphysics, el cual permite la simulación del proceso de conformado mediante el método de los elementos finitos. Para ello, se desarrollarán las geometrías de los distintos componentes involucrados, lo que permitirá analizar el proceso de plegado utilizando elementos de diferente dimensionalidad. Asimismo, evaluaremos el impacto del tamaño de malla, el comportamiento plástico del material aplicando distintos modelos de plasticidad y las distintas formulaciones de contacto.

Se comenzará a trabajar sobre un diseño en dos dimensiones, el cual nos permitirá analizar y poner a prueba la viabilidad de la simulación. Gracias a la simplificación geométrica de esta configuración, podremos comprender los aspectos básicos del funcionamiento del proceso con un menor coste computacional.

Posteriormente, se desarrollará un modelo tridimensional para poder observar el comportamiento del material, obteniendo una visión más cercana a la realidad. Dentro de la categoría de configuraciones tridimensionales, se elaborará un modelo en formato tipo shell. Debido a que el espesor de la lámina es considerablemente menor que el resto de las dimensiones. Esta formulación permitirá reducir considerablemente el tamaño de la malla sin perder precisión.

Las configuraciones permitirán estudiar el plegado a fondo, realizando un pliegue a 60° y el plegado al aire, realizando un pliegue de 90° .

Se describen a continuación los objetivos específicos que se quieren alcanzar en este trabajo.

Objetivos específicos

- Desarrollo del modelo bidimensional en Comsol, incluyendo el análisis comparativo de diferentes formulaciones elasto-plásticas y su evolución temporal mediante un análisis dinámico.
- Análisis de sensibilidad del modelo bidimensional a variaciones en la malla y a distintas formulaciones de contacto entre superficies.
- Desarrollo del modelo lámina (*Shell*) en Comsol, así como comparación de su comportamiento con el modelo bidimensional, gracias a estudios estacionarios y dinámicos.
- Desarrollo del modelo 3D con elementos sólidos en Comsol y análisis de sus resultados.
- Determinar áreas de mejora futuras para poder obtener un modelo más realista que pueda mejorar y economizar la técnica de plegado.

2. Definición del modelo

2.1. Diseño Geométrico del Utillaje

En este apartado se va a describir en detalle la geometría específica de los utillajes representados en las simulaciones computacionales. La geometría del punzón y de la matriz influye directamente en los resultados obtenidos y en el comportamiento de la lámina metálica.

Actualmente, en los procesos de plegado se tiende a emplear utillajes cuya geometría está diseñada para generar ángulos más cerrados, lo cual permite realizar una gran variedad de ángulos sin aplicar una presión excesiva, ni llegar al fondo de la matriz. Mediante este método, se pueden generar distintos ángulos con un mismo utillaje, como se va a desarrollar en este estudio. Mediante una matriz y un punzón de 60° se realizarán distintos pliegues a 60° y a 90° .

Las geometrías de los utillajes han sido obtenidas del catálogo de utillajes de Amada Co., Ltd [1]. Se ha seleccionado una matriz AFH 1V 60° V12 (Figura 2.1) y un punzón H70 60° R0.8 (Figura 2.2).

La lámina metálica que emplearemos en este estudio tendrá un espesor constante de 1 mm, valor habitual en procesos de plegado.

Los parámetros geométricos más importantes son:

-Ángulo de la matriz: 60°

-Abertura matriz: 12 mm

-Ángulo punzón: 60°

-Radio punzón: 0,8 mm

-Espesor lámina: 1 mm

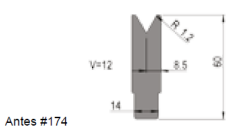
Ángulo	Tipo V	Código	Longitud	Precio	Tipo #0746 AFH - 55 t/m
60°	V12	0746121	835mm	c.p	
		0746122	415mm	c.p	
		0746123	Sec	c.p	

Figura 2.1: Geometría matriz (Recuperado de catálogo Amada Co., Ltd)

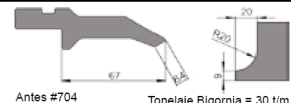
Ángulo	Radio	Código	Longitud	Precio	Tipo #640 - 100 t/m
60°	R0.8	6406081	835mm	c.p	
		6406082	415mm	c.p	
		6406083	Sec	c.p	

Figura 2.2: Geometría punzón (Recuperado de catálogo Amada Co., Ltd)

En el proceso de modelado de la geometría en Comsol se modela únicamente la mitad del punzón, de la lámina y de la matriz para reducir la complejidad del problema. La geometría de la matriz y punzón se ha simplificado representando únicamente sus contornos, como se puede observar en la Figura 2.3. Esta simplificación se debe a que los utillajes son considerados infinitamente rígidos.

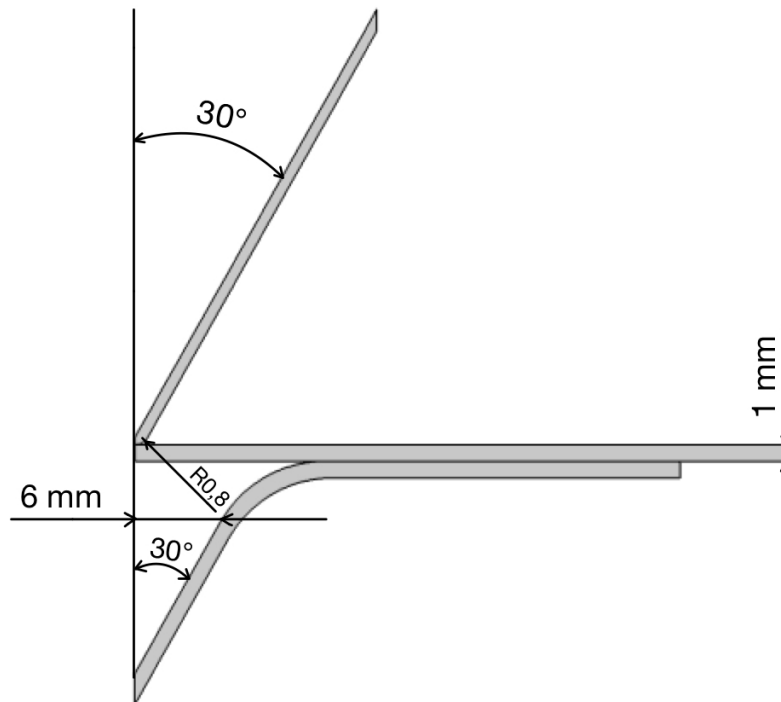


Figura 2.3: Geometría en Comsol

2.2. Material de trabajo

El material seleccionado para este estudio es el acero S275 JR. Es un acero estructural empleado en el campo de la construcción, fabricación de maquinaria y la industria automotriz. Pertenece al grupo de aceros de baja aleación y alto límite elástico; además, está regulado por la norma EN 10025. Es un acero al carbono-manganeso, tiene menos de un 0,24 por ciento de carbono y menos de un 1,60 por ciento de manganeso, entre otros componentes [2]. El término S275 indica que es un acero estructural e indica un límite elástico mínimo de 275 MPa. El término JR indica el nivel de tenacidad del acero, especifica que el acero ha sido sometido a la prueba de impacto de Charpy, y a la temperatura de 20 °C puede absorber una energía mínima de 20 Julios, lo que indica que tiene una resistencia adecuada a condiciones normales de temperatura [3].

Las principales propiedades del acero S275 JR son las siguientes:

-Límite elástico: 275 MPa

-Módulo de Young: 210.000 MPa

-Coeficiente de Poisson: 0,3

2.3. Relación entre ángulo y desplazamiento

Como se ha comentado con anterioridad, en este estudio trabajaremos sobre un modelo de plegado al aire y otro de plegado a fondo, con ángulos de 90° y de 60° respectivamente, con el objetivo de evaluar posibles diferencias entre ambas configuraciones.

Dado que tenemos la misma matriz para ambos modelos, en el caso del plegado a 60°, se requiere una profundidad mayor dado a que el ángulo que se quiere crear en la lámina es más agudo, por lo que el punzón debe descender aproximadamente 10,5 mm.

Sin embargo, para lograr el ángulo de 90°, el punzón requiere de menor profundidad. Con un desplazamiento de 7 mm se obtendrá dicho ángulo.

2.4. Modelo bidimensional

2.4.1. Malla de elementos finitos

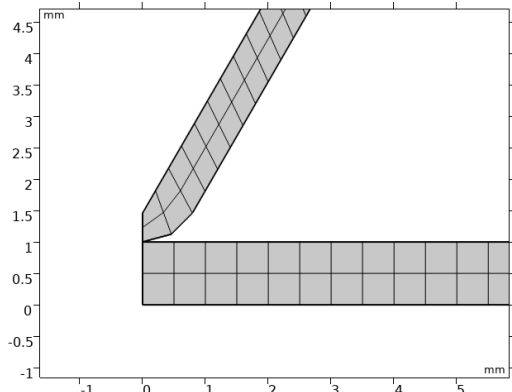
Bajo la hipótesis de deformación plana, que permite trabajar con un modelo bidimensional, se ha escogido una malla de elementos cuadriláteros controlada por el usuario, en lugar de una malla generada automáticamente. De esta forma se puede controlar la distribución de elementos a lo largo de la geometría, evitando que se generen aglomeraciones de elementos en zonas de la geometría que contengan vértices o esquinas. Esto permitirá obtener unos resultados más precisos.

En el mallado controlado, busca obtener elementos cuyo ancho y largo sean iguales para minimizar alteraciones en los resultados. Para ello, se ha dividido la geometría en distintas secciones a las cuales se les ha ido ajustando e incrementando progresivamente el número total de elementos, a la vez que se disminuye el tamaño de estos. En la Tabla 2.1 se observa como se ha variado el número de elementos en cada tramo de cada geometría, así se puede apreciar el progresivo ajuste de los elementos finitos.

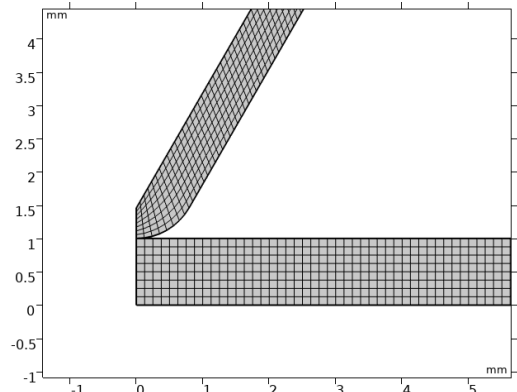
Punzón			Chapa		Matriz				N ^o _T
Ancho	Redondeo	Inclinación	Ancho	Largo	Ancho	Curva	Curva	Inclinación	
2	2	70	2	80	2	40	15	20	454
3	3	100	3	120	3	60	25	30	1014
4	4	130	4	160	4	80	35	40	1796
5	5	160	5	200	5	100	45	50	2800
6	6	190	6	240	6	120	55	60	4026
7	7	220	7	280	7	140	65	70	5474
8	8	250	8	320	8	160	75	80	8064

Tabla 2.1: Distribución del número de elementos según la geometría.

En las Figuras 2.4 se puede apreciar claramente la variación del número de elementos finitos. La Subfigura 2.4a corresponde a la configuración con el menor número de elementos finitos, con un total de 454 elementos totales, donde se puede apreciar una malla más gruesa y con menor definición. Sin embargo, en la Subfigura 2.4b, se observa una malla más fina con 8064 elementos finitos, cuyo refinamiento permite representar la geometría diseñada de forma más precisa.



(a) Malla con 454 elementos finitos.



(b) Malla con 8064 elementos finitos.

Figura 2.4: Detalle del contacto punzón–chapa con distinto mallado.

2.4.2. Modelo dinámico

Tras haber planteado el análisis del proceso de plegado de chapa de 1 mm de espesor para ángulos de 60° y 90° en régimen cuasiestático, se pretende ampliar el estudio incorporando un análisis dinámico.

El intervalo del análisis con el que se va a trabajar en este estudio se define como el intervalo temporal comprendido entre el instante en el que el punzón entra en contacto con la lámina metálica y el instante en el que se alcanza el desplazamiento máximo. Debido a que trabajamos con dos ángulos distintos, 90° y 60° , y sus desplazamientos máximos son distintos, 7 mm y 10,5 mm, respectivamente, se establecerá una misma velocidad para ambos procesos de plegado dando como resultado dos tiempos distintos. De esta manera, se podrá describir el proceso de la forma más realista posible.

Mediante el análisis dinámico podremos analizar, además de los esfuerzos y deformaciones, la influencia de la velocidad del punzón en el comportamiento de la simulación.

2.5. Modelo tridimensional

2.5.1. Modelo lámina

En la práctica se pueden encontrar multitud de geometrías y dimensiones de utillajes, y el espesor de la lámina metálica es una variable que depende del diseño de la pieza a realizar. En este estudio se ha decidido seleccionar el formato lámina. Este tipo de elementos permiten disminuir el tamaño de malla pues en su formulación incorporan el espesor sin la necesidad de incluir elementos en esa dirección.

El formato lámina, con la interfaz *Shell* que ofrece Comsol, se emplea para modelar láminas estructurales en límites tridimensionales. Las láminas son estructuras delgadas, planas o curvas, con una rigidez a la flexión significativa, de apariencia similar a las chapas metálicas empleadas en el proceso de plegado.

Para disminuir el coste computacional, optaremos por una geometría de 20 mm de profundidad. Respecto a la malla de elementos, se ha elegido un mallado de 2465 elementos.

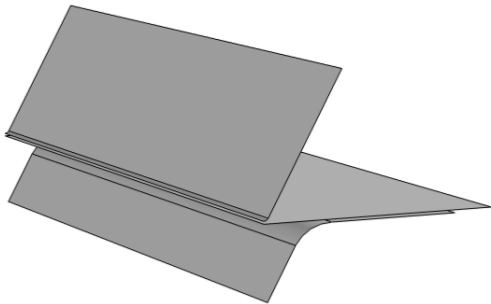


Figura 2.5: Configuración modelo lámina.

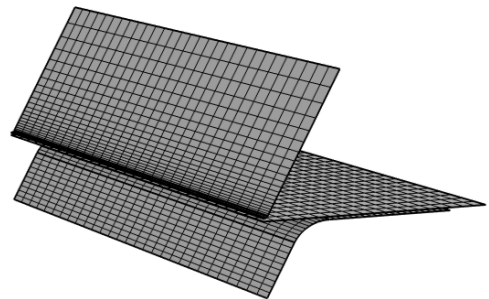


Figura 2.6: Malla modelo lámina.

Modelo cuasiestático

En el análisis cuasiestático, se impondrá el desplazamiento como variable de entrada al modelo, de modo que las fuerzas de reacción y el contacto evolucionarán de acuerdo a dicho desplazamiento. Se podrá comparar el comportamiento del formato lámina con el modelo bidimensional cuasiestático.

Modelo dinámico

El modelo lámina (*Shell*) también puede analizarse mediante un estudio dinámico. Al igual que en el modelo cuasiestático, se impondrá el desplazamiento como variable de entrada al modelo, con la diferencia de que en este tipo de análisis pasan a considerarse los efectos inerciales de la masa de los elementos. Aplicar un estudio dinámico puede resultar complejo en este modelo debido a que estamos tratando con una geometría tridimensional. No obstante, es interesante analizar la evolución del plegado en este tipo de estudios, ya que puede proporcionar resultados más realistas.

2.5.2. Modelo con elementos sólidos 3D

En el proceso real de plegado de chapa, el espesor es un parámetro realmente importante, gracias al cual, la técnica de conformado de plegado es tan versátil. Por ello, se va a realizar un análisis tridimensional estacionario con elementos sólidos. Se observará la capacidad de convergencia del modelo y los valores de desplazamiento y tensiones máximas obtenidas. La malla generada se puede observar en la Figura 2.7. En este modelo se realizará un plegado a 90° , para el cual se requiere un desplazamiento máximo de 7 mm.

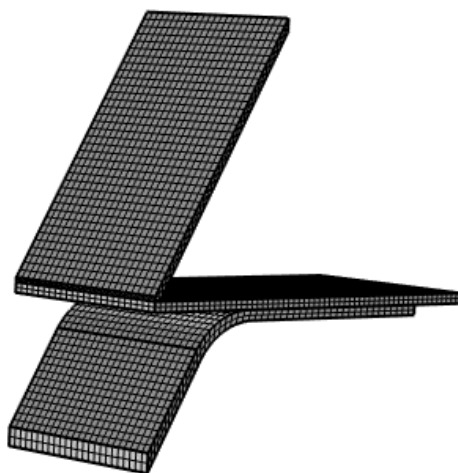


Figura 2.7: Malla generada para el modelo 3D con elementos sólidos

2.6. Modelos de plastificación

Para desarrollar un modelo numérico que reproduzca fielmente las tensiones y deformaciones reales, se debe elegir el modelo de plastificación adecuado. Esto permite representar fielmente el comportamiento no lineal del material a diferencia del comportamiento elástico, el cual simplificaría el resultado. Dado que el proceso de plegado no se ve representado fielmente por un modelo completamente elástico, es necesario analizar el comportamiento del material en modelos plásticos. En este apartado se describen los distintos modelos plásticos que posteriormente se simularán: plastificación perfecta, plastificación lineal y, finalmente, plastificación de Ludwik.

En este estudio, el módulo de endurecimiento tiene gran importancia. Este parámetro describe cómo evoluciona el comportamiento del material una vez comienza

a deformarse. Permite conocer si el material se endurece o se ablanda según avanza la deformación, lo cual se ve reflejado en la zona plástica gracias a la pendiente de la curva tensión-deformación.

2.6.1. Plastificación perfecta

En los modelos plásticos perfectos, el material, una vez alcanza la tensión de fluencia inicial (σ_{ys0}), empieza a deformarse plásticamente manteniendo constante dicha tensión (2.1) [4], sin ningún endurecimiento plástico. Es decir, no aumenta la resistencia del material con la deformación plástica y la tensión de fluencia (σ_{ys}) no varía con la deformación plástica. En esta configuración se obtiene un endurecimiento plástico nulo.

$$\sigma_{ys} = \sigma_{ys0} \quad (2.1)$$

2.6.2. Plastificación lineal

El modelo de plastificación lineal, a diferencia de la plastificación perfecta, sí tiene un endurecimiento progresivo.

$$\sigma_{ys} = \sigma_{ys0} + E_{iso} \varepsilon^p \quad (2.2)$$

En la ecuación 2.2 [4], la tensión de fluencia (σ_{ys}), es descrita como la tensión de fluencia inicial (σ_{ys0}) más el producto de la deformación plástica (ε^p) y el módulo tangencial isótropo que representa la pendiente de la curva del esfuerzo de deformación plástica en el modelo lineal. Dicho módulo (E_{iso}), se emplea en el modelo lineal para calcular la variación de la tensión de fluencia. Adquiere un valor de 2×10^3 MPa para el material empleado en este estudio.

2.6.3. Plastificación Ludwik

Los modelos de endurecimiento más utilizados para reproducir el comportamiento de conformado de láminas metálicas se basan en el exponente de endurecimiento n propuesto por Ludwik [5]. A partir de este modelo, se han establecido ecuaciones para aceros de bajo carbono, aceros de alta resistencia, aceros convencionales y aluminio, las cuales permiten una mejor representación de las medidas obtenidas en ensayos experimentales.

En el modelo de plastificación de Ludwik, la tensión de fluencia (σ_{ys}), se define como una función no lineal de la deformación plástica equivalente (ε_{pe}) como se puede observar en la ecuación 2.3 [4], donde k es el coeficiente de endurecimiento y n es el exponente de endurecimiento.

$$\sigma_{ys} = \sigma_{ys0} + k (\varepsilon_{pe})^n \quad (2.3)$$

Entonces, se puede concluir que en caso de que $n = 1$ se obtendría un endurecimiento isotrópico lineal, en caso de que $n < 1$ el módulo de endurecimiento disminuirá según aumente la deformación y en caso de que $n > 1$ el módulo aumentará según avance la deformación.

Para la simulación del acero S275JR, el cual contiene menos del 0,24 por ciento de carbono mediante el modelo de Ludwik, se obtendrán los valores del coeficiente de endurecimiento (k) y del exponente de endurecimiento (n), mediante interpolación. Se emplean los datos de aceros con 0,05 y 0,6 por ciento de carbono y se obtiene un valor de k de 890 megapascales y de n de 0,2 para un contenido de 0,24 por ciento de carbono. Dichos valores son coherentes para un acero moderadamente dúctil y de bajo endurecimiento. [6]

2.7. Modelos de contacto

En problemas de ingeniería, como el plegado de chapa, se debe tener en cuenta la correcta asignación de las condiciones de contorno, en particular entre lámina metálica y utillajes. En muchos casos, las condiciones de contorno requeridas generan una respuesta no lineal en el sistema, lo cual genera dificultades en la resolución. Por ello, es fundamental comprender el comportamiento de los distintos modelos de contacto que pueden intervenir en este tipo de simulaciones. Estos métodos permitirán imponer restricciones de contacto entre los utillajes y la lámina, y permitirán obtener resultados realistas.

En el caso del ejemplo de la Figura 2.8 que representa un sistema unidimensional masa-muelle, se alcanza un mínimo energético condicionado por la rigidez del muelle. En este ejemplo, la energía potencial de sistema depende del desplazamiento (u) como se puede observar en la ecuación 2.4.

$$\Pi(u) = \frac{1}{2} ku^2 - mgu \quad (2.4)$$

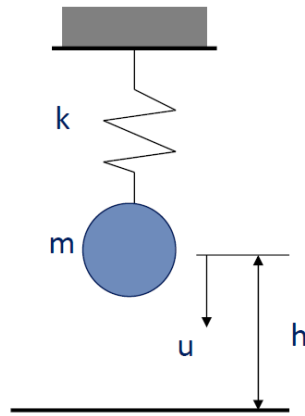


Figura 2.8: Sistema uni-dimensional masa-muelle.

