



UNIVERSIDAD NACIONAL  
DE MAR DEL PLATA

# **Estudio de la recuperación elástica (*springback*) en el ensayo de plegado de aceros utilizados en la industria automotriz**

**Autor: Agustín Pablo Ballarre**

Director:

Dr. Adrián P. Cisilino

Codirector:

Ing. Juan P. Pedraza

Universidad Nacional de Mar del Plata

Facultad de Ingeniería, Departamento de Materiales

Mar del Plata, Argentina

Año 2015



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-  
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

## Agradecimientos

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata. A sus docentes y al personal no docente por su permanente colaboración.

Al director de este Proyecto Final, Adrián Cisilino por su orientación y constante apoyo.

A mis jefes y compañeros en los distintos sectores de Ternium donde me tocó trabajar, por su buena predisposición para ayudarme en mi carrera universitaria.

A mi familia, a mis amigos y a todos aquellos que de alguna manera me ayudaron a realizar este trabajo.

## Resumen

El sector de Calidad de Producto de Ternium Siderar centraliza todo lo referido al desarrollo/homologación de productos y especificaciones técnicas, recibiendo las propuestas y comentarios de sus clientes para evolucionar conjuntamente con el mercado. Es a partir de inquietudes de diferentes terminales automotrices y estampadoras que se plantea la necesidad de analizar el fenómeno de *springback* en chapa laminada en frío, barriendo un amplio intervalo de calidades y espesores, con el propósito de conocer y predecir de manera segura la recuperación elástica en el plegado de los principales materiales producidos para la industria automotriz.

Además de una caracterización de la gama de productos más comunes en el mercado de acero para automóviles, se presenta la oportunidad de generar herramientas fundamentales para el estudio de la recuperación elástica. Se constata que, tanto en proveedores de acero como en estampadoras y terminales automotrices, no se cuenta con ensayos de aplicación práctica para medir el fenómeno, y tampoco se conocen comúnmente los métodos teóricos para estimarlo.

En el presente trabajo se realiza la construcción de un aparato apto para medición en Planta de la recuperación elástica de chapas luego del plegado al aire de 180°. Además se plantean soluciones teóricas y de simulación numérica para predecir el comportamiento de materiales alto resistenciales y embutibles.

Los valores obtenidos mediante simulación numérica ajustaron mejor a los valores experimentales que las ecuaciones teóricas. A su vez, las ecuaciones teóricas que tienen en cuenta la ley de la potencia, también ajustaron de manera satisfactoria los valores experimentales para relaciones altas de tensión de fluencia / espesor.

Los resultados obtenidos con una ecuación que modela el fenómeno de *springback* considerando un material con endurecimiento según la Ley de la potencia para todo el rango de deformaciones, tienen la precisión suficiente para predecir de manera correcta el fenómeno de recuperación elástica en el ensayo de plegado de 180° de chapas metálicas. Considerando la estructura simple y la facilidad de obtención de los datos de entrada para dicha ecuación, se puede tomar este modelo teórico como la herramienta más sencilla, económica y directa para la predicción del fenómeno de *springback*. La simulación numérica es una herramienta más completa y versátil, de la cual pueden obtenerse más datos, en comparación a las ecuaciones teóricas. Pero para este análisis en particular, su uso (que implica el ingreso de gran cantidad de información como datos de entrada y altos tiempos de procesamiento) puede ser justificable cuando se requiere un análisis más profundo o de desarrollo de materiales.