Sin embargo, si añadimos un contacto con una superficie rígida, como es en ese caso el contacto con el suelo, se introduce una restricción que limita el desplazamiento del sistema. El mínimo de energía varía como se puede apreciar en la Figura 2.9. Esta situación altera las fuerzas del sistema; en el instante en el que entran en contacto ambas superficies, aparece una fuerza de reacción cuyo signo es negativo por convenio. Esto provoca una alteración en el equilibrio. Por ello, el mínimo energético del sistema tras la nueva condición se encuentra en otro punto de energía más alto. [7]

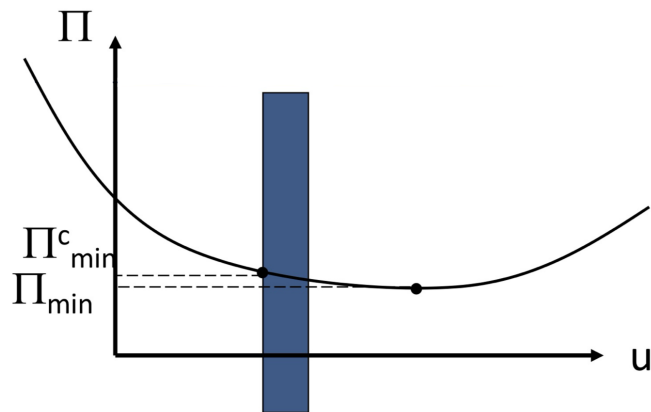


Figura 2.9: Desplazamiento del mínimo energético por condición de contacto.

Este tipo de situaciones se pueden modelar mediante las condiciones de Signorini-Kuhn-Tucker (2.5):

$$c(u) \geq 0, \quad f_R \leq 0, \quad f_R \cdot c(u) = 0 \quad (2.5)$$

Para esto se plantean distintos métodos de resolución del problema de contacto. Encontramos el método de los multiplicadores de Lagrange y el método de penalización.

2.7.1. Multiplicadores de Lagrange

En el método de los multiplicadores de Lagrange, la expresión que determina la energía del sistema se modifica añadiendo un término definido por la fuerza de reacción generada en el contacto y la distancia entre ambos cuerpos. Esto se puede observar en la ecuación 2.6, la cual describe la energía total del sistema como la suma de la energía del propio sistema masa-muelle y el término asociado al contacto. Ahora, la búsqueda del equilibrio puede realizarse mediante dos variables, el desplazamiento y el multiplicador de Lagrange, que representa la fuerza de reacción en el contacto.

$$\Pi(u, \lambda) = \frac{1}{2}ku^2 - mgu + \lambda c(u) \quad (2.6)$$

Al comparar la ecuación (2.6), con las condiciones de Signorini-Kuhn-Tucker (2.5), observamos que el significado físico de λ es el de la fuerza de reacción f_R .

Para ello, en nuestro modelo analizaremos la influencia del método de los multiplicadores de Lagrange en distintos modelos de plastificación, tanto para plegado a 90° como a 60° .

2.7.2. Penalización

En el método de penalización, la expresión que define la energía del sistema se ve modificada por la suma de un nuevo término. Este, define el contacto entre ambos cuerpos como un muelle de rigidez muy alta que evita la penetración entre ambos cuerpos. En el ejemplo masa-muelle, se puede apreciar este término (ϵ), el cual representa dicha rigidez adicional en la Figura 2.10. La rigidez del muelle (ϵ) es idealmente infinita, pero en la práctica se ajusta a un valor finito para facilitar la aproximación.

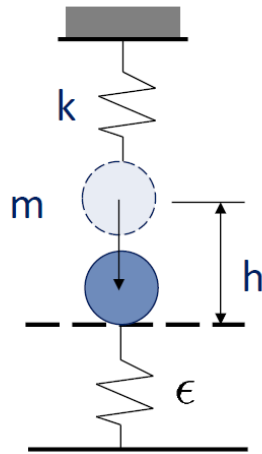


Figura 2.10: Método de penalización en el sistema uni-dimensional masa-muelle.

$$\Pi(u, \lambda) = \frac{1}{2} k u^2 - m g u + \frac{1}{2} \epsilon \langle c(u) \rangle^2 \quad \text{con } \epsilon > 0 \quad (2.7)$$

Para ello, en nuestro modelo representaremos el plegado de chapa a 60° y 90° en los distintos modelos de plastificación y se evaluará la influencia del factor de penalización. Para ello se considerarán distintos valores: 1, 0,1, 0,01, 0,001, y 0,0001. Esto permitirá evaluar cómo mejora el contacto en función del factor de penalización y cómo afecta a la precisión de cada modelo.

3. Resultados

3.1. Modelo bidimensional

3.1.1. Análisis de sensibilidad de tamaño de malla

Tomando las distribuciones de elementos finitos de la Tabla 2.1 se ha realizado un estudio sobre la convergencia de los distintos modelos de simulación realizados en Comsol. Para este estudio se ha considerado un modelo elástico lineal con contacto definido por el método de los multiplicadores de Lagrange.

Nº T	Tensión máx. 60º (MPa)	Tensión máx. 90º (MPa)
454	85101	29237
1014	83314	29196
1796	80826	29251
2800	75262	29246
4026	75260	29260
5474	73697	29276
8064	70543	29260

Tabla 3.1: Tensiones máximas a 60° y 90° para distintos refinamientos de malla.

En los resultados obtenidos, en el modelo de plegado de 60º, la configuración de malla permite forzar la lámina hasta llegar al ángulo deseado, pero no es lo suficientemente precisa en todas las configuraciones, debido a que no todos los modelos consiguen alcanzar el desplazamiento máximo de 10,5 mm, los modelos con mallas más refinadas no completan la deformación. Además, se puede observar en la Tabla 3.1 cómo hay una gran variación en la tensión máxima, desde 85101 MPa a 70543 MPa, lo cual explica que con mallas menos refinadas obtenemos picos de tensión más elevados, que no son reales. Asimismo, esto también explica que al considerar un material elástico lineal, que no incluye plastificación, se alcanzan tensiones muy elevadas que no son reales.

En los resultados del plegado a 90° , con todas las configuraciones de malla, obtenemos el desplazamiento máximo de 7 mm y las tensiones máximas varían poco. Estos resultados son consecuencia de que el desplazamiento impuesto para el plegado a 90° es menor que en el plegado a 60° , por lo que a 60° hay mayor región de contacto y es más difícil su convergencia.

En las Figuras 3.1 y 3.2 se pueden apreciar los resultados registrados en la Tabla 3.1 para las configuraciones de 2800 elementos finitos totales.

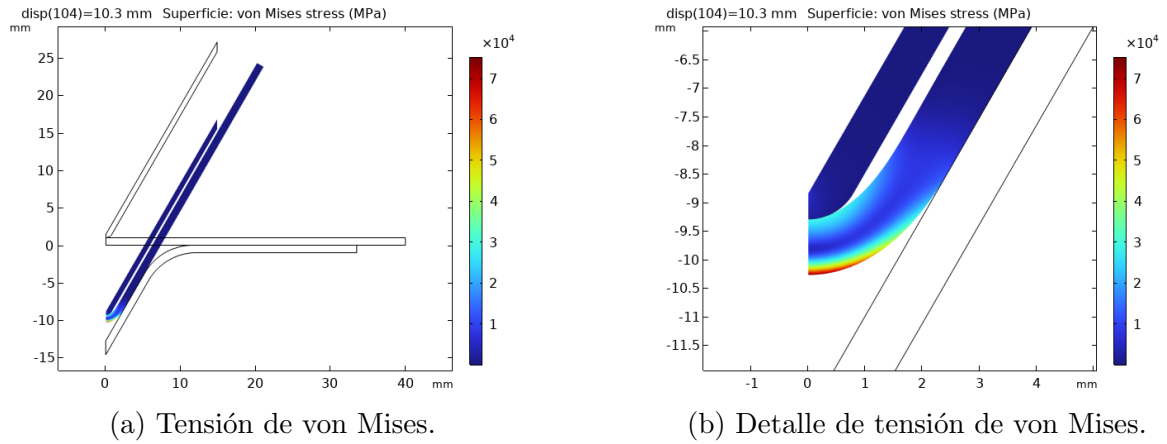


Figura 3.1: Resultados de plegado a 60° con malla de 2800 elementos.

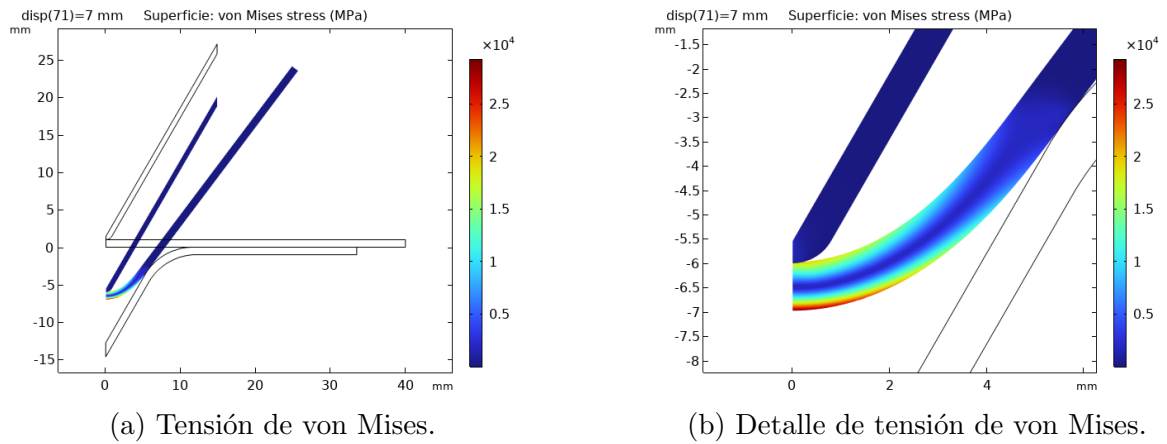


Figura 3.2: Resultados de plegado a 90° con malla de 2800 elementos.

Los resultados detallados de este estudio se pueden encontrar en el Anexo A donde se encuentran Figuras complementarias.

3.1.2. Modelos de plastificación

En la Figura 3.3 se representa la evolución de la tensión de von Mises en el punto de mayor tensión registrada de la lámina, es decir, en el pliegue, en la parte exterior.

En este caso se representa para plegado a 60° los comportamientos diferenciados de los tres modelos de plastificación.

El modelo de plasticidad perfecta muestra un comportamiento ideal. Tras alcanzar el límite elástico de 275 MPa, el modelo muestra una tensión constante, lo que indica una ausencia de endurecimiento. En cambio, el modelo lineal, tras alcanzar el valor de 275 MPa, aumenta gradualmente hasta llegar a un valor aproximado de 800 MPa al final del desplazamiento. Finalmente, el modelo de plastificación de Ludwik, con un exponente de 0,2 (n) y un coeficiente (k) de 890 MPa, muestra el crecimiento del endurecimiento, llegando a superar el valor de 980 MPa. Aunque en este modelo, el valor de n es menor a 1, y esto implicaría que deberíamos obtener un endurecimiento decreciente, el elevado valor del coeficiente k y la gran deformación que supone el plegado a 60° , generan un considerable aumento de la tensión. Sin embargo, la evolución de la curva es coherente con el exponente $n = 0,2$, se puede observar una gran progresión al inicio, tras la cual la curva se aplana según avanza la deformación, característica de un exponente $n < 1$.

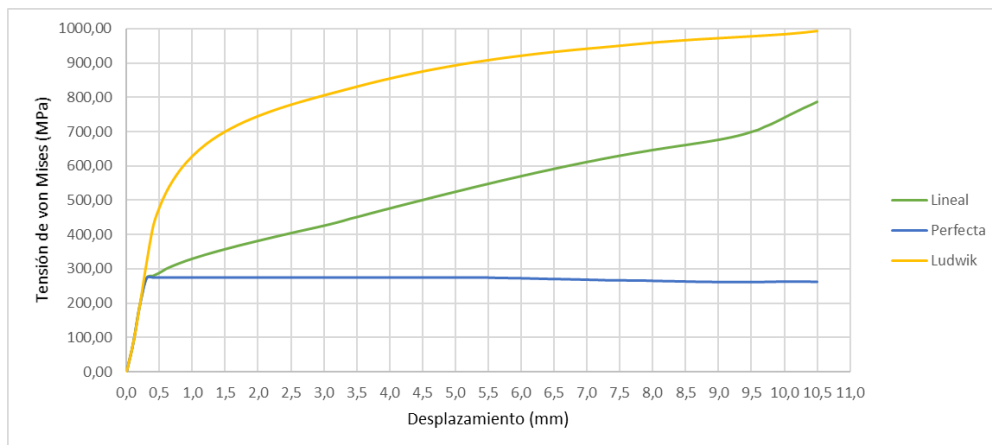


Figura 3.3: Tensión en función del desplazamiento en plegado a 60° .

En la Figura 3.4, se observa de nuevo la evolución de la tensión de von Mises en función del desplazamiento para plegado a 90° , en los modelos de plastificación perfecta, lineal y Ludwik.

Tras analizar los resultados obtenidos en esta nueva configuración, observamos que se alcanzan unos valores de tensión menores que en el plegado a 60° , debido a que el desplazamiento que recorre el punzón es menor. El modelo de plasticidad perfecta se comporta de forma idéntica a la configuración a 60° , es decir, la tensión se incrementa hasta alcanzar el valor del límite elástico, 275 MPa, y después mantiene este valor constante. El modelo lineal en el plegado a 90° alcanza el valor de 600 MPa,

a diferencia de los 800 MPa que alcanza en el plegado a 60°. El modelo de Ludwik en plegado a 90° (con un coeficiente k de 890 MPa y un exponente n de 0,2) adquiere un endurecimiento inicial muy acentuado, al igual que en el plegado a 60°, pero en esta nueva configuración, al final de la deformación, alcanza un valor de 920 MPa, menor a los 1000 MPa observados en el caso anterior.

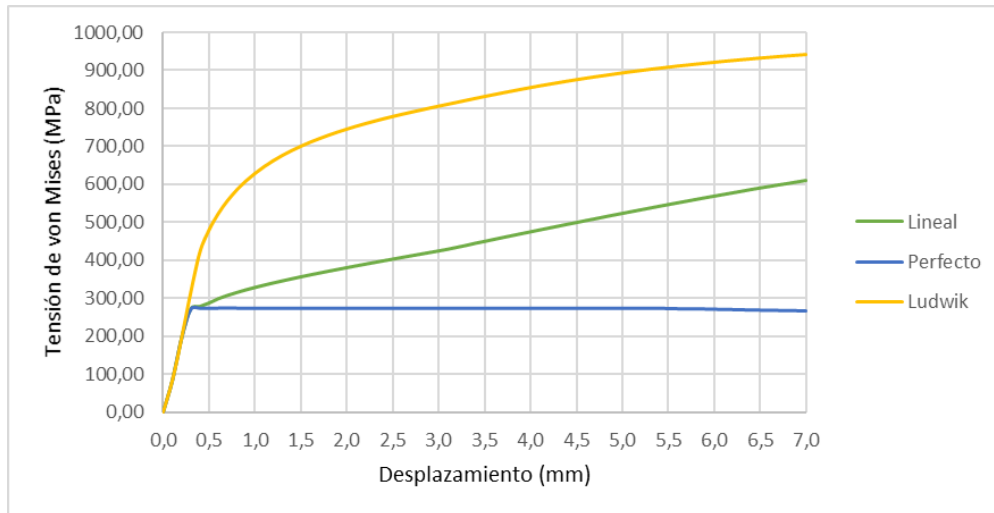


Figura 3.4: Tensión en función del desplazamiento en plegado a 90°.

Los resultados detallados de este estudio se pueden encontrar en el Anexo B donde se encuentran Figuras complementarias.

3.1.3. Modelos de contacto

Para cada modelo de plasticidad (perfecta, lineal y Ludwik) se ha variado el criterio de contacto, mediante el método de penalización y el método de multiplicadores de Lagrange.

Se ha comenzado poniendo en práctica el método de los multiplicadores de Lagrange, tanto para plegado a 60°, como para 90°.

En el plegado a 90°, los tres modelos de plasticidad alcanzan el desplazamiento máximo de 7 mm lo que indica que para esta deformación, el método de Lagrange se comporta de manera estable y no está influenciado por el modelo de plasticidad. Sin embargo, en el plegado a 60°, con un desplazamiento de 10,5 mm, los modelos de Ludwik y de plasticidad perfecta sí alcanzan la deformación máxima, mientras que el modelo lineal se ve limitado a 9,5 mm. A excepción del plegado a 60° en el modelo lineal, el método de los multiplicadores de Lagrange es muy eficiente para la representación del contacto en el proceso de plegado de chapa y permite resolver el

contacto de manera eficaz en la mayoría de los modelos.

Tras haber evaluado los modelos en el método de los multiplicadores de Lagrange, ahora estudiaremos la influencia del factor de penalización.

Factor penalización	Plastificación lineal (mm)	Plastificación perfecta (mm)	Plastificación Ludwik (mm)
1	-	8,5	9,7
0,1	9,3	10,5	10,1
0,01	9,6	10,5	10,3
0,001	10,5	10,5	10,4
0,0001	10,5	10,5	10,5

Tabla 3.2: Desplazamiento según modelo de plastificación y factor de penalización en plegado a 60°.

La Tabla 3.2 permite analizar si se produce convergencia completa en los modelos para completar los desplazamientos impuestos. En ella se observan los resultados obtenidos de los desplazamientos máximos para el plegado a 60°. En cada modelo de plastificación se ha variado el factor de penalización para estudiar su influencia.

Se puede observar que cuando el valor del factor de penalización es alto, no todos los modelos alcanzan la deformación máxima y a medida que el factor de penalización disminuye, todos los modelos consiguen llegar a la profundidad requerida de 10,5 mm. El modelo de plasticidad perfecta no muestra problemas de convergencia, a excepción del modelo en el que el factor de penalización adquiere el valor de 1, donde no llega a alcanzar el desplazamiento impuesto. El modelo de plastificación de Ludwik muestra una respuesta progresiva a la variación del valor del factor de penalización. Se puede apreciar cómo, según se incrementa el factor de penalización, el modelo aumenta progresivamente el valor de desplazamiento máximo hasta alcanzar los 10,5 mm. Parte de un desplazamiento de 9,7 mm con un factor de 1 y aumenta el valor del desplazamiento gradualmente hasta alcanzar los 10,5 mm. Por otro lado, el modelo de plastificación lineal tiene un comportamiento más crítico. Esto se debe a que con un factor de penalización igual a 1, la simulación no converge; es a partir del factor de penalización igual a 0,1 en el que converge y alcanza un desplazamiento, en este caso de 9,3 mm. A partir de un valor de 0,001, el modelo completa el proceso de plegado llegando a los 10,5 mm.

En el caso de plegado a 90°, el desplazamiento máximo es de 7 mm. Todos los modelos consiguen alcanzar el desplazamiento máximo con todos los valores del factor de penalización, a excepción de un modelo con un valor de penalización concreto. Volvemos a encontrar problemas en el modelo de plastificación lineal con un factor de valor 1, debido a que no converge y no proporciona solución, al igual que ocurría en el modelo de plegado a 90°. Esto concuerda con los resultados obtenidos en el plegado

a 60° y afianza la conclusión de que el uso de factores de penalización de órdenes elevados afecta negativamente a la estabilidad numérica del modelo y a la solución que proporciona.

Conviene destacar que en los modelos de plegado mediante el método de factor de penalización, al representar el contacto, se pueden apreciar interferencias en la geometría de la matriz. Como se aprecia en la Figura 3.5b, se produce una superposición de la geometría del punzón junto con la de la lámina metálica, y también, de la matriz con la lámina metálica. Este suceso se aprecia con mayor facilidad en el plegado a 60° debido a que conlleva un mayor desplazamiento, y especialmente en el modelo lineal, el cual es el menos estable de los tres modelos de plastificación estudiados. Esta superposición no debería ocurrir, lo cual implica una deficiencia en el contacto en el modelo numérico. Como se aprecia en las Figuras 3.5a y 3.5b, con un factor de penalización bajo, mejoramos el proceso de plegado permitiendo que se alcance el desplazamiento máximo impuesto, pero según disminuye este factor, aumenta la interferencia geométrica generando un resultado poco realista, dado que esa interferencia no ocurre físicamente. Esto contradice la estabilidad numérica y la representación de la realidad en el proceso de plegado de chapa. Entonces, se debe hallar una combinación adecuada en los parámetros para conseguir un desplazamiento óptimo sin interferencias entre los componentes de la simulación.

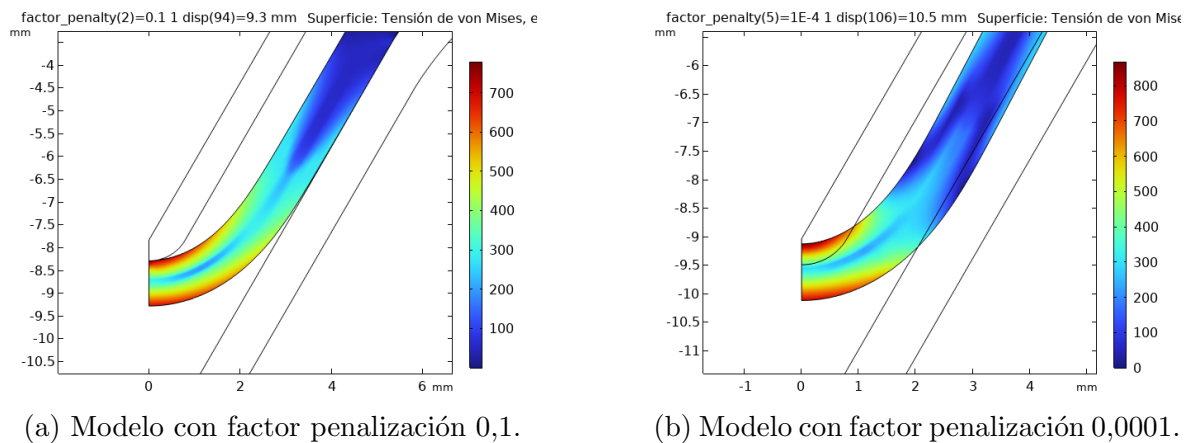


Figura 3.5: Detalle del contacto de modelo lineal en plegado a 60° con distintos factores de penalización.

Los resultados detallados de este estudio se pueden encontrar en el Anexo C donde se encuentran Figuras complementarias.

3.1.4. Modelo dinámico

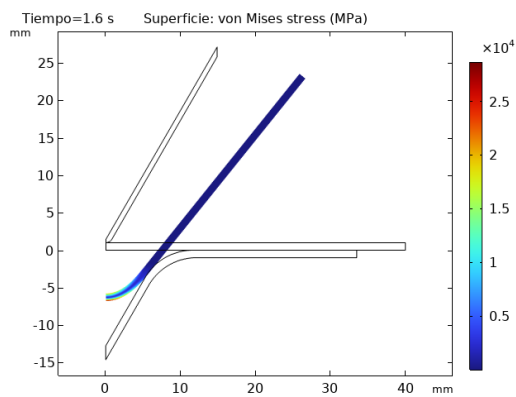
Se han establecido distintas velocidades de plegado para las configuraciones de plegado a 90° y 60° , dando como resultado la Tabla 3.3. Dichas velocidades se obtienen tras suponer valores estándar en los que el punzón podría recorrer el desplazamiento impuesto, dando lugar a un amplio rango de valores que permitan obtener distintos resultados.

Velocidad (mm/s)	Desplazamiento máx 60° (mm)	Desplazamiento máx 90° (mm)
7,78	8,89	3,78
6,54	10,5	4,31
5	10,5	6,8
4,38	10,5	7

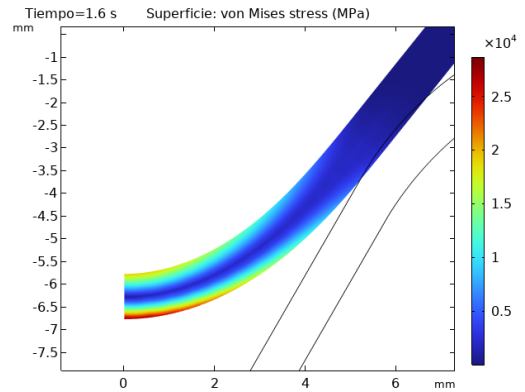
Tabla 3.3: Desplazamiento máximo en el plegado dinámico a 60° y 90° para distintas velocidades.

Se observa que la convergencia depende de la velocidad de aplicación del impulso, en este caso, del movimiento del punzón. Para velocidades menores a 6,54 mm/s se consigue alcanzar el desplazamiento requerido en el plegado a 60° , es decir, una profundidad de 10,5 mm; sin embargo, a velocidades más elevadas no llega a dar dicha solución. En el plegado a 90° , donde se debe alcanzar un desplazamiento máximo de 7 mm, se observa un comportamiento similar, se alcanza el desplazamiento requerido a una velocidad de 4,38 mm/s, es decir, 2,4 segundos para llegar a la profundidad requerida en el plegado a 60° y 1,6 mm en el plegado a 90° . Estos resultados se pueden observar en las Figuras 3.6b y 3.7b.

Dichos intervalos son ligeramente elevados para un proceso realista, teniendo en cuenta que el tiempo se mide desde el instante en el que el punzón entra en contacto con la lámina hasta que alcanza el desplazamiento máximo. Una velocidad más adecuada sería la de 6,54 mm/s, donde el proceso de plegado a 90° se realizaría en 1,1 segundos y el de 60° , en 1,6 segundos. Sin embargo, como se puede observar, la simulación no alcanza la convergencia en el plegado a 60° . Cabe destacar que cada máquina de plegado puede tener limitaciones en la velocidad por criterios de seguridad o por capacidad de la máquina.

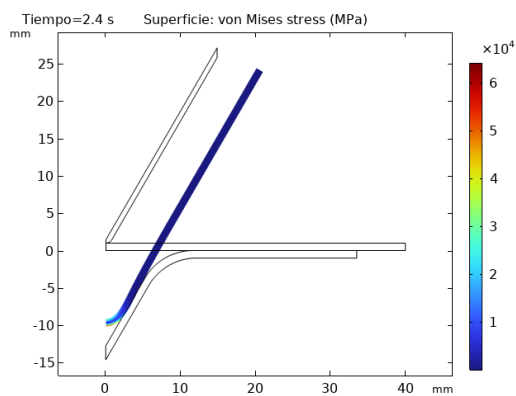


(a) Distribución tensión de von Mises.

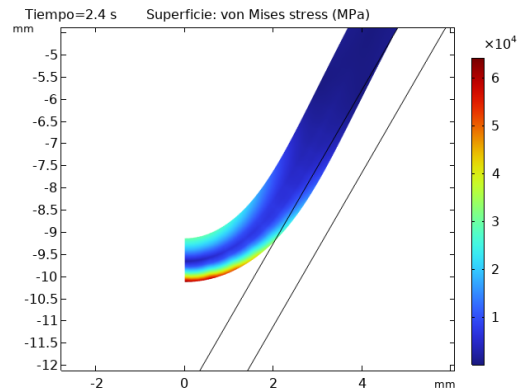


(b) Detalle distribución tensión de von Mises.

Figura 3.6: Resultados de modelo dinámico plegado a 90° .



(a) Distribución tensión de von Mises.



(b) Detalle distribución tensión de von Mises.

Figura 3.7: Resultados de modelo dinámico plegado a 60° .

3.2. Modelo tridimensional

3.2.1. Modelo lámina (*Shell*)

Modelo estacionario

En este apartado, se va a realizar una comparación entre dos configuraciones distintas, el modelo bidimensional estacionario y el modelo tridimensional en formato lámina (*Shell*). Para esta comparación se ha empleado un modelo de material elástico lineal en dos dimensiones, de malla refinada, con un total de 8064 elementos, para obtener resultados más precisos y mostrar una comparación fiable.

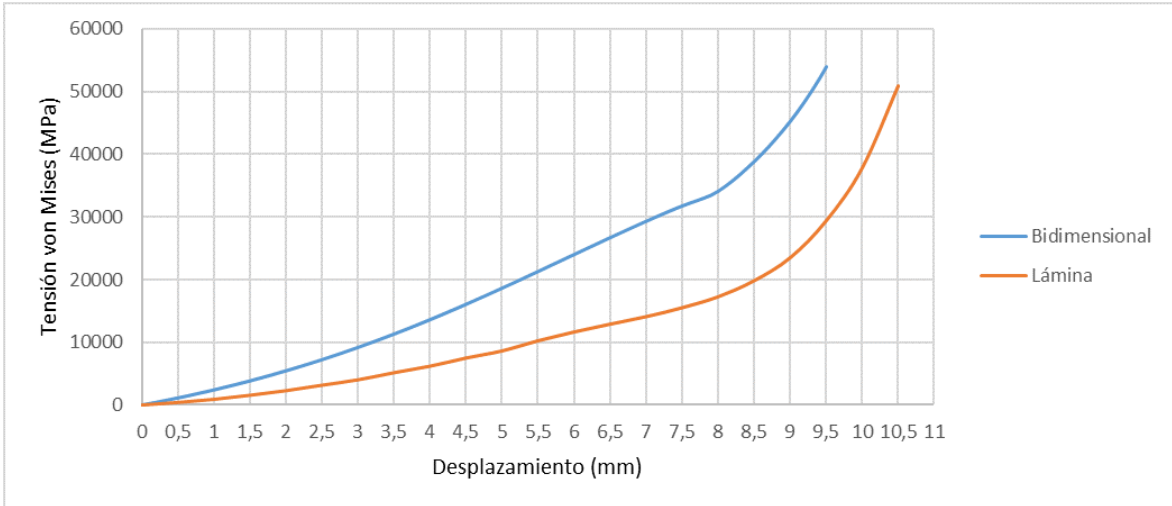


Figura 3.8: Comparación tensiones von Mises en modelo lámina y modelo bidimensional en plegado a 60°

Como se puede observar en la Figura 3.8, en el plegado a 60°, al final de la deformación, las curvas tienen una inclinación similar y la diferencia de tensiones al final no es elevada. Ambas curvas muestran tendencias similares. Sin embargo, es importante destacar que el modelo bidimensional no alcanza el mismo nivel de convergencia que el modelo lámina. El modelo lámina alcanza los 10,5 mm; no obstante, el modelo bidimensional se ve limitado a 9,5 mm. Por ello, debemos comparar ambos modelos con un desplazamiento de 9,5 mm. En dicho punto, la diferencia de tensiones es significativa, el modelo bidimensional alcanza 53.910 MPa y el modelo lámina alcanza 29.416 MPa.

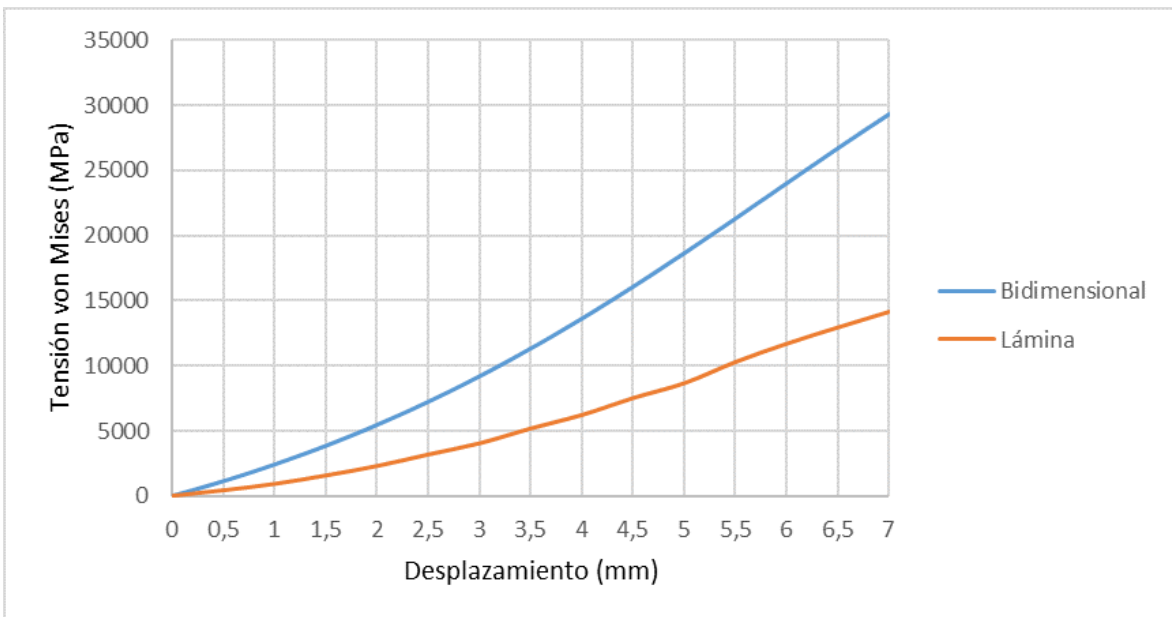


Figura 3.9: Comparación tensiones von Mises en modelo lámina y modelo bidimensional elementos en plegado a 90°

Sin embargo, en la Figura 3.9, se aprecia como en el plegado a 90° , la diferencia entre las pendientes es considerable. El modelo bidimensional siempre muestra tensiones más elevadas que el modelo lámina, dando como lugar casi el doble de tensión final de la deformación.

Como en ambas simulaciones, el modelo bidimensional muestra tensiones superiores con respecto al modelo lámina, puede afirmarse que el shell muestra un comportamiento más flexible de la chapa, mientras que el modelo bidimensional muestra una respuesta más rígida.

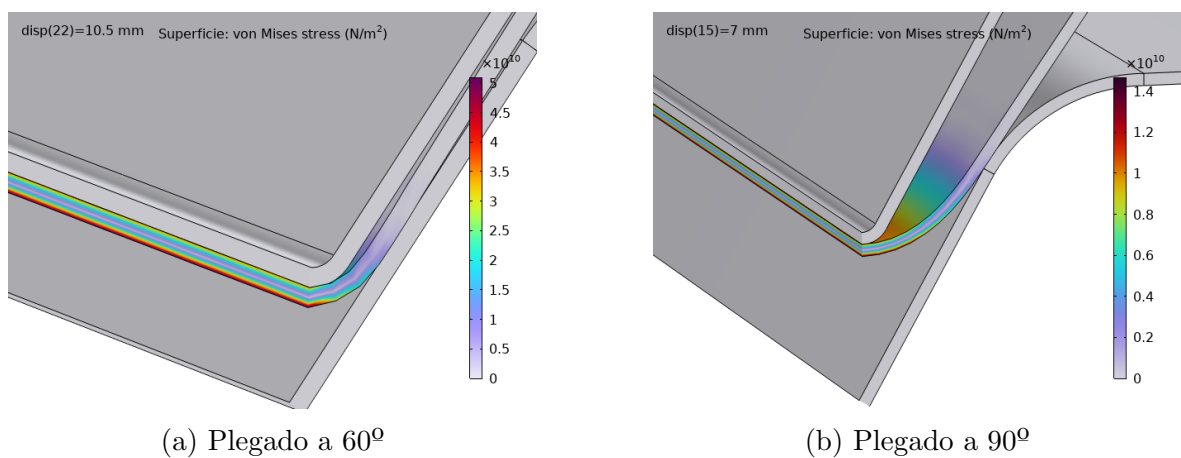


Figura 3.10: Detalle tensión von Mises de modelo lámina en estacionario.

En la Figura 3.10 se pueden observar los resultados de la distribución de von Mises en el formato lámina. El programa representa el espesor para una mejor visualización. En el plegado a 60° (3.10a) las tensiones son mayores y más concentradas, a diferencia del modelo de plegado a 90° (3.10b).

Modelo dinámico

Tras realizar la simulación dinámica en el modelo lámina (*Shell*) variando el valor del factor de penalización se han obtenido los resultados de la Tabla 3.4 para el estudios de los desplazamientos. Estos resultados se han realizado para el modelo de plegado a 90° ; es decir, se ha impuesto un desplazamiento máximo de 7 mm en un intervalo de 1 segundo.

Factor de penalización	Desplazamiento máximo (mm)
0,002	4,67
0,001	4,78
0,0009	4,73
0,0008	4,67
0,0003	4,05
0,0001	3,15

Tabla 3.4: Desplazamiento máximo para distintos factores de penalización en el análisis dinámico en el modelo lámina.

Los resultados muestran claramente que ninguno de los modelos consigue alcanzar el desplazamiento impuesto de 7 mm. Como se observa en las Figuras 3.11 y 3.12, la simulación presenta un error en la geometría; se observan interferencias entre la lámina y el punzón, así como entre la lámina y la matriz. Se ha variado el factor de penalización para analizar la posibilidad de mejorar el resultado e intentar aumentar el desplazamiento alcanzado.

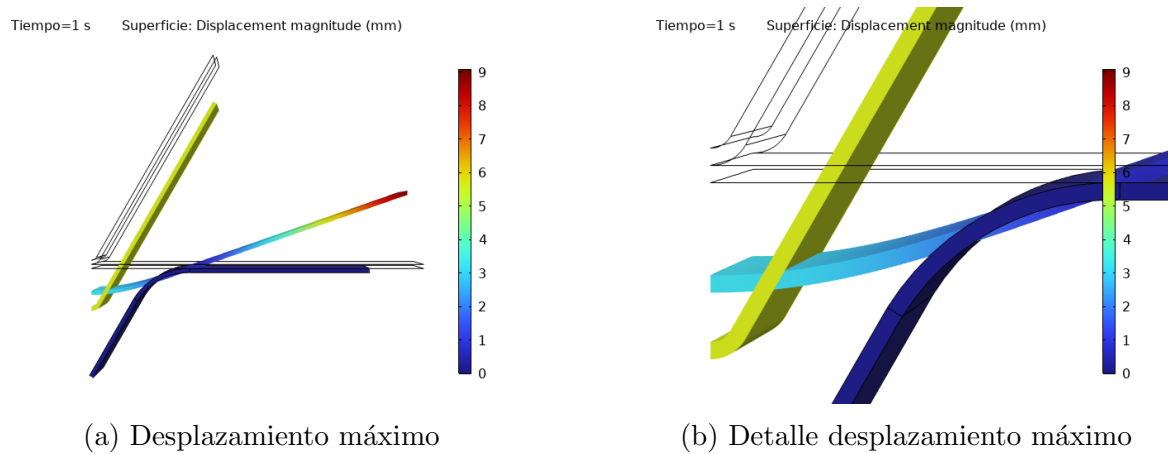


Figura 3.11: Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,0001

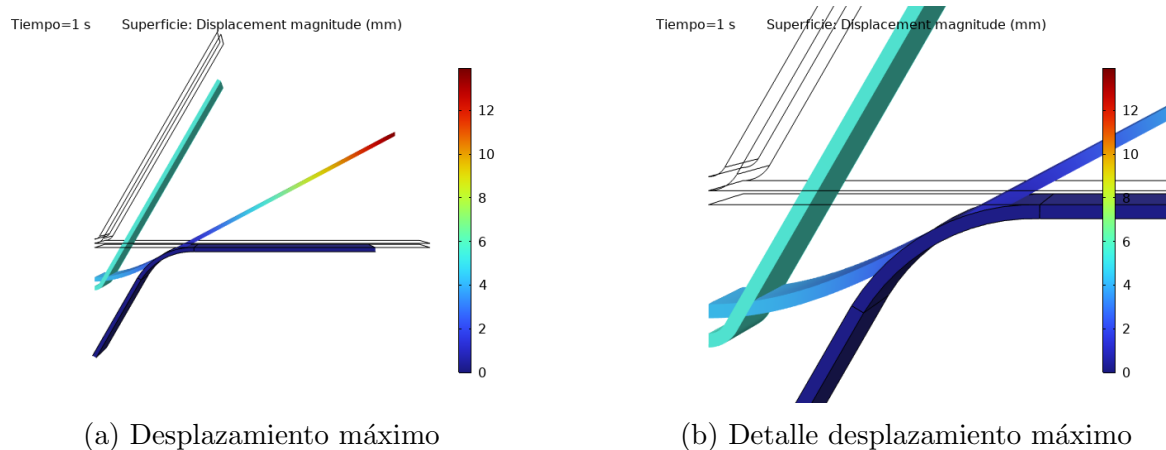


Figura 3.12: Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,0003

Entonces, el punto en el que se obtiene un mejor resultado corresponde al factor de penalización 0,001, sin embargo, el desplazamiento máximo es de 4,78 mm, valor lejano a los 7 mm requeridos. A pesar de ser el punto óptimo, como se aprecia en la Figura 3.13, se observa una discordancia en la geometría de aproximadamente 1 mm. Si el valor del factor de penalización se aumenta respecto a 0,001, el error geométrico aumenta; y si se disminuye respecto a dicho punto, el error también aumenta.

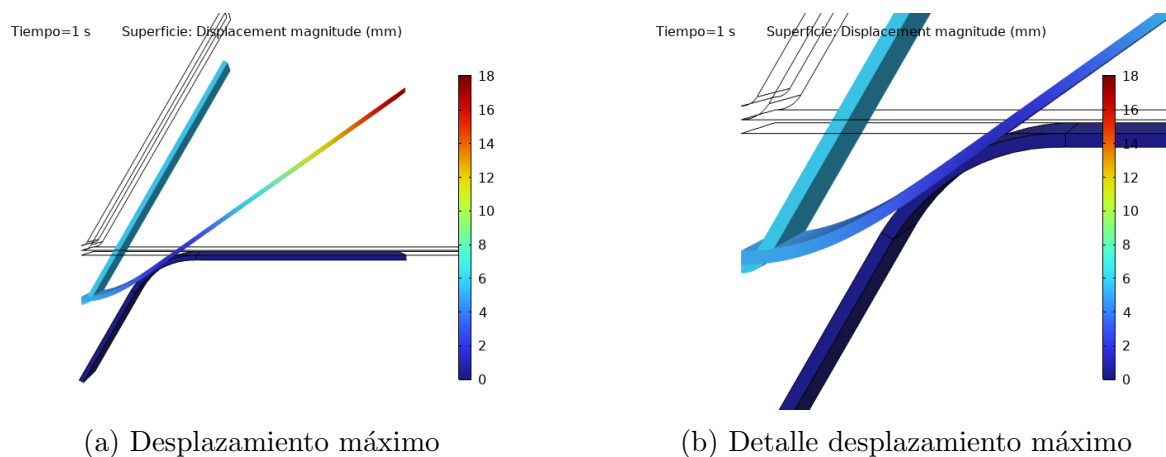


Figura 3.13: Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,001

Respecto al análisis de tensiones máximas de von Mises, se han recopilado los resultados en la Tabla 3.5. En ella, se puede observar que las tensiones más elevadas se encuentran en el modelo que tiene el valor óptimo de factor de penalización, debido a que es el que puede alcanzar un mayor desplazamiento. Las tensiones disminuyen si nos alejamos del factor de penalización con respecto al valor de 0,001, al igual que ocurre con el desplazamiento.

Factor de penalización	Tensiones de von Mises (MPa)
0,002	7669
0,001	7960
0,0009	7834
0,0008	7590
0,0003	5694
0,0001	3622

Tabla 3.5: Tensiones máximas de von Mises para distintos factores de penalización en el análisis dinámico en el modelo lámina.

Sin embargo, recordamos que en este modelo se producen interferencias geométricas que no son reales, por lo que estas tensiones tampoco pueden considerarse verídicas ni comparables entre ellas.

En la Figura 3.14 se pueden observar los resultados de las tensiones máximas para el factor de penalización óptimo, valor de 0,001.

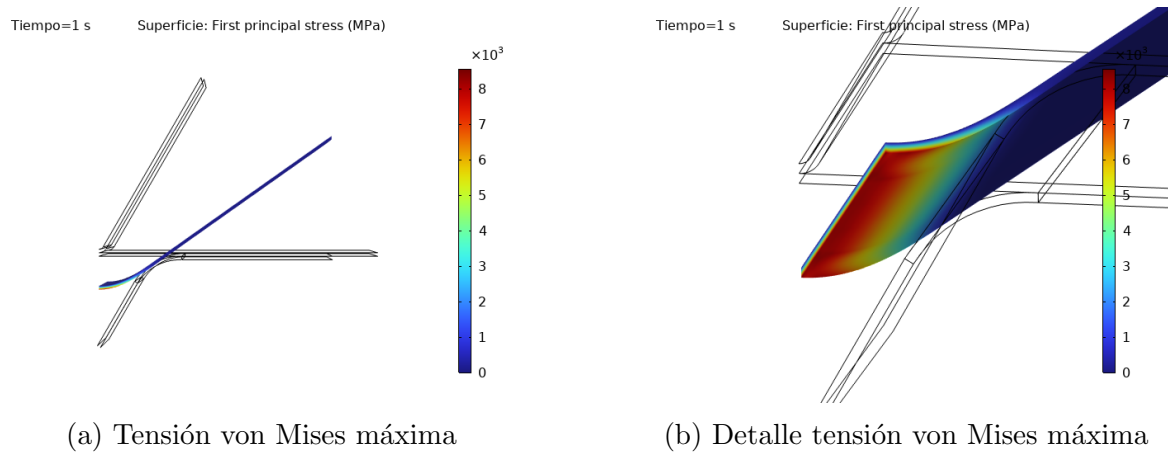


Figura 3.14: Tensión von Mises máxima alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,001

En definitiva, la simulación no representa adecuadamente el proceso de plegado debido al gran número de interferencias que presenta en la geometría, las cuales no se producen en la realidad. Aunque se pueden analizar resultados sobre la convergencia numérica del modelo, debido a las interferencias, no se pueden obtener conclusiones verídicas sobre desplazamientos y tensiones máximas.