## Contenido

<b>1. Motivación y Objetivos .....</b>	<b>6</b>
1.1 Introducción.....	6
1.2 Motivación .....	7
1.3 Objetivos .....	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos específicos.....	8
1.4 Organización del trabajo.....	9
<b>2. Ensayo de <i>springback</i> .....</b>	<b>10</b>
2.1 Introducción.....	10
2.2 Fundamentos del ensayo .....	10
2.3 Análisis de normas.....	13
2.4 Equipo y ensayo: <i>Springback</i> por plegado 180° .....	15
2.4.1 Descripción del equipo.....	15
2.4.2 Probetas .....	16
2.4.3 Descripción del ensayo.....	17
2.5 Conclusiones.....	20
<b>3. Análisis teórico del <i>springback</i>.....</b>	<b>21</b>
3.1 Introducción.....	21
3.2 Flexión pura y <i>springback</i> de vigas rectas .....	21
3.2.1 Formulación general .....	21
3.2.2 Sección rectangular .....	27
3.3 Chapas.....	29
3.3.1 Endurecimiento por deformación con ley de la potencia .....	30
3.4 Conclusiones.....	33
<b>4. Selección y caracterización de los materiales .....</b>	<b>35</b>
4.1 Descripción de los materiales.....	35
4.2 Composición química .....	35
4.2.1 Resultados.....	36
4.3 Propiedades mecánicas .....	36
4.3.1 Ensayo de tracción .....	37
4.3.2 Equipo .....	39
4.3.3 Resultados.....	39
4.4 Análisis de microestructura .....	41
4.4.1 Resultados.....	41
4.5 Ensayo de <i>springback</i> .....	44
4.6 Cálculos teóricos de <i>springback</i> .....	45
4.7 Discusión del capítulo .....	46
4.8 Conclusiones.....	50
<b>5. Implementación del modelo de elementos finitos .....</b>	<b>51</b>
5.1 Introducción.....	51
5.2 Abaqus. Discusión del problema .....	51
5.3 Problema Explícito .....	52
5.4 Modelo .....	53

---

5.4.1	Unidades .....	55
5.4.2	Chapa.....	55
5.4.3	Otras partes del modelo.....	62
5.4.4	Ensamblado de partes.....	64
5.4.5	Definición de las entidades de contacto.....	64
5.4.6	Condiciones de contorno (fijaciones) .....	67
5.4.7	Secuencia de la simulación: steps.....	68
5.4.8	Post-procesador .....	69
5.4.9	Calibración y verificación del modelo.....	71
5.5	Conclusiones.....	75
<b>6.</b>	<b>Simulación y análisis de resultados .....</b>	<b>76</b>
6.1	Introducción.....	76
6.2	Medición de ángulos de springback en el modelo .....	76
6.3	Discretización, costo computacional y convergencia del modelo.....	79
6.4	Comparación entre ajuste teórico y de simulación a los datos experimentales.....	82
6.5	Análisis de tensiones y deformaciones.....	83
6.6	Conclusiones.....	88
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros.....</b>	<b>89</b>
7.1	Conclusiones.....	89
7.2	Recomendaciones y trabajos futuros.....	91
<b>8.</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>93</b>
<b>9.</b>	<b>Trabajos citados.....</b>	<b>95</b>

# 1. Motivación y Objetivos

## 1.1 Introducción

El avance de la industria en los últimos años ha sido posible debido a la automatización de los procesos industriales. Dicho avance se produjo gracias a una serie de factores entre los que se encuentran:

- Las nuevas tecnologías en el campo mecánico.
- La introducción de las computadoras.
- La evolución de los sistemas de control y regulación.

Estos elementos llevan consigo un gran esfuerzo en su desarrollo acompañado de una reducción de costos, aumento en la producción y mejora del producto.

Las necesidades del mercado han ido exigiendo a los productos entre otras características:

- **mayor variedad de modelos**, pasando de grandes series a medias y pequeñas series.
- **vida del producto corta**, que exige cambios continuos en el sistema de fabricación.
- **reducción de los plazos de entrega**, que hace que se acorten los plazos de entrega del producto y por lo tanto el ciclo de producción.
- **alta calidad de producto** en relación con las exigencias del cliente.
- **menor precio**, para que el producto sea competitivo, lo que obliga a la reducción de costos.

Aparece, entonces, el concepto de *fabricación flexible*, que obliga a los sistemas de fabricación a la producción de piezas muy diferentes, tanto en su forma geométrica como en la cantidad y tipo de operaciones a realizar para su obtención, de tal forma que los tiempos de fabricación sean mínimos.