Los resultados detallados de este estudio se pueden encontrar en el Anexo D donde se encuentran Figuras complementarias.

3.2.2. Modelo con elementos sólidos 3D

En este apartado se analizan los resultados del modelo tridimensional para el plegado de chapa a 90° , el cual necesita un desplazamiento del punzón de 7 mm.

Sin embargo, como se puede apreciar en la Figura 3.15, el modelo solo alcanza un desplazamiento máximo de 2,17 mm. En este punto, la tensión máxima es de 6191 MPa como se puede observar en la Figura 3.16.

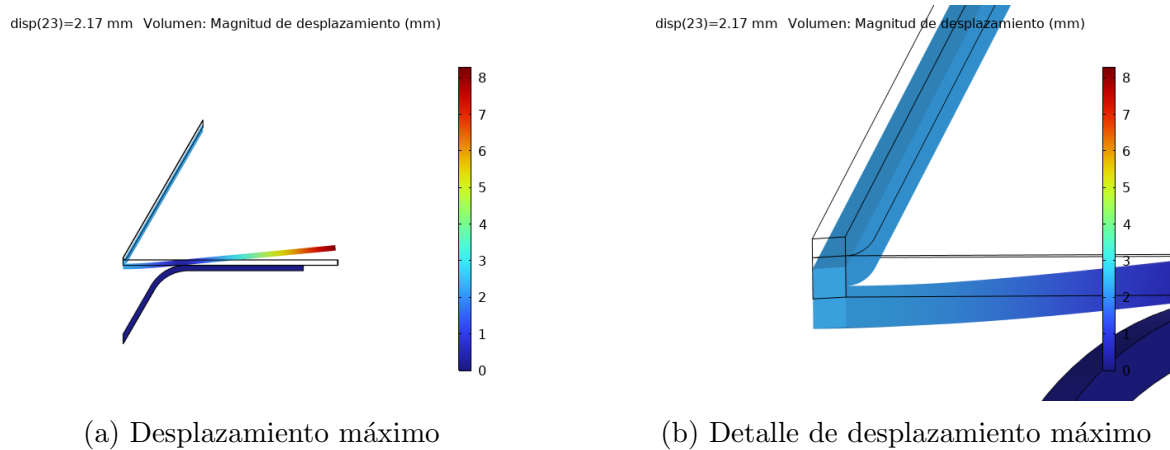


Figura 3.15: Desplazamiento máximo en el modelo tridimensional para plegado a 90°

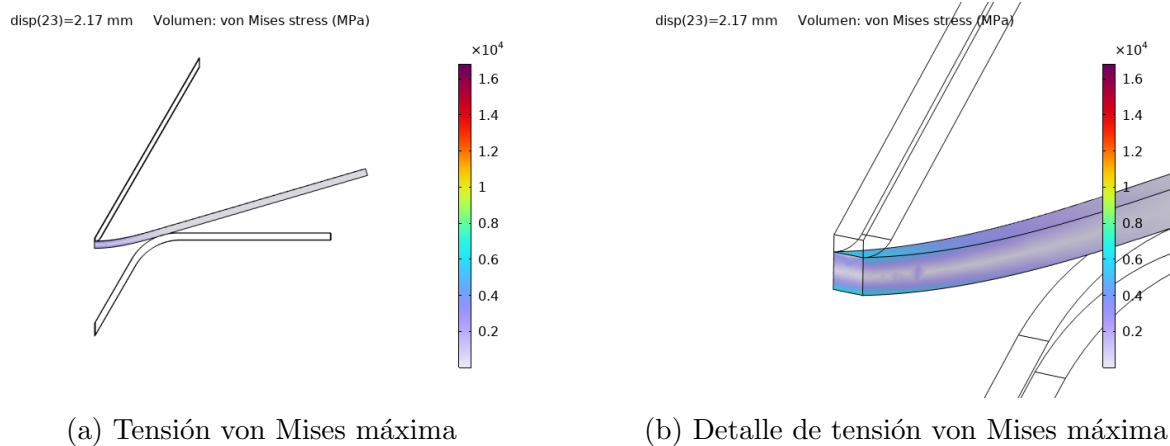


Figura 3.16: Tensión de von Mises máxima en el modelo tridimensional para plegado a 90°

El modelo muestra claras limitaciones de convergencia y es insuficiente para representar adecuadamente el proceso de plegado. Aunque el análisis permite generar un modelo que comienza a simular el proceso de plegado, no es válido para un análisis completo del proceso. Esto se debe al gran coste computacional que requiere este modelo, y resulta complejo realizar pruebas para mejorar la convergencia.

4. Conclusiones

Gracias al análisis bidimensional, se ha podido analizar la influencia del mallado, los modelos de plastificación y las formulaciones de contacto para la representación del proceso de plegado de chapa para los ángulos de 60° y 90° , tanto en condiciones cuasiestáticas como dinámicas.

En el análisis de sensibilidad de la malla de elementos finitos se puede apreciar que las mallas finas representan de forma más realista el modelo, pero requieren mayor coste computacional. El modelo de 454 elementos finitos requiere de un tiempo de 2 minutos y 23 segundos, mientras que el modelo de 8064 elementos requiere 52 minutos y 50 segundos. En el caso de plegado a 60° , el tamaño del elemento tiene una influencia notable en la precisión de los resultados; sin embargo, en el plegado a 90° , debido al menor desplazamiento impuesto, el modelo converge rápidamente y es menos sensible.

Tras realizar el análisis de los modelos de plastificación, podemos concluir que los modelos se comportan como es esperado, por ello, para ajustar mejor los parámetros se debería tener en cuenta el efecto *springback* en una pieza real, lo cual ayudaría a ajustar mejor el modelo. Debido a la mayor exigencia requerida en el plegado a 60° , se obtuvieron tensiones superiores al plegado a 90° .

Respecto a las formulaciones de contacto, el método de los multiplicadores de Lagrange, converge y es estable para la mayoría de modelos a excepción del modelo lineal en plegado a 60° . El método de los factores de penalización depende estrictamente del valor del factor empleado; con valores elevados no se alcanzan los desplazamientos necesarios. Sin embargo, valores bajos sí alcanzan el desplazamiento requerido, pero muestran interferencias en la geometría que no representan fielmente el proceso. Lo cual implica la búsqueda de equilibrio entre estabilidad numérica y geométrica.

En relación al análisis dinámico, podemos confirmar que se debe tener un adecuado control de la velocidad de carga. Aunque las velocidades bajas permiten la convergencia del modelo y la obtención de los desplazamientos requeridos, proporcionan unos resultados menos realistas, ya que en la práctica, el proceso de plegado se realiza en

tiempos más cortos. Esto muestra que, a pesar de que el modelo dinámico debería mostrar un comportamiento similar al real, la complejidad del modelo lo limita. Asimismo, se debe tener en cuenta que en el proceso real, la máquina tendrá un limitador de velocidad de plegado por criterios de seguridad y de calidad, lo cual es una limitación añadida que se debe tener en cuenta.

En el análisis tridimensional, el formato lámina (*Shell*) estacionario muestra tendencias similares al modelo bidimensional. Sin embargo, al analizar los resultados en puntos concretos del desplazamiento se puede observar una diferencia de tensiones significativa. Las tensiones en el modelo bidimensional son mayores, es decir, el modelo lámina es más flexible que el modelo bidimensional. Respecto al análisis dinámico en el modelo lámina, se puede concluir que ninguna configuración logra reproducir el proceso de plegado real, porque el modelo muestra interferencias geométricas que no son reales y ninguna configuración alcanza el desplazamiento impuesto, siendo el factor de penalización 0,001 el que proporciona el mejor resultado.

En el análisis del modelo tridimensional con elementos sólidos, el modelo comienza a simular el proceso de plegado, pero este resulta insuficiente para completarlo. Alcanza un máximo desplazamiento de 2,17 mm, bastante menor al valor impuesto, de 7 mm.

En resumen, el modelo bidimensional ha ayudado a la comprensión de las propiedades del material, modelos plásticos, modelos de contacto y evolución dinámica del modelo. El modelo tridimensional ha permitido simular el proceso con una geometría más realista, sin embargo ha mostrado grandes limitaciones de convergencia y un coste computacional muy elevado.

5. Líneas de actuación futuras

Durante el desarrollo del presente trabajo de fin de grado, surgen nuevas cuestiones, que pueden servir como base para futuras aplicaciones de las simulaciones realizadas. Se enumeran a continuación algunas de las propuestas.

- Modelado de geometrías más complejas que contengan múltiples pliegues para evaluar como interactúan entre sí las zonas plastificadas y cuantificar el efecto global del retorno elástico de forma más realista, además de predecir fallos y grietas durante la deformación.
- Generar una base de datos de distintas combinaciones de espesores, materiales, ángulos y utillajes para predecir el comportamiento de la lámina metálica en nuevos diseños. De esta forma se podrían realizar consultas durante la fase de diseño de una forma eficaz.
- Análisis de altas velocidades de plegado con el objetivo de optimizar el proceso de plegado y disminuir el tiempo de ejecución. Se estudiarían los efectos de los parámetros más importantes bajo distintos el análisis dinámico para determinar un rango óptimo de velocidades que permita mantener la calidad de la pieza.
- Optimización de los parámetros característicos de los utillajes como el radio del punzón o la apertura de la matriz analizando los resultados de fuerza máxima requerida, mayor deformación alcanzada, menor retorno elástico y mejor calidad superficial. Este estudio permitiría reducir el desgaste de los utillajes, prolongar su vida útil y minimizar el consumo de recursos ofreciendo un proceso de fabricación más sostenible.

6. Bibliografía

- [1] AMADA. Herramientas para punzonadora, 2025.
- [2] Metalasa. *Productos siderúrgicos: Datos y características principales*, 2023. Catálogo técnico. Para información completa consultar normas UNE-EN correspondientes.
- [3] UNE-EN 10025-2:2006 Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 2: Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales no aleados. Technical report, AENOR, 2006.
- [4] COMSOL Multiphysics®. *Elastoplastic Material Models*. COMSOL, 2024. https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.sme/sme_ug_theory.06.29.html.
- [5] A. Augusto Durán, Gustavo Capilla, Ismael Ruiz López, and Justin Eder González. Análisis numérico-experimental de modelos de endurecimiento en simulación fem de pruebas de nakazima para acero de bajo carbono cr04. In *Memorias del XXX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*.
- [6] Stephen D. Cramer and Bernard S. Covino Jr., editors. *ASM Handbook*. ASM International, Materials Park, Ohio, 10th edition, 2005. Formerly Metals Handbook.
- [7] Lección 11. condiciones de contorno. Apuntes de la asignatura Simulación Computacional en Ingeniería Estructural. Material docente proporcionado.

Lista de Figuras

1.1. Lámina plegada para revestimiento de fachada. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.	1
1.2. Proceso de plegado. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.	2
1.3. Elementos proceso de plegado. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.	3
1.4. Pieza realizada mediante plegado a fondo. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.	5
1.5. Pieza realizada mediante plegado al aire. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.	6
1.6. Pieza realizada mediante estampado. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.	7
1.7. Pieza realizada mediante curvado. Imagen proporcionada por Transformados Técnicos Aragón S.L.	8
2.1. Geometría matriz (Recuperado de catálogo Amada Co., Ltd)	12
2.2. Geometría punzón (Recuperado de catálogo Amada Co., Ltd)	12
2.3. Geometría en Comsol	12
2.4. Detalle del contacto punzón–chapa con distinto mallado.	15
2.5. Configuración modelo lámina.	16
2.6. Malla modelo lámina.	16
2.7. Malla generada para el modelo 3D con elementos sólidos	17
2.8. Sistema uni-dimensional masa-muelle.	20
2.9. Desplazamiento del mínimo energético por condición de contacto.	20

2.10. Método de penalización en el sistema uni-dimensional masa-muelle.	22
3.1. Resultados de plegado a 60 ^o con malla de 2800 elementos.	24
3.2. Resultados de plegado a 90 ^o con malla de 2800 elementos.	24
3.3. Tensión en función del desplazamiento en plegado a 60 ^o	25
3.4. Tensión en función del desplazamiento en plegado a 90 ^o	26
3.5. Detalle del contacto de modelo lineal en plegado a 60 ^o con distintos factores de penalización.	28
3.6. Resultados de modelo dinámico plegado a 90 ^o	30
3.7. Resultados de modelo dinámico plegado a 60 ^o	30
3.8. Comparación tensiones von Mises en modelo lámina y modelo bidimensional en plegado a 60 ^o	31
3.9. Comparación tensiones von Mises en modelo lámina y modelo bidimensional elementos en plegado a 90 ^o	31
3.10. Detalle tensión von Mises de modelo lámina en estacionario.	32
3.11. Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90 ^o con factor de penalización 0,0001	33
3.12. Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90 ^o con factor de penalización 0,0003	34
3.13. Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90 ^o con factor de penalización 0,001	34
3.14. Tensión von Mises máxima alcanzado para plegado a 90 ^o con factor de penalización 0,001	35
3.15. Desplazamiento máximo en el modelo tridimensional para plegado a 90 ^o	36
3.16. Tensión de von Mises máxima en el modelo tridimensional para plegado a 90 ^o	36
A.1. Resultados de plegado a 60 ^o con malla de 454 elementos	53
A.2. Resultados de plegado a 60 ^o con malla de 1014 elementos	54
A.3. Resultados de plegado a 60 ^o con malla de 1796 elementos	55
A.4. Resultados de plegado a 60 ^o con malla de 2800 elementos	56

A.5. Resultados de plegado a 60° con malla de 4026 elementos	57
A.6. Resultados de plegado a 60° con malla de 5474 elementos	58
A.7. Resultados de plegado a 60° con malla de 8064 elementos	59
A.8. Resultados de plegado a 90° con malla de 454 elementos	60
A.9. Resultados de plegado a 90° con malla de 1014 elementos	61
A.10. Resultados de plegado a 90° con malla de 1796 elementos	62
A.11. Resultados de plegado a 90° con malla de 2800 elementos	63
A.12. Resultados de plegado a 90° con malla de 4026 elementos	64
A.13. Resultados de plegado a 90° con malla de 5474 elementos	65
A.14. Resultados de plegado a 90° con malla de 8064 elementos	66
B.1. Curva tensión–desplazamiento (von Mises) para distintos modelos de plastificación para plegado a 60°	67
B.2. Curva tensión–desplazamiento (von Mises) para distintos modelos de plastificación para plegado a 90°	68
C.1. Resultados de plegado a 60° mediante método de multiplicadores de Lagrange en modelo de plastificación lineal	69
C.2. Resultados de plegado a 60° mediante método de multiplicadores de Lagrange en modelo de plastificación perfecta	70
C.3. Resultados de plegado a 60° mediante método de multiplicadores de Lagrange en modelo de plastificación Ludwik	71
C.4. Resultados de plegado a 90° mediante método de multiplicadores de Lagrange en modelo de plastificación lineal	72
C.5. Resultados de plegado a 90° mediante método de multiplicadores de Lagrange en modelo de plastificación perfecta	73
C.6. Resultados de plegado a 90° mediante método de multiplicadores de Lagrange en modelo de plastificación Ludwik	74
C.7. Resultados de plegado a 60° mediante método de factor de penalización en modelo de plastificación lineal	75
C.8. Resultados de plegado a 60° mediante método de factor de penalización en modelo de plastificación perfecta	76

C.9. Resultados de plegado a 60° mediante método de factor de penalización en modelo de plastificación Ludwik	77
C.10. Resultados de plegado a 90° mediante método de factor de penalización en modelo de plastificación lineal	78
C.11. Resultados de plegado a 90° mediante método de factor de penalización en modelo de plastificación perfecta	79
C.12. Resultados de plegado a 90° mediante método de factor de penalización en modelo de plastificación Ludwik	80
D.1. Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,002.	81
D.2. Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,001.	81
D.3. Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,0009.	82
D.4. Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,0008.	82
D.5. Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,0003.	82
D.6. Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,0001.	83
D.7. Tensión von Mises máxima para plegado a 90° con factor de penalización 0,002.	83
D.8. Tensión von Mises máxima para plegado a 90° con factor de penalización 0,001.	83
D.9. Tensión von Mises máxima para plegado a 90° con factor de penalización 0,0009.	84
D.10. Tensión von Mises máxima para plegado a 90° con factor de penalización 0,0008.	84
D.11. Tensión von Mises máxima para plegado a 90° con factor de penalización 0,0003.	84

D.12.Tensión von Mises máxima para plegado a 90º con factor de penalización	
0,0001.	85

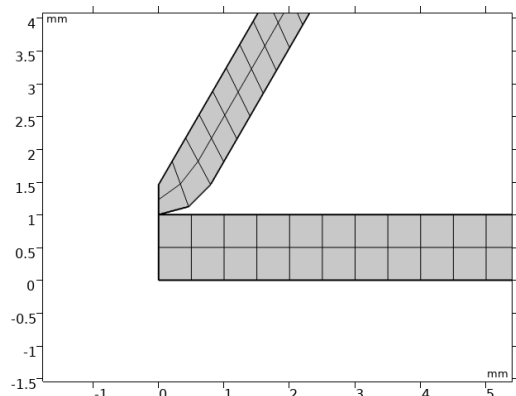
Lista de Tablas

2.1. Distribución del número de elementos según la geometría.	14
3.1. Tensiones máximas a 60° y 90° para distintos refinamientos de malla. . .	23
3.2. Desplazamiento según modelo de plastificación y factor de penalización en plegado a 60°	27
3.3. Desplazamiento máximo en el plegado dinámico a 60° y 90° para distintas velocidades.	29
3.4. Desplazamiento máximo para distintos factores de penalización en el análisis dinámico en el modelo lámina.	33
3.5. Tensiones máximas de von Mises para distintos factores de penalización en el análisis dinámico en el modelo lámina.	35

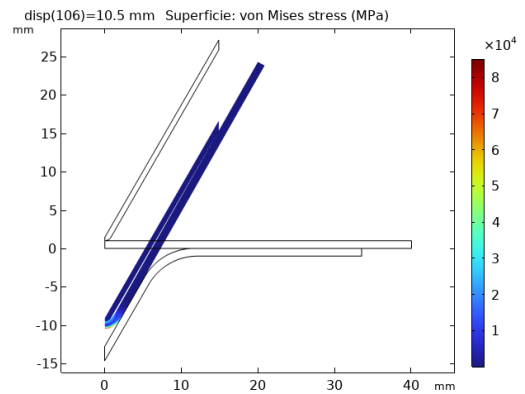
Anexos

A. Resultados análisis de sensibilidad de malla

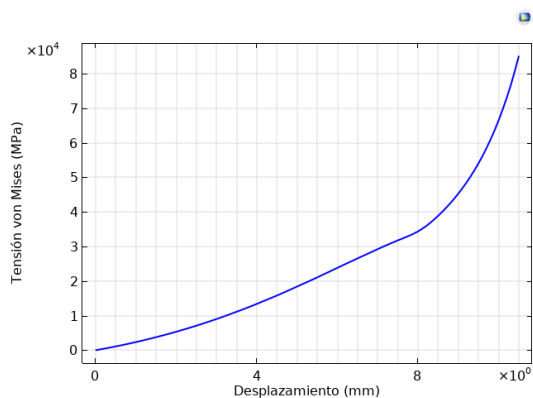
En el siguiente anexo se muestran los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad de la malla de elementos finitos. Se muestran distintos detalles de las distintas configuraciones de malla empleadas, las distribuciones de tensiones máximas registradas y las curvas tensión-desplazamiento obtenidas, tanto para plegado a 60° como para 90° .



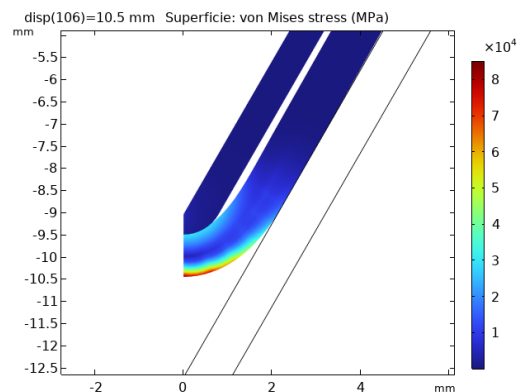
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises

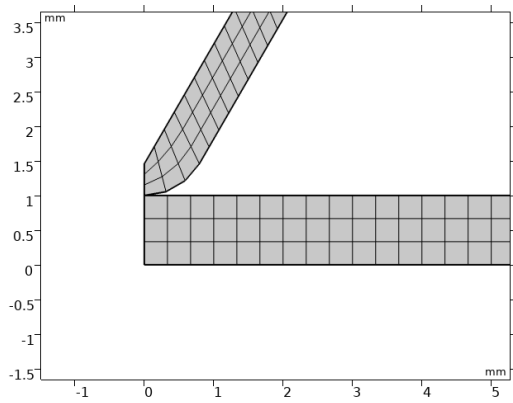


(c) Curva tensión-desplazamiento (von Mises)

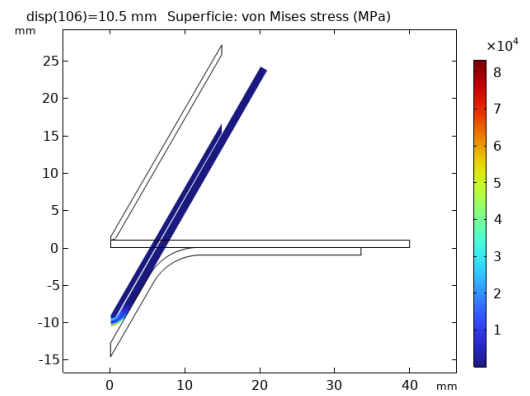


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

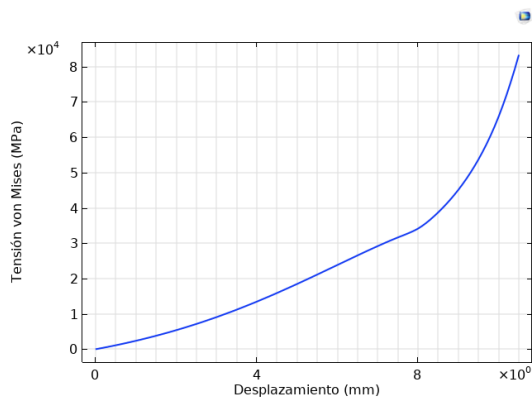
Figura A.1: Resultados de plegado a 60° con malla de 454 elementos



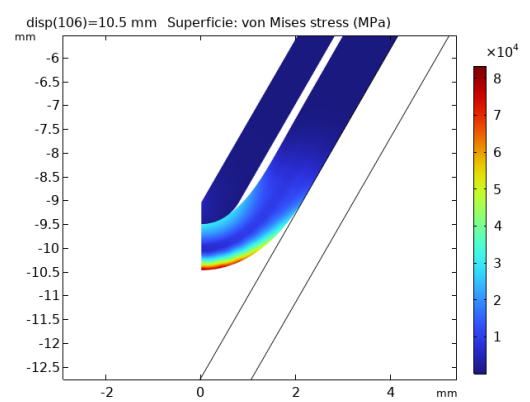
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises

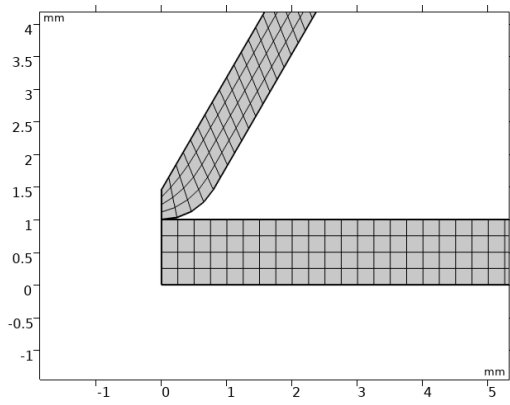


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

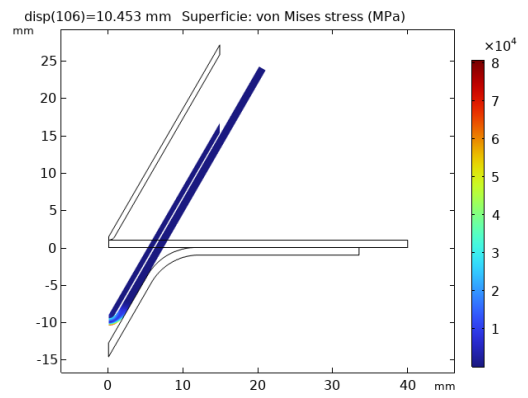


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

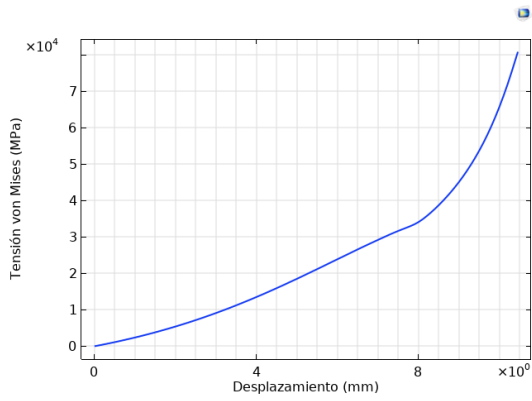
Figura A.2: Resultados de plegado a 60° con malla de 1014 elementos



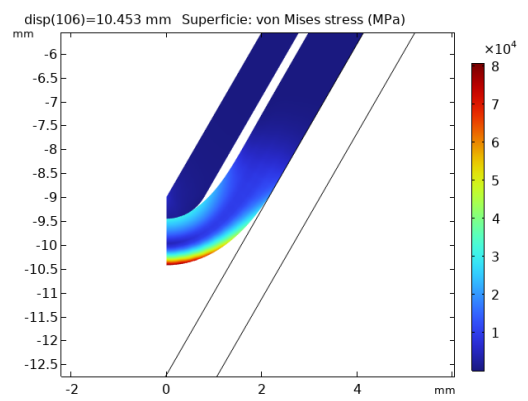
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises

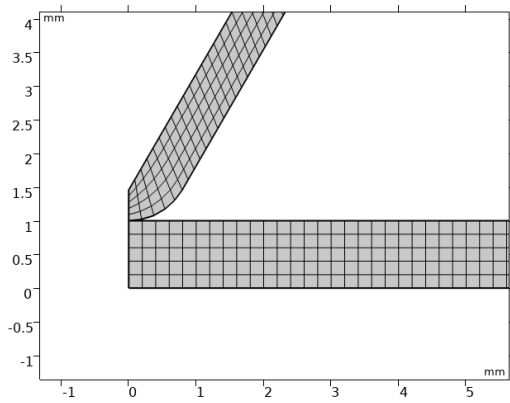


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

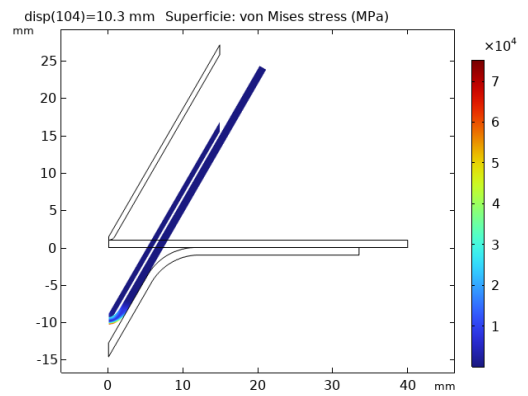


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

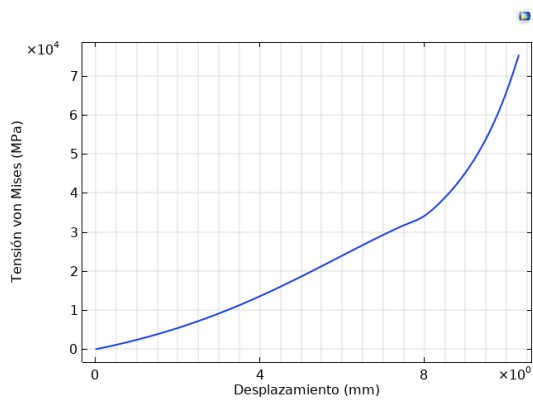
Figura A.3: Resultados de plegado a 60° con malla de 1796 elementos



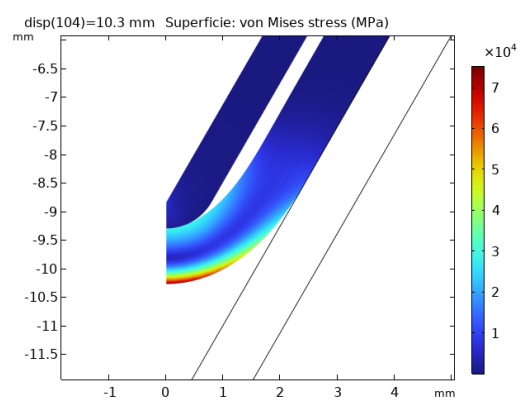
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises

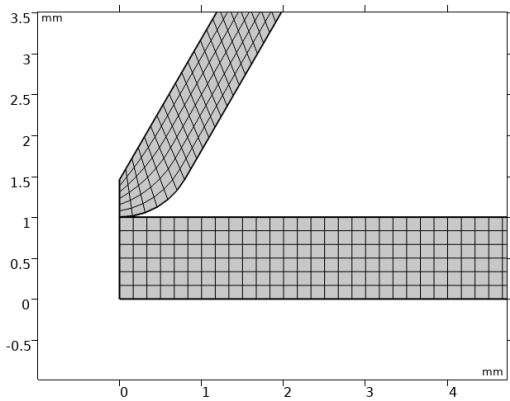


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

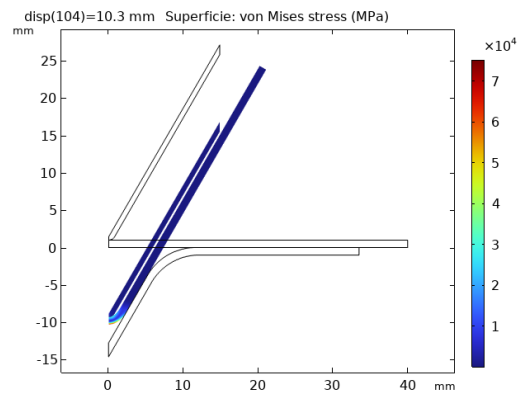


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

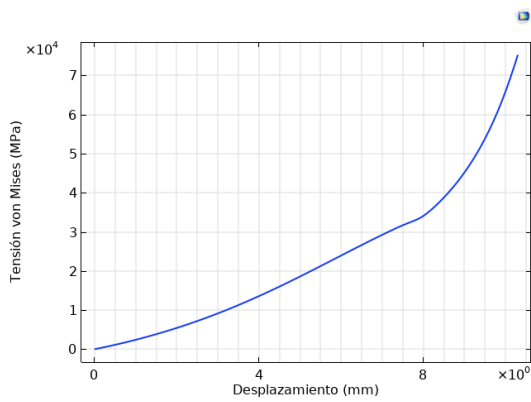
Figura A.4: Resultados de plegado a 60° con malla de 2800 elementos



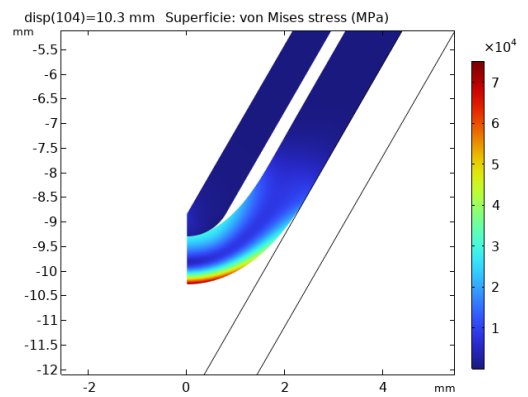
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises

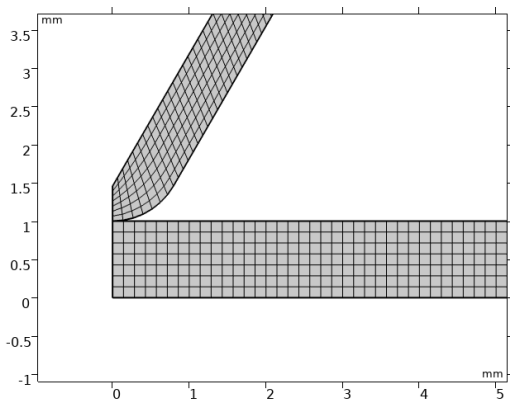


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

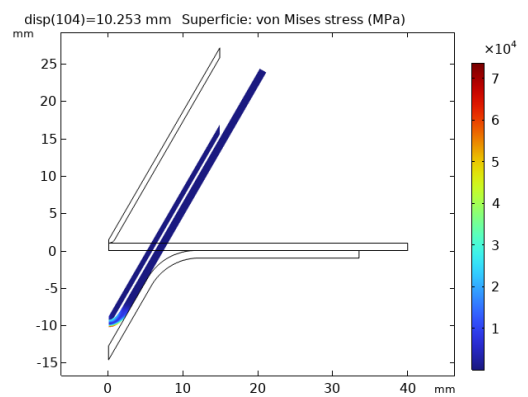


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

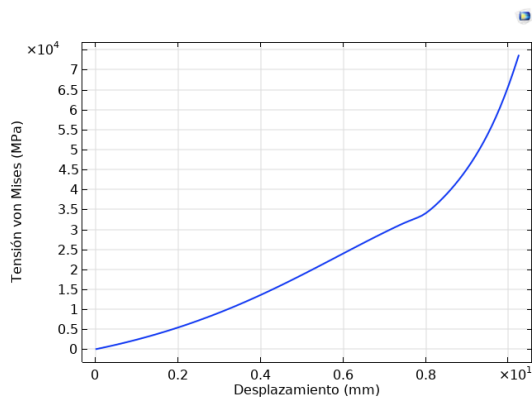
Figura A.5: Resultados de plegado a 60° con malla de 4026 elementos



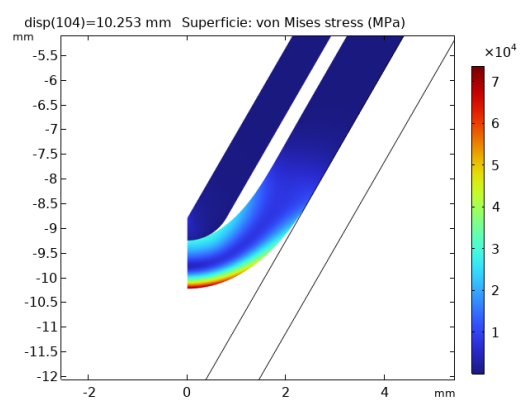
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises

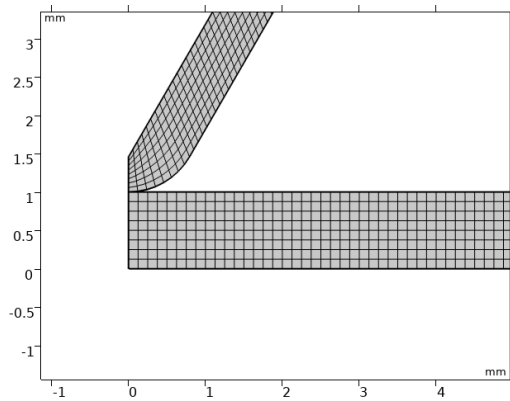


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

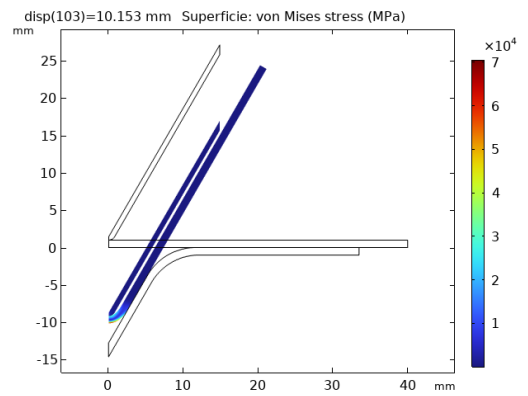


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

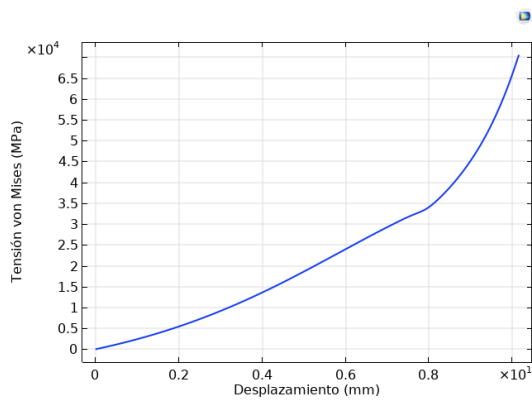
Figura A.6: Resultados de plegado a 60° con malla de 5474 elementos



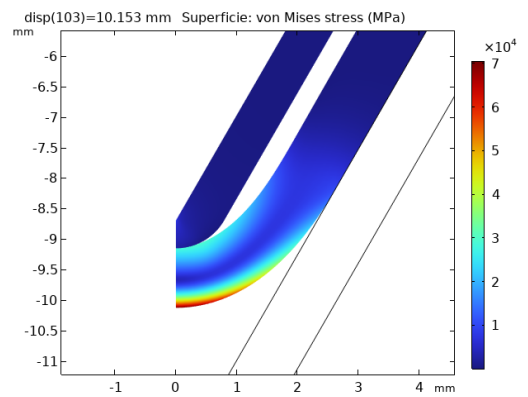
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises

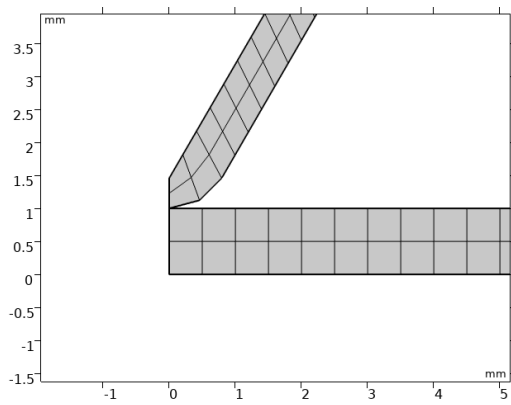


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

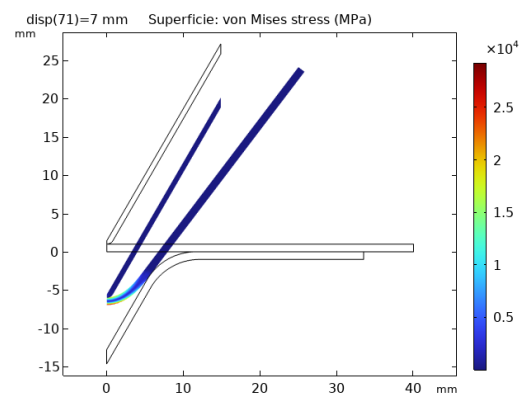


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

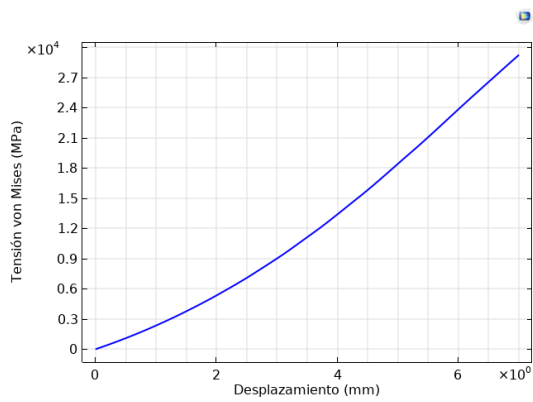
Figura A.7: Resultados de plegado a 60° con malla de 8064 elementos



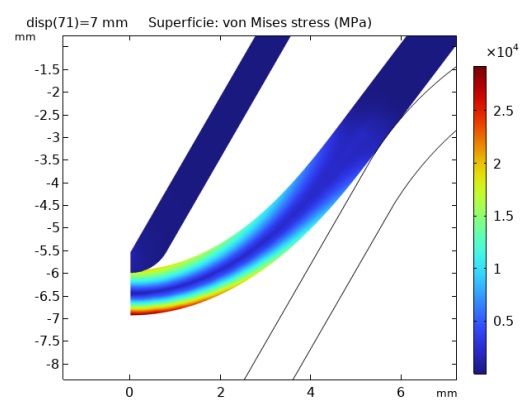
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises

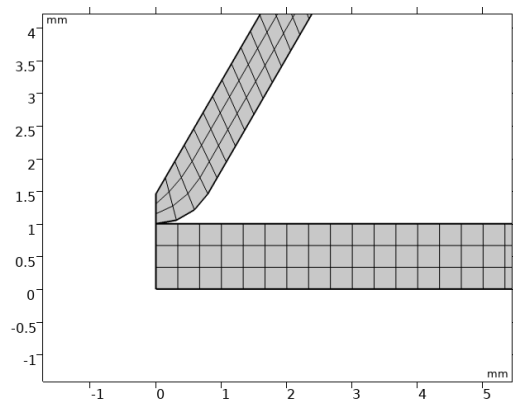


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

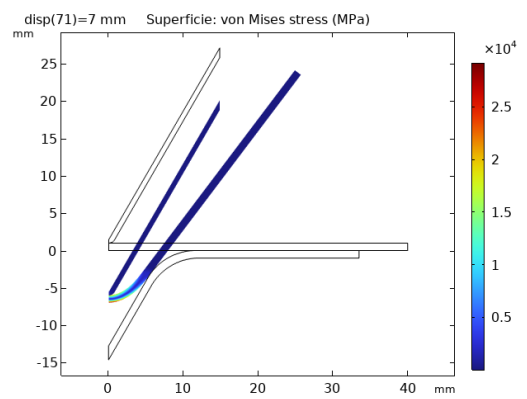


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

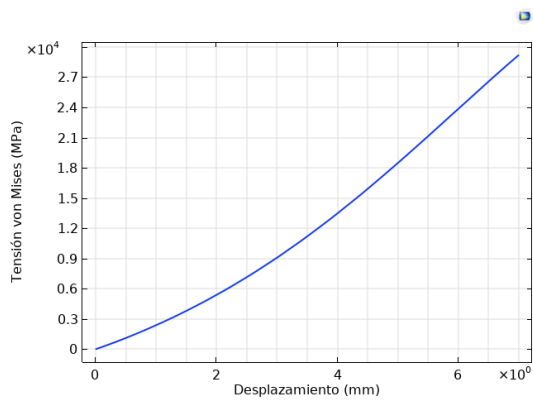
Figura A.8: Resultados de plegado a 90° con malla de 454 elementos



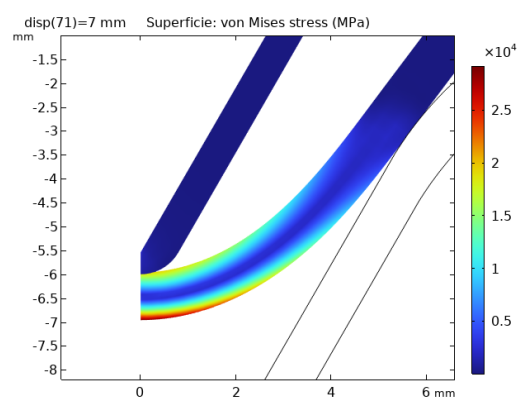
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises

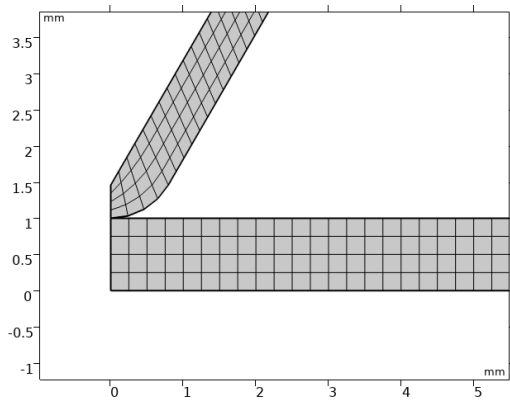


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

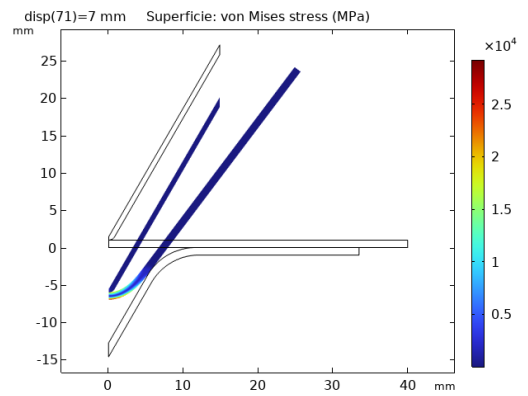


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

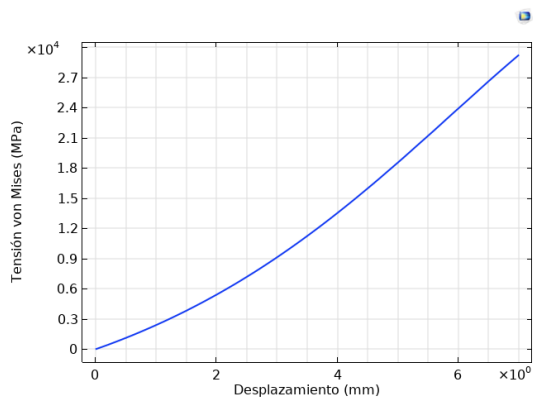
Figura A.9: Resultados de plegado a 90° con malla de 1014 elementos



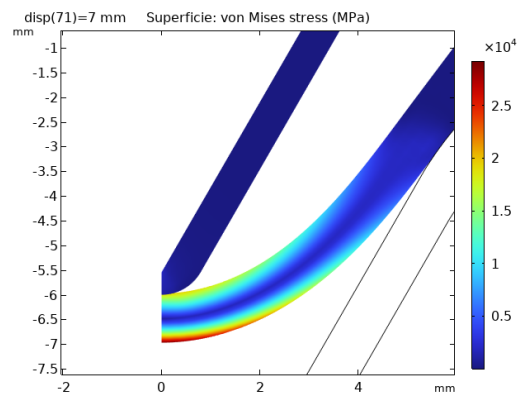
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises

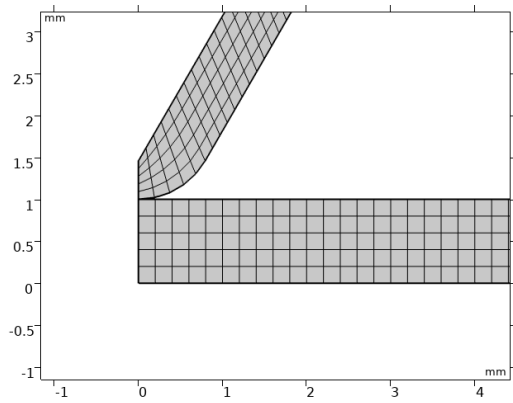


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

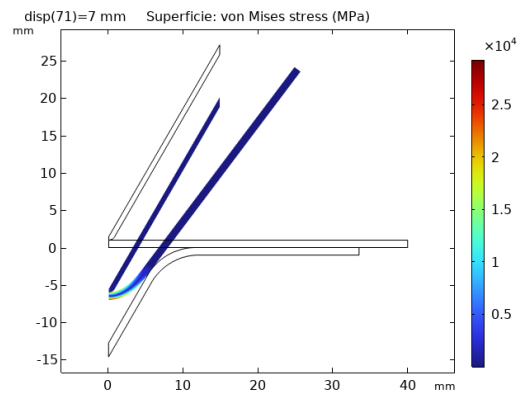


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

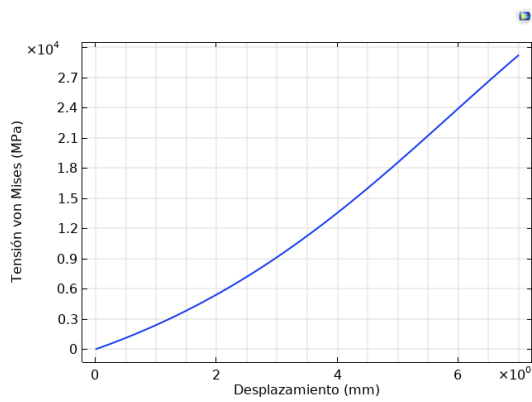
Figura A.10: Resultados de plegado a 90° con malla de 1796 elementos



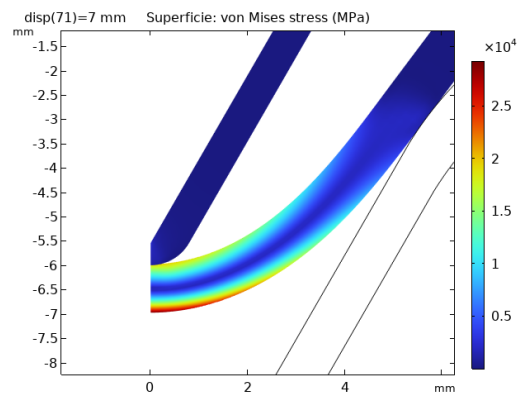
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises

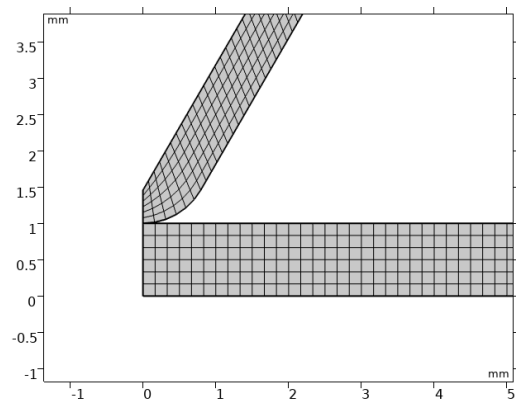


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

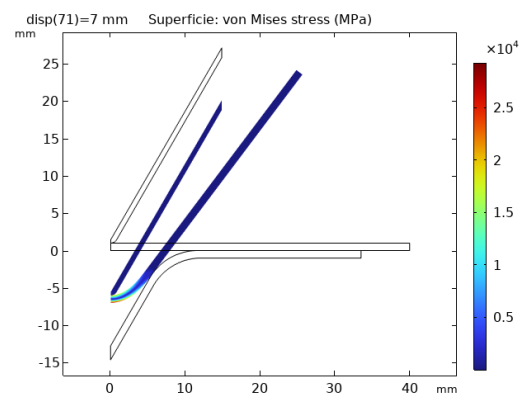


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

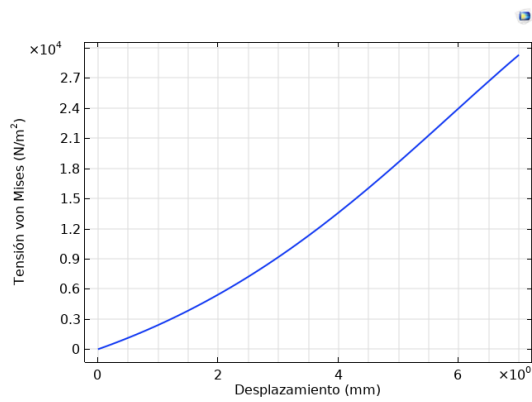
Figura A.11: Resultados de plegado a 90° con malla de 2800 elementos



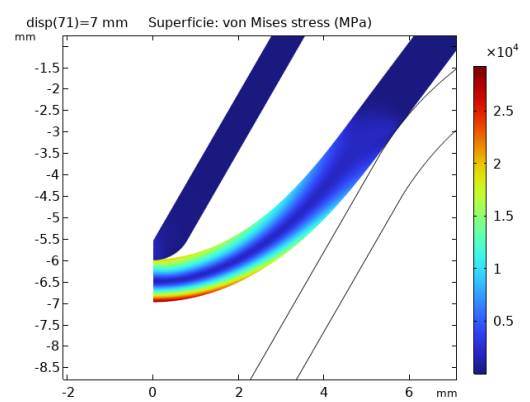
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises

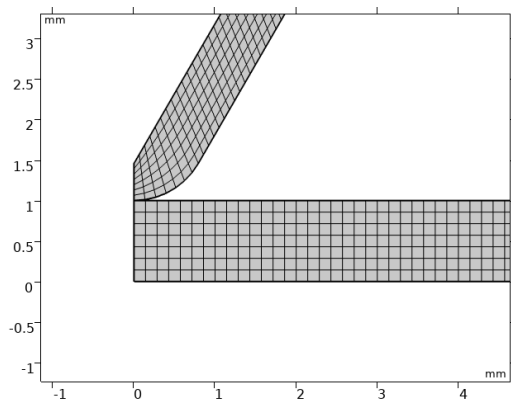


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

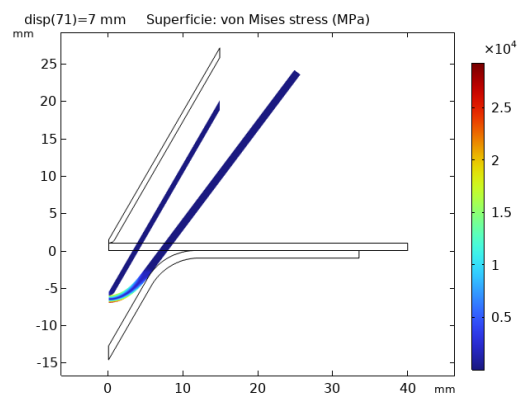


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

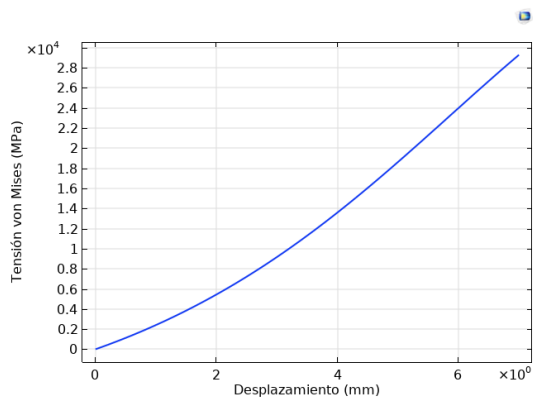
Figura A.12: Resultados de plegado a 90° con malla de 4026 elementos



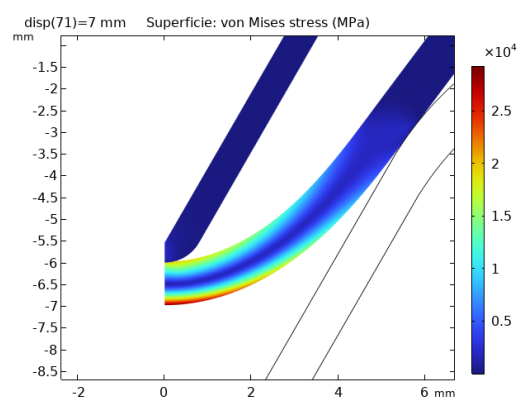
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises

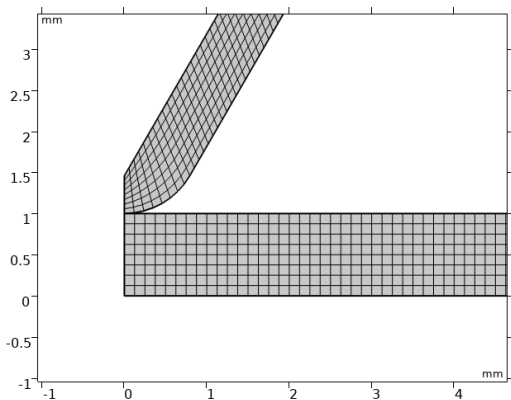


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

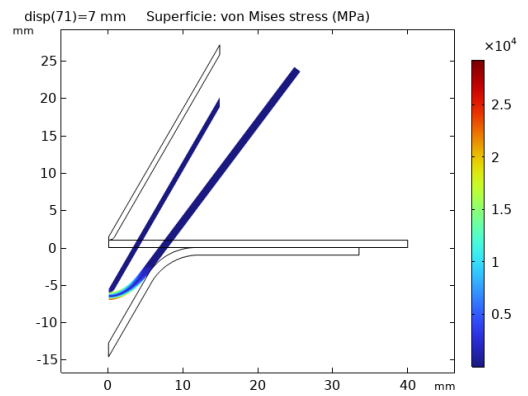


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

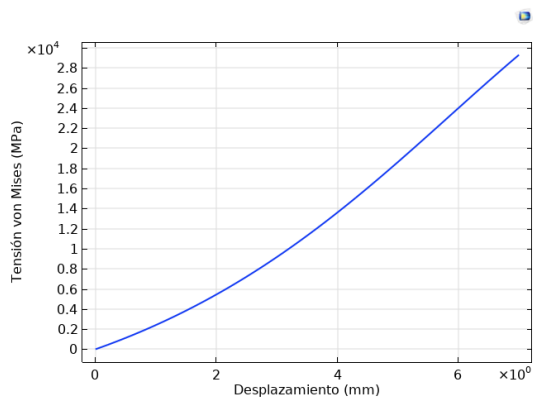
Figura A.13: Resultados de plegado a 90° con malla de 5474 elementos



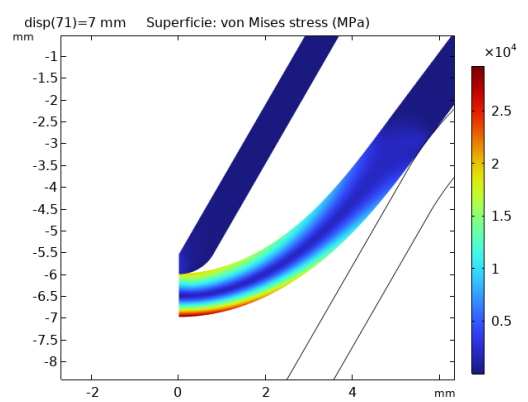
(a) Detalle de malla



(b) Distribución de tensiones de von Mises



(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

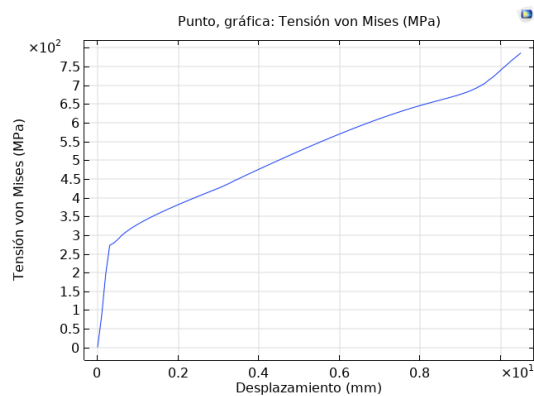


(d) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

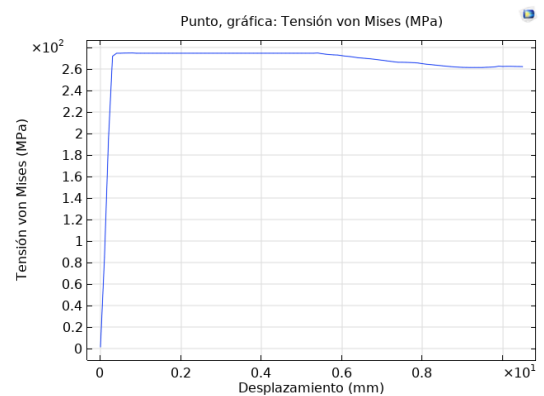
Figura A.14: Resultados de plegado a 90° con malla de 8064 elementos

B. Resultados análisis modelos de plastificación

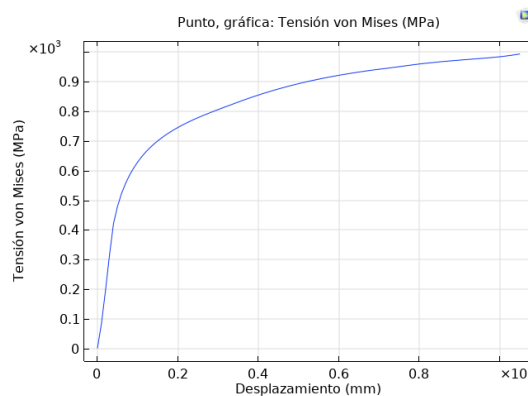
En el siguiente anexo se muestran los resultados correspondientes de los distintos modelos de plastificación estudiados. Se muestran imágenes sobre las curvas tensión-deformación obtenidas en los modelos de plastificación lineal, perfecta y Ludwik, para plegado a 60° y 90° .



(a) Plastificación lineal

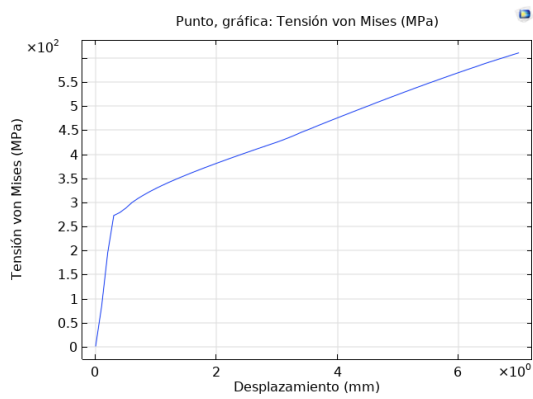


(b) Plastificación perfecta

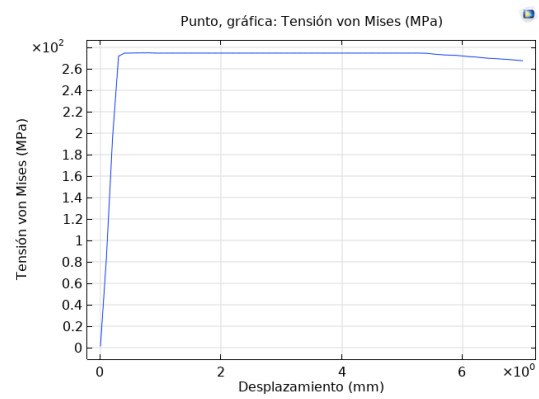


(c) Plastificación Ludwik

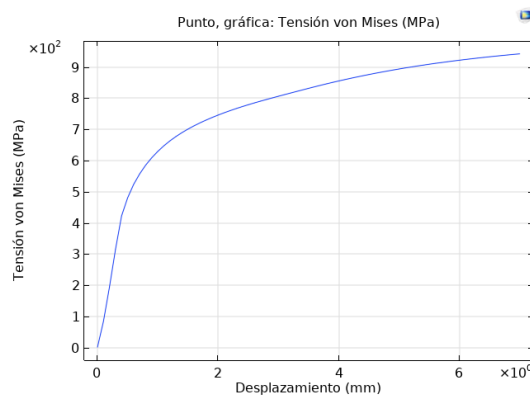
Figura B.1: Curva tensión–desplazamiento (von Mises) para distintos modelos de plastificación para plegado a 60°



(a) Plastificación lineal



(b) Plastificación perfecta



(c) Plastificación Ludwik

Figura B.2: Curva tensión–desplazamiento (von Mises) para distintos modelos de plastificación para plegado a 90°

C. Resultados análisis modelos de contacto

En el siguiente anexo se muestran los resultados obtenidos en el análisis de los modelos de contacto estudiados. Se muestran imágenes sobre el estudio de multiplicadores de Lagrange y del estudio de factor de penalización, se observan las distribuciones de tensiones máximas y las curvas tensión.desplazamiento obtenidas.