En los últimos años, la industria automotriz ha promovido numerosos desarrollos relacionados con la tecnología y fabricación de nuevos aceros vinculados con la disminución de peso y el aumento de la seguridad de vehículos. Sin embargo, junto con las ventajas que proveen estos nuevos aceros, surge la necesidad de generar conocimiento sobre el comportamiento de estos materiales en aspectos como conformabilidad y soldabilidad.

Es de particular interés en esta industria la obtención de piezas por estampado, que involucra el plegado de chapas. El plegado es un proceso de conformado por

deformación de chapas. La chapa a conformar se sitúa sobre una matriz donde es deformada por el empuje que se realiza sobre ella, por medio de un macho o punzón accionado por la parte móvil de una prensa-plegadora.

El proceso de conformado de chapa metálica se ha ido adaptando al paso del tiempo y a las nuevas tecnologías. Empezando con plegados manuales y pasando a las más modernas técnicas de plegado en máquinas prensas-plegadoras de control numérico en las que automáticamente se calcula la fuerza necesaria a aplicar teniendo en cuenta varios parámetros. Por lo tanto ha evolucionado desde los antiguos sistemas rígidos y convencionales por otros sistemas de mayor tecnología y flexibilidad.

Dentro de las distintas formas de plegado, el plegado al aire (utilizado en este Proyecto) lleva consigo los conceptos de flexibilidad, eficacia y eficiencia.

En este proceso, el ángulo de plegado se puede controlar mediante el recorrido del macho o punzón, pudiendo, por lo tanto, plegar chapas a distintos ángulos de plegado sin necesidad de cambiar las herramientas. Esto está directamente ligado a la posible reducción de costos.

La precisión del producto está relacionada de forma directa con la recuperación del material (*springback*). Esta recuperación del material es debida a la recuperación elástica de la chapa. Es decir, es el retorno parcial que sufre la chapa hacia su posición inicial cuando deja de aplicarse la fuerza de plegado. Durante el proceso de plegado, no todos los granos del material superan el límite elástico. Cuando se liberan las fuerzas que generan la flexión, estos cristales vuelven a su posición original y el material se recupera elásticamente. Este hecho se debe tener en cuenta en el ángulo de plegado final, teniendo que asignar ángulos de plegado más acentuados para la obtención del ángulo final en el producto.

La recuperación elástica se encuentra en todos los procesos de conformado, pero es más reconocida y ha sido más estudiada en el plegado.

Se observa que el *springback* de la chapa es función esencialmente de:

- Espesor de la chapa, dimensiones del herramental de plegado
- Ángulo de plegado
- Tipo de material
- Módulo de Young y límite elástico del material
- Tratamiento térmico anterior al proceso de plegado

Por lo tanto, para poder predecir la recuperación de la chapa, es necesario tener información del material que se va a emplear, las propiedades mecánicas y el comportamiento del mismo.

## 1.2 Motivación

Una de las funciones del sector de Calidad de Producto de Ternium Siderar es la de brindar especificaciones de los productos comercializados a sus clientes. Estas

especificaciones técnicas se presentan en el Catálogo de Productos, e incluyen composición química de los aceros base, propiedades mecánicas (en relación con los espesores), condiciones superficiales, detalles dimensionales, entre otros datos.

El sector de Producto también centraliza todo lo referido al desarrollo/homologación de productos y especificaciones técnicas, recibiendo las propuestas y comentarios de sus clientes para evolucionar conjuntamente con el mercado.

Precisamente es a partir de inquietudes de diferentes terminales automotrices y estampadoras que se plantea la necesidad de analizar el fenómeno de *springback* en chapa laminada en frío, barriendo un amplio intervalo de calidades y espesores, con el propósito de conocer y predecir de manera segura la recuperación elástica en el plegado de los principales materiales producidos para la industria automotriz.

Además de una caracterización de la gama de productos más comunes en el mercado de acero para automóviles, se presenta la oportunidad de generar herramientas fundamentales para el estudio de la recuperación elástica. Se constata que, tanto en proveedores de acero como en estampadoras y terminales automotrices