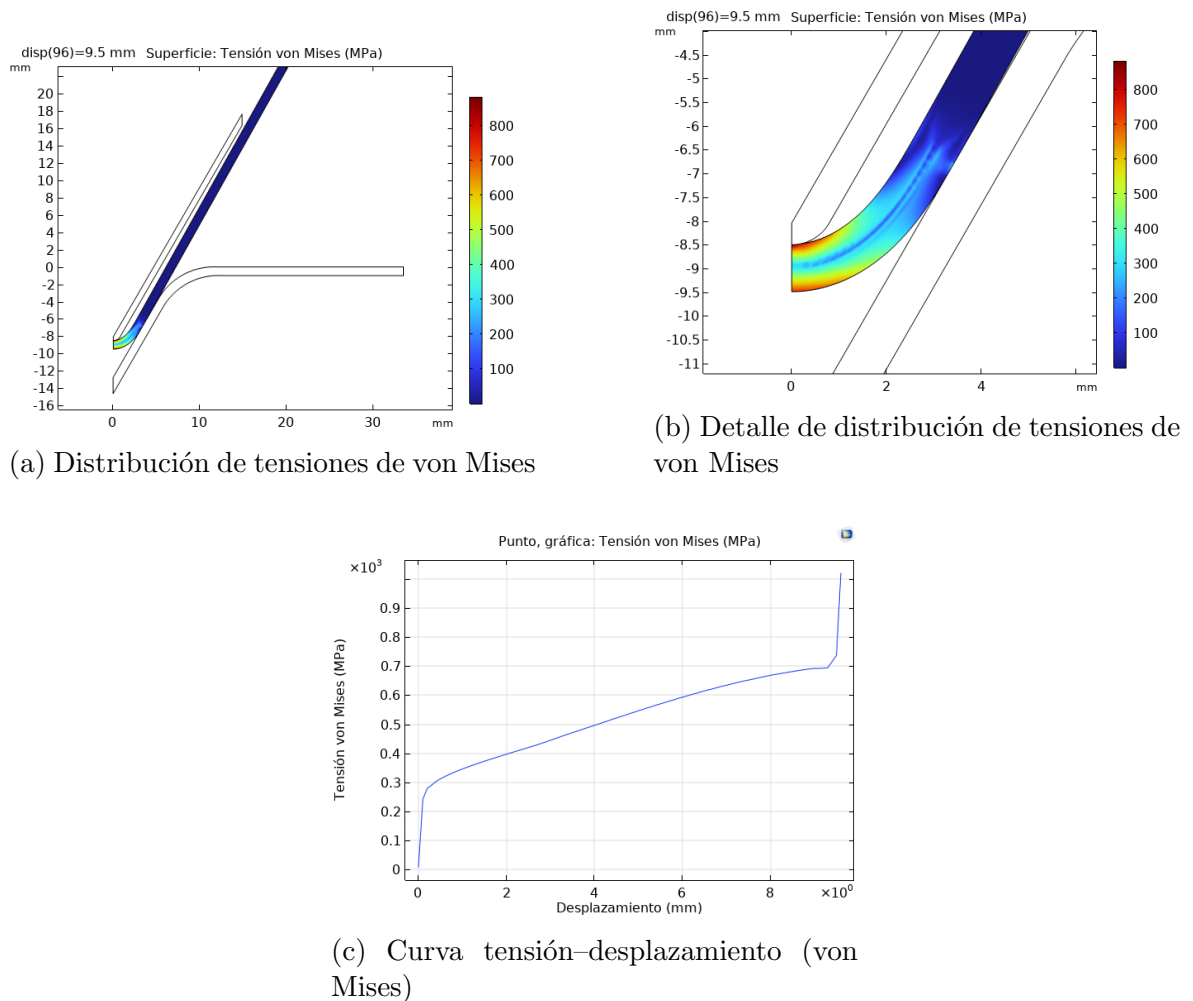
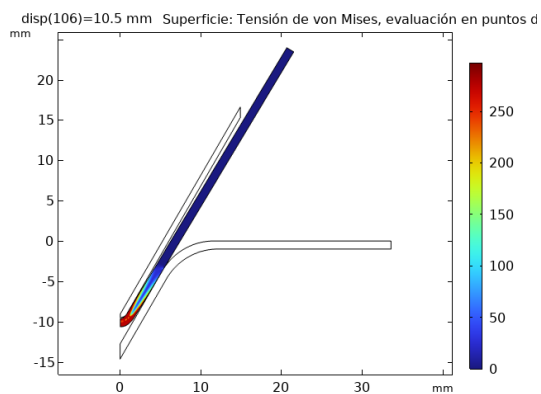
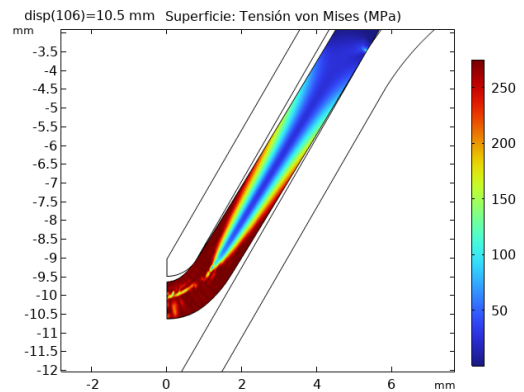


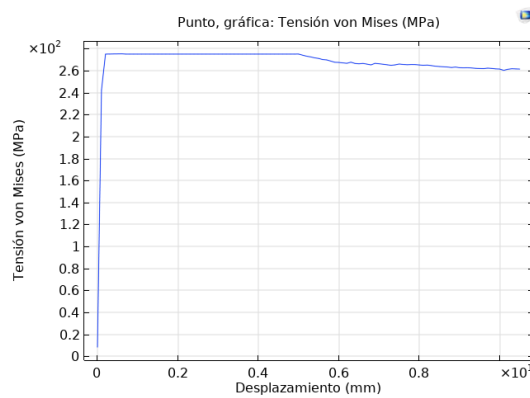
Figura C.1: Resultados de plegado a 60° mediante método de multiplicadores de Lagrange en modelo de plastificación lineal



(a) Distribución de tensiones de von Mises

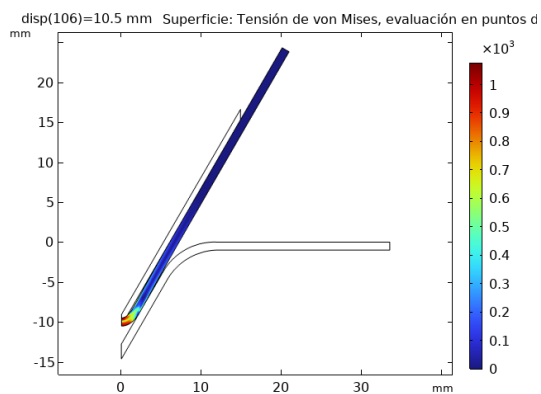


(b) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

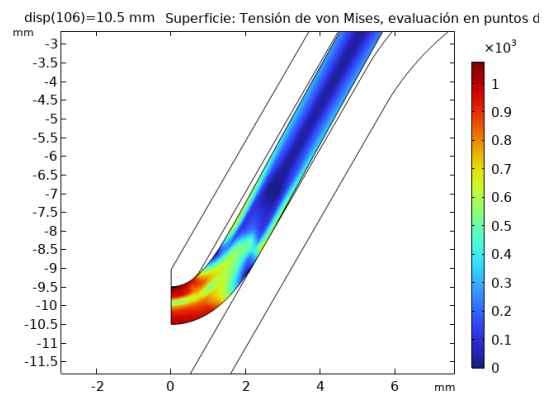


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

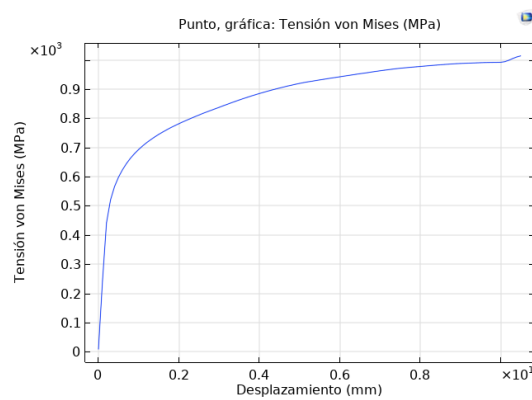
Figura C.2: Resultados de plegado a 60° mediante método de multiplicadores de Lagrange en modelo de plastificación perfecta



(a) Distribución de tensiones de von Mises

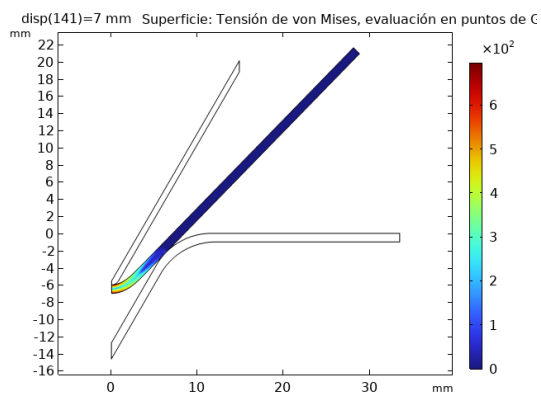


(b) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

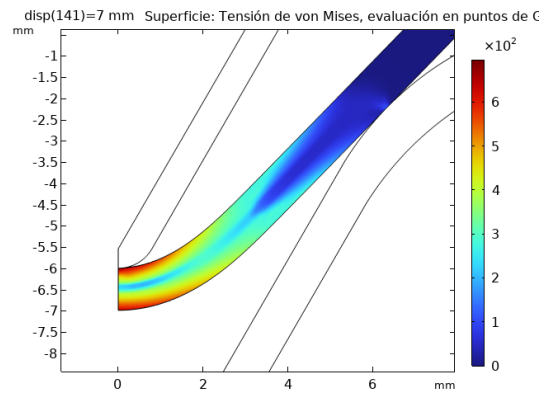


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

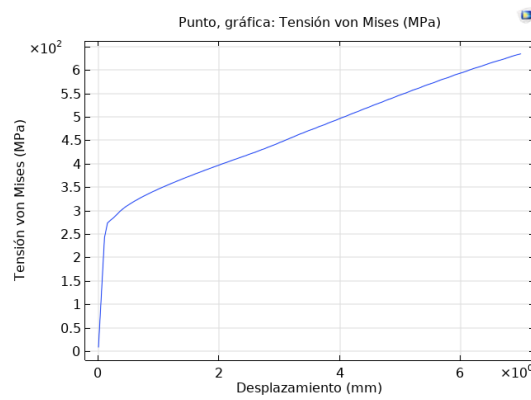
Figura C.3: Resultados de plegado a 60° mediante método de multiplicadores de Lagrange en modelo de plastificación Ludwik



(a) Distribución de tensiones de von Mises

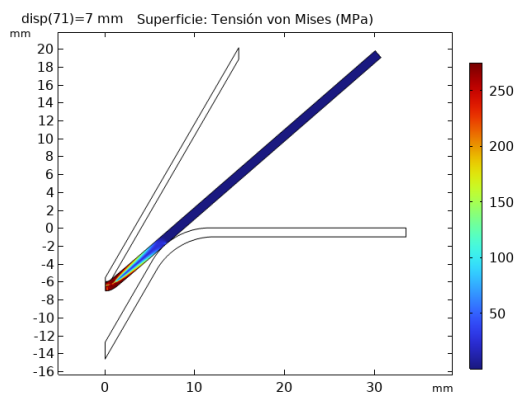


(b) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

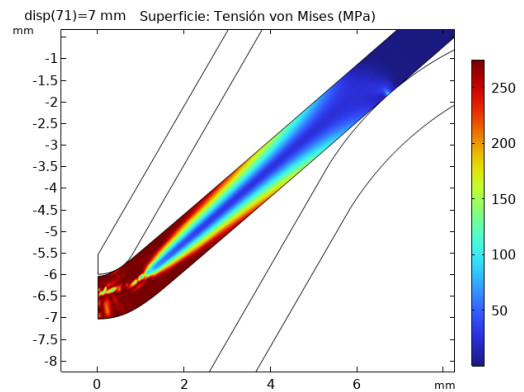


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

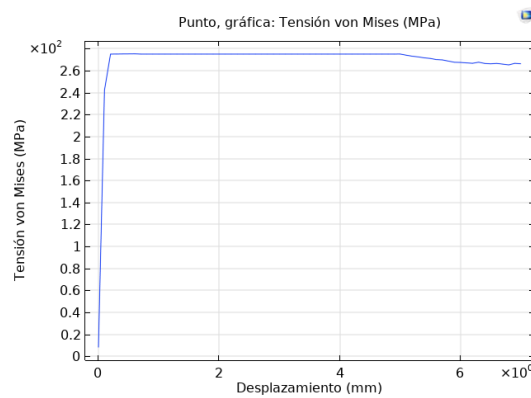
Figura C.4: Resultados de plegado a 90° mediante método de multiplicadores de Lagrange en modelo de plastificación lineal



(a) Distribución de tensiones de von Mises

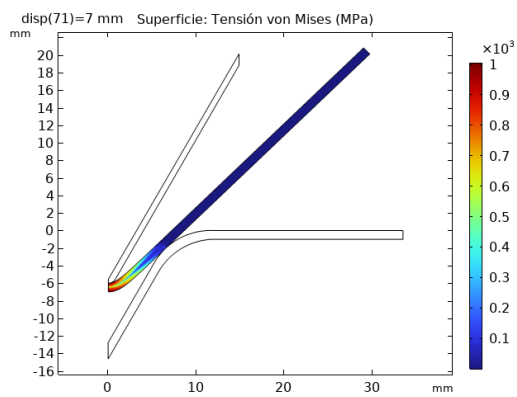


(b) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

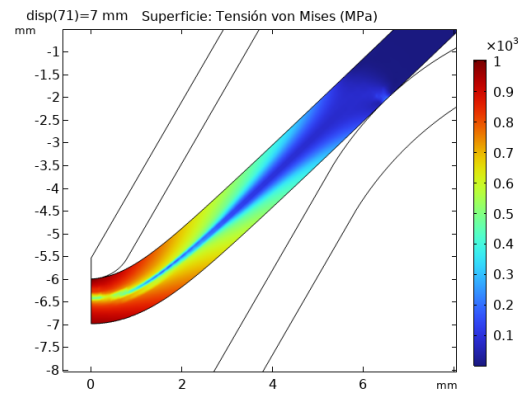


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

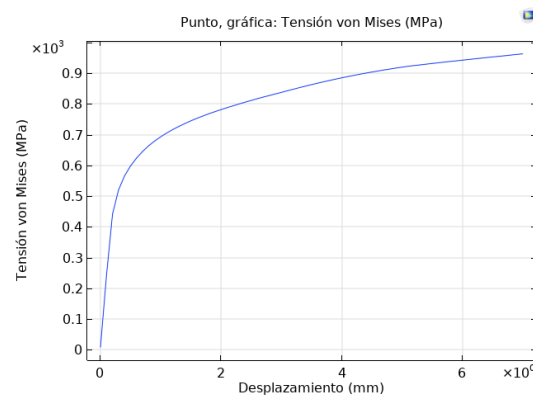
Figura C.5: Resultados de plegado a 90° mediante método de multiplicadores de Lagrange en modelo de plastificación perfecta



(a) Distribución de tensiones de von Mises

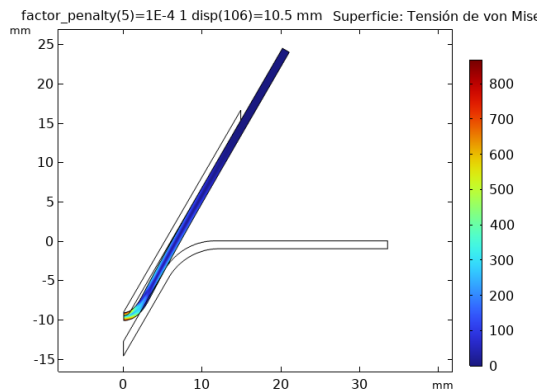


(b) Detalle de distribución de tensiones de von Mises

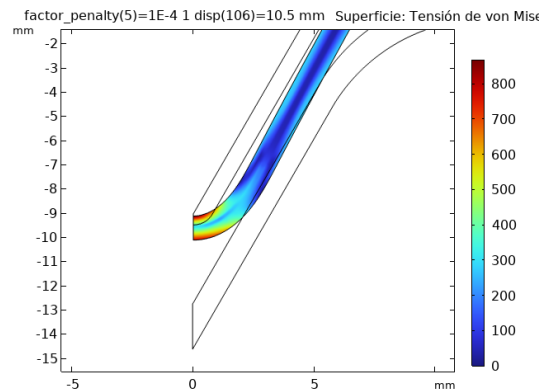


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

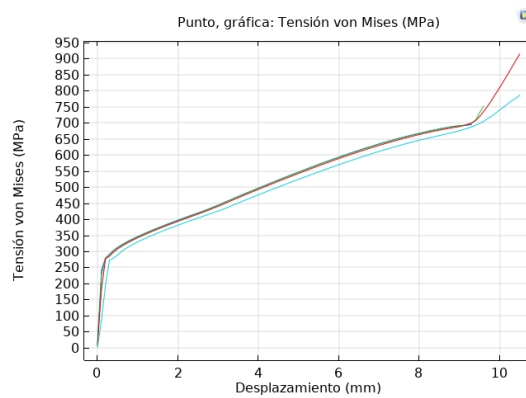
Figura C.6: Resultados de plegado a 90° mediante método de multiplicadores de Lagrange en modelo de plastificación Ludwik



(a) Distribución de tensiones de von Mises con factor 0,0001

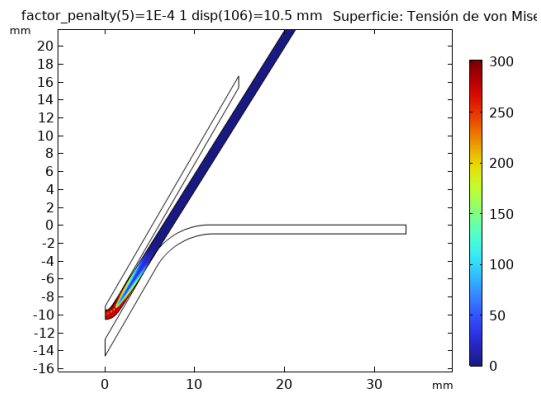


(b) Detalle de distribución de tensiones de von Mises con factor 0,0001

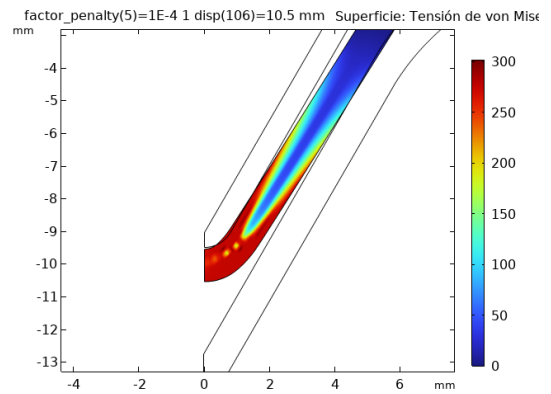


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

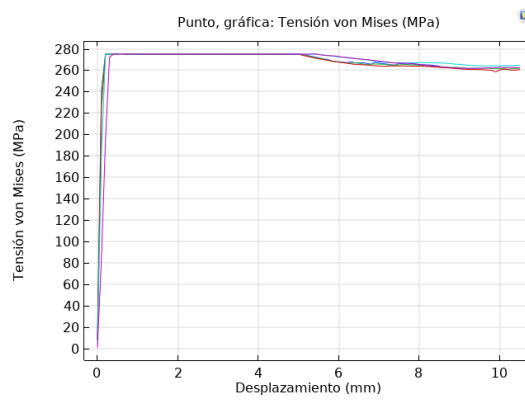
Figura C.7: Resultados de plegado a 60° mediante método de factor de penalización en modelo de plastificación lineal



(a) Distribución de tensiones de von Mises con factor 0,0001

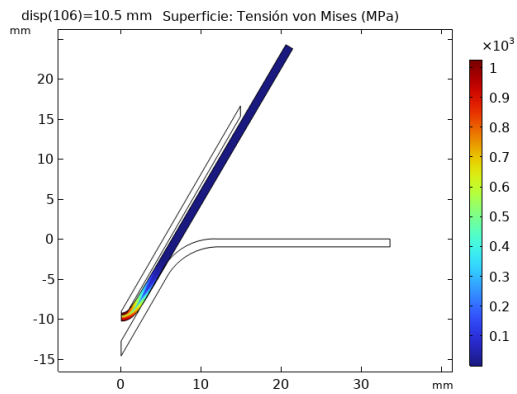


(b) Detalle de distribución de tensiones de von Mises con factor 0,0001

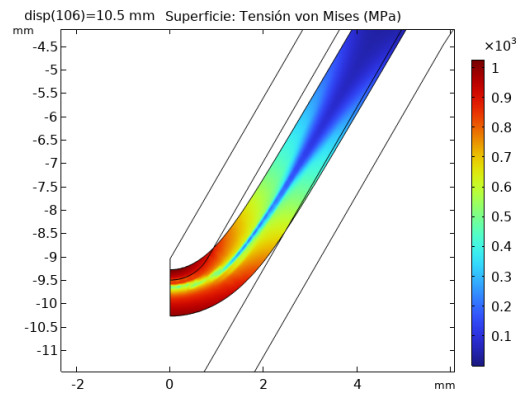


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

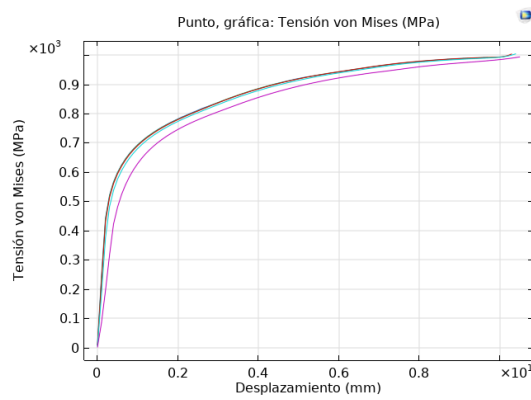
Figura C.8: Resultados de plegado a 60° mediante método de factor de penalización en modelo de plastificación perfecta



(a) Distribución de tensiones de von Mises con factor 0,0001

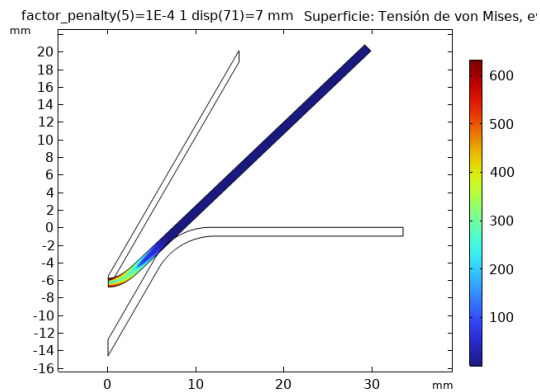


(b) Detalle de distribución de tensiones de von Mises con factor 0,0001

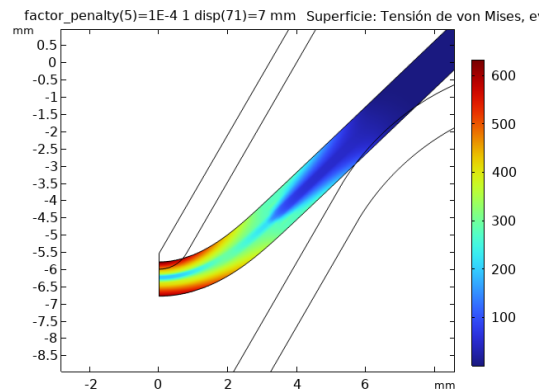


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

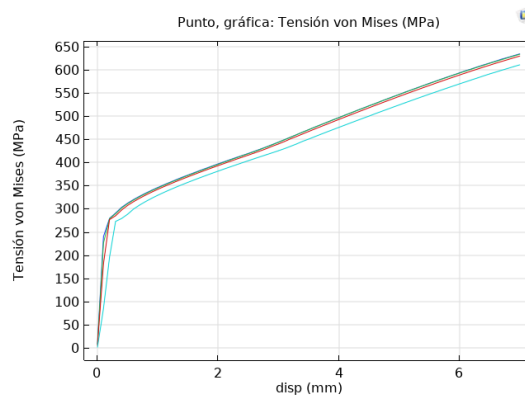
Figura C.9: Resultados de plegado a 60° mediante método de factor de penalización en modelo de plastificación Ludwik



(a) Distribución de tensiones de von Mises con factor 0,0001

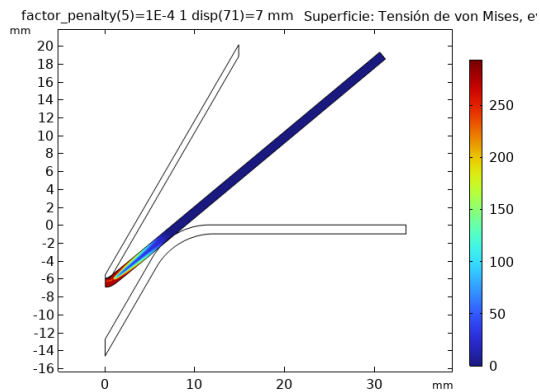


(b) Detalle de distribución de tensiones de von Mises con factor 0,0001

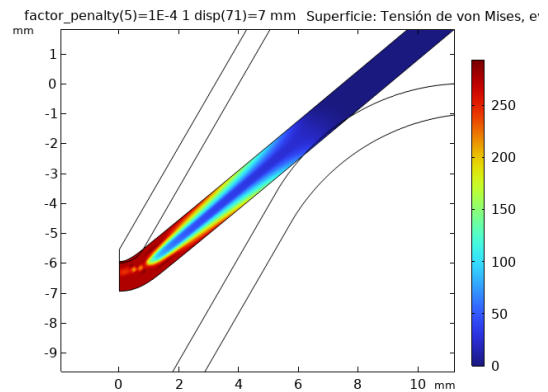


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

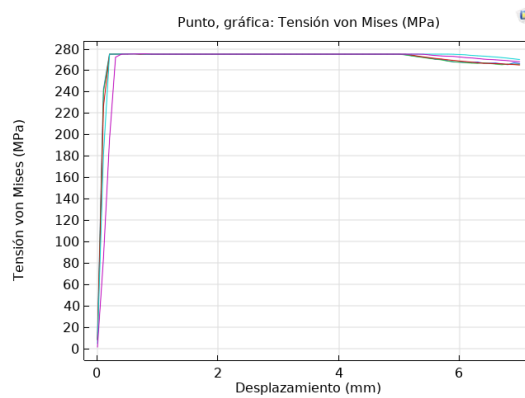
Figura C.10: Resultados de plegado a 90° mediante método de factor de penalización en modelo de plastificación lineal



(a) Distribución de tensiones de von Mises con factor 0,0001

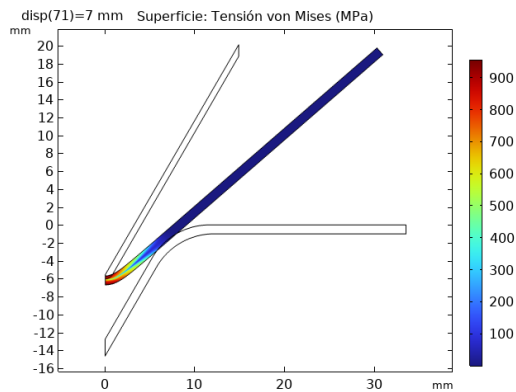


(b) Detalle de distribución de tensiones de von Mises con factor 0,0001

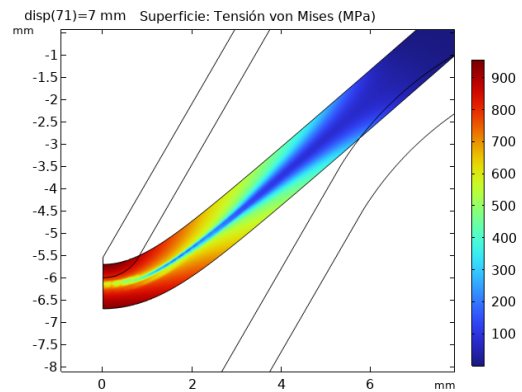


(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

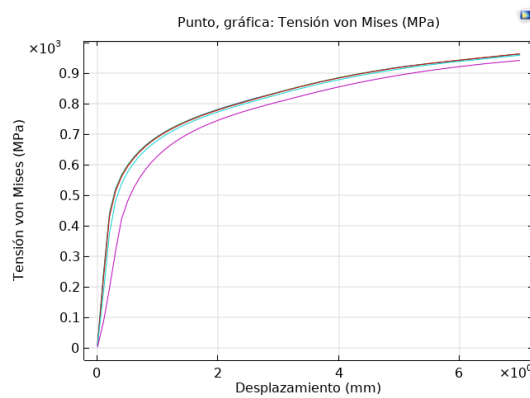
Figura C.11: Resultados de plegado a 90° mediante método de factor de penalización en modelo de plastificación perfecta



(a) Distribución de tensiones de von Mises con factor 0,0001



(b) Detalle de distribución de tensiones de von Mises con factor 0,0001



(c) Curva tensión–desplazamiento (von Mises)

Figura C.12: Resultados de plegado a 90° mediante método de factor de penalización en modelo de plastificación Ludwik

D. Resultados análisis dinámico de modelo lámina (*Shell*)

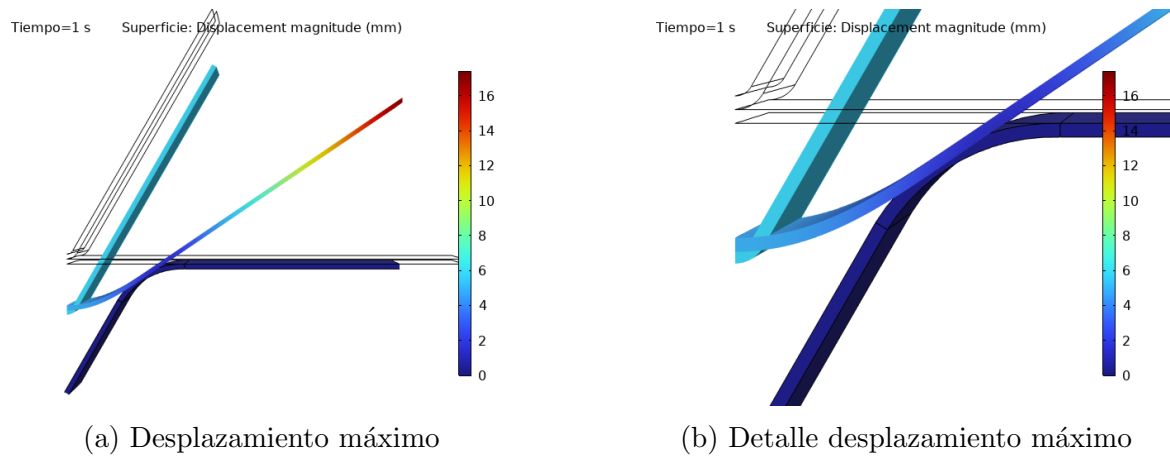


Figura D.1: Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,002.

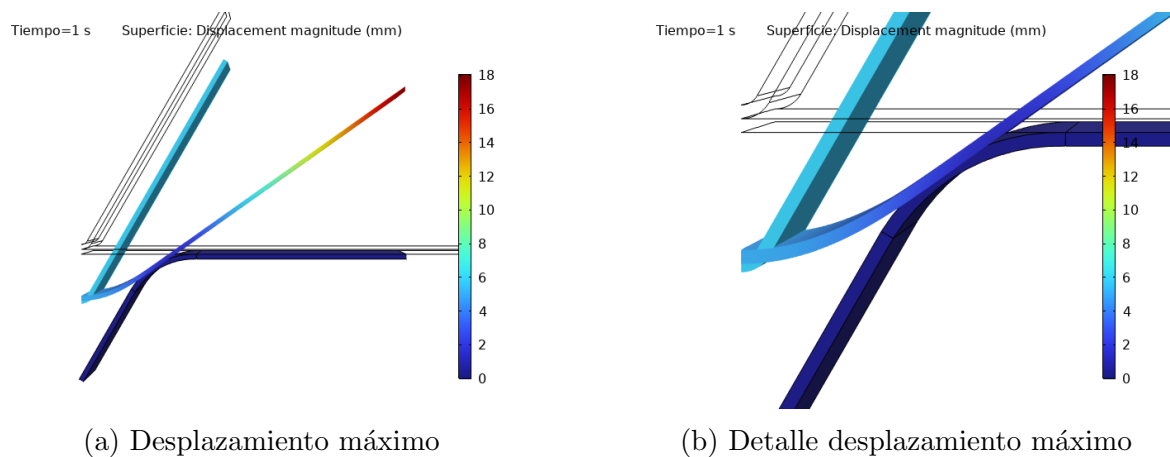
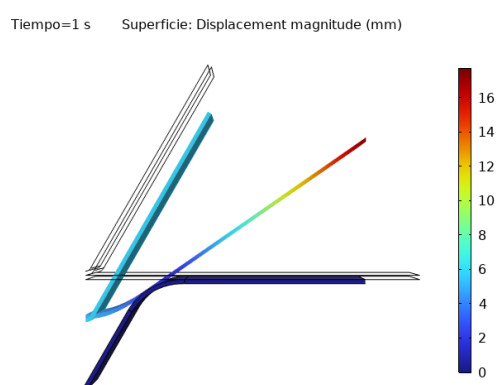
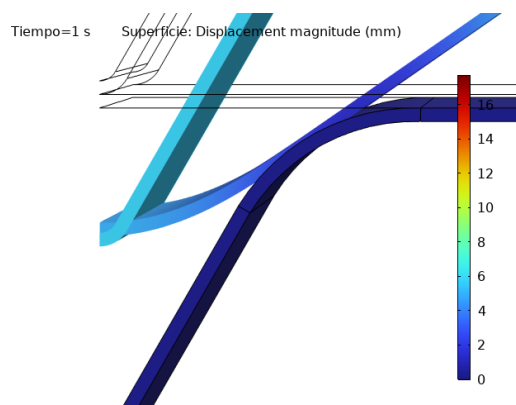


Figura D.2: Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,001.

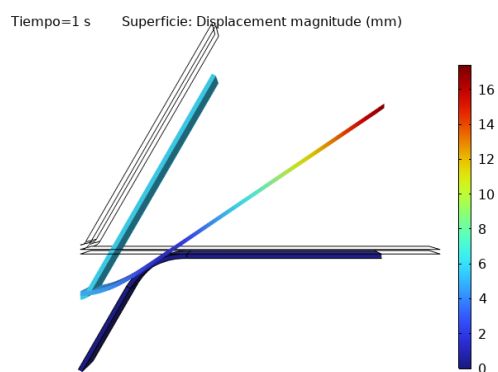


(a) Desplazamiento máximo

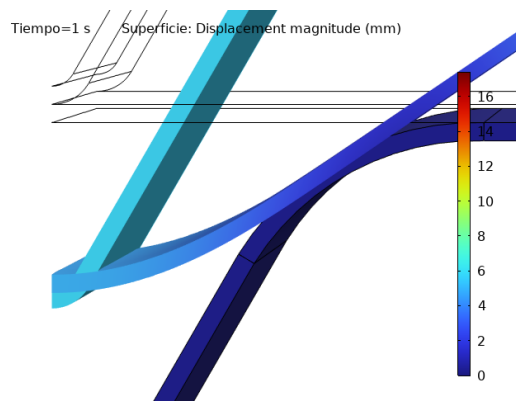


(b) Detalle desplazamiento máximo

Figura D.3: Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,0009.

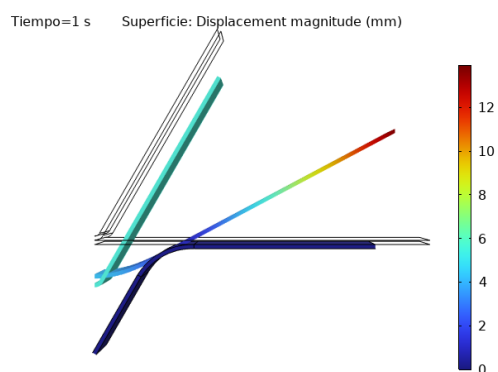


(a) Desplazamiento máximo

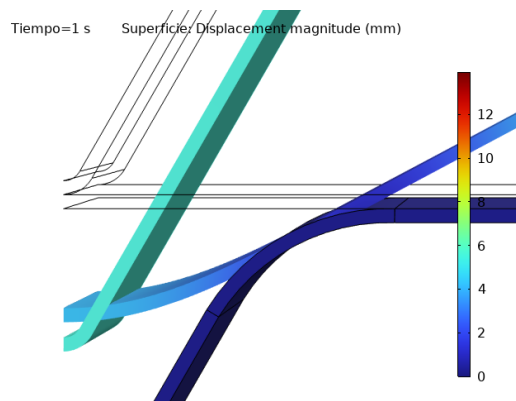


(b) Detalle desplazamiento máximo

Figura D.4: Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,0008.

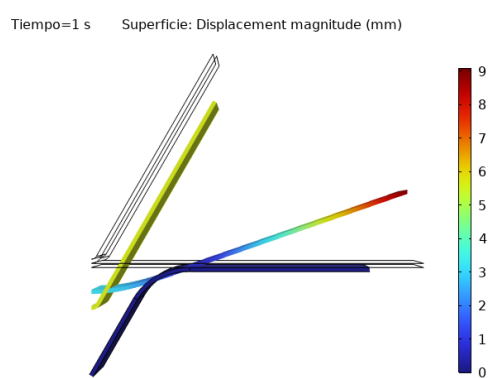


(a) Desplazamiento máximo

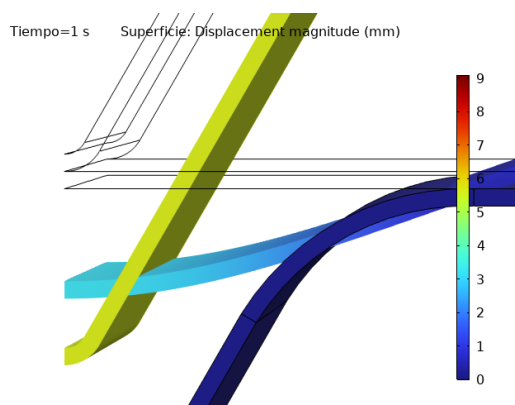


(b) Detalle desplazamiento máximo

Figura D.5: Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,0003.

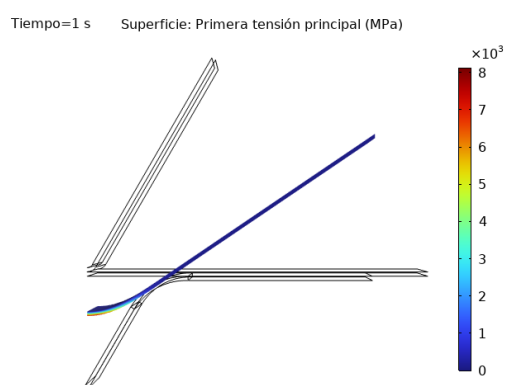


(a) Desplazamiento máximo

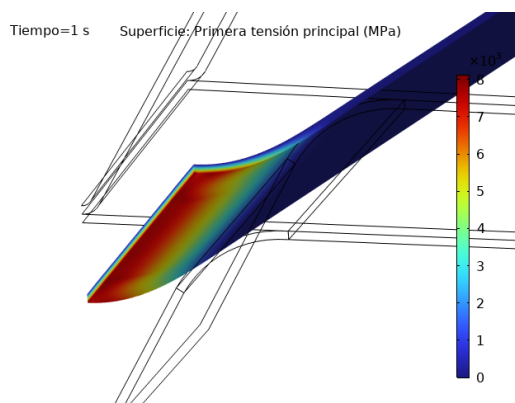


(b) Detalle desplazamiento máximo

Figura D.6: Desplazamiento máximo alcanzado para plegado a 90° con factor de penalización 0,0001.

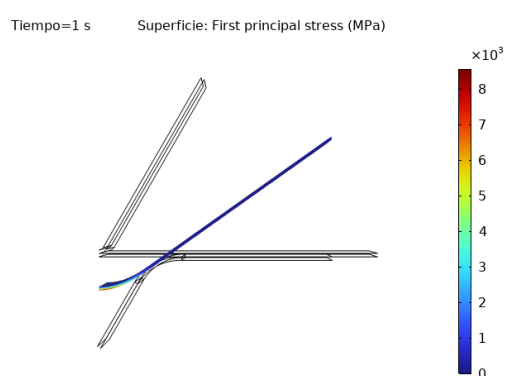


(a) Tensión von Mises máxima

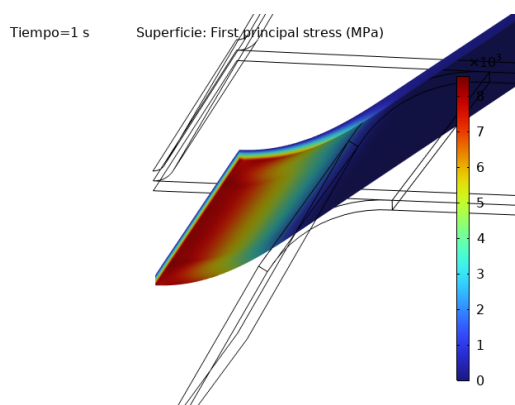


(b) Detalle tensión von Mises máxima

Figura D.7: Tensión von Mises máxima para plegado a 90° con factor de penalización 0,002.

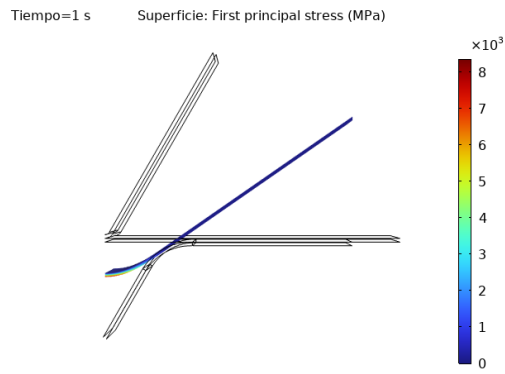


(a) Tensión von Mises máxima

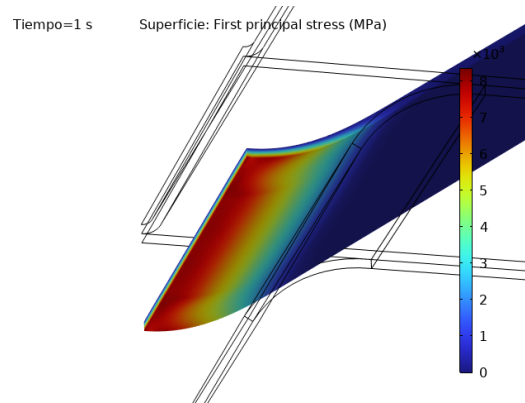


(b) Detalle tensión von Mises máxima

Figura D.8: Tensión von Mises máxima para plegado a 90° con factor de penalización 0,001.

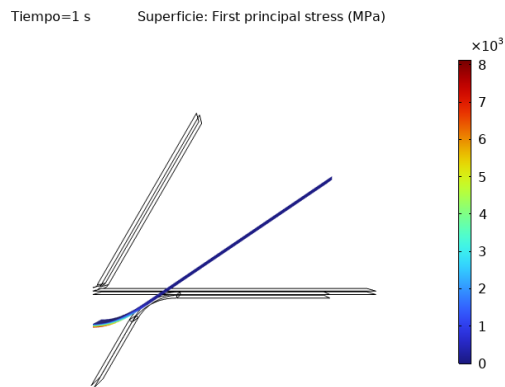


(a) Tensión von Mises máxima

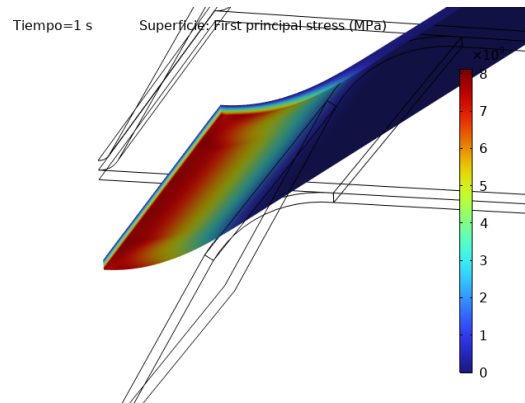


(b) Detalle tensión von Mises máxima

Figura D.9: Tensión von Mises máxima para plegado a 90° con factor de penalización 0,0009.

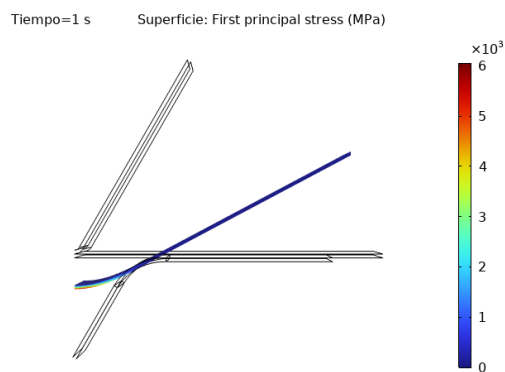


(a) Tensión von Mises máxima

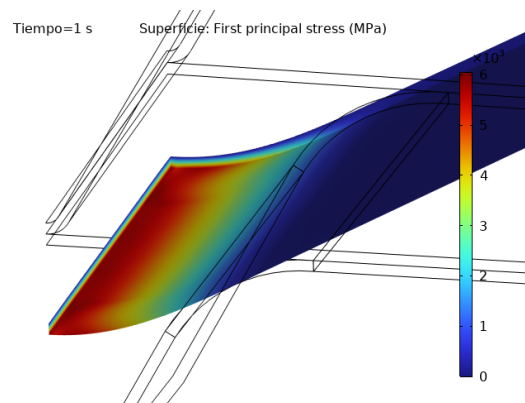


(b) Detalle tensión von Mises máxima

Figura D.10: Tensión von Mises máxima para plegado a 90° con factor de penalización 0,0008.

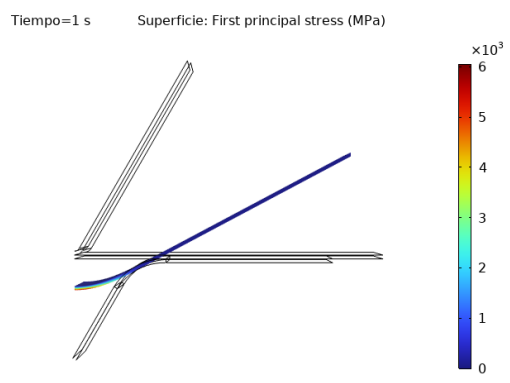


(a) Tensión von Mises máxima

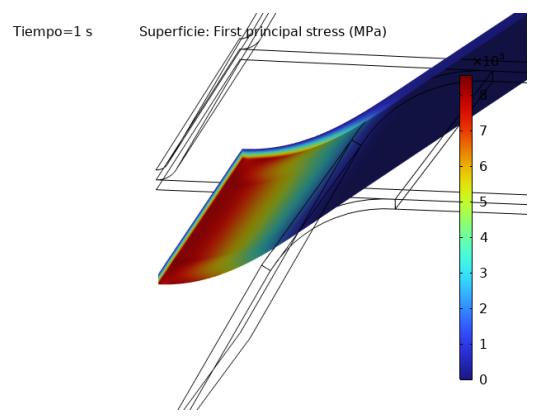


(b) Detalle tensión von Mises máxima

Figura D.11: Tensión von Mises máxima para plegado a 90° con factor de penalización 0,0003.



(a) Tensión von Mises máxima



(b) Detalle tensión von Mises máxima

Figura D.12: Tensión von Mises máxima para plegado a 90° con factor de penalización 0,0001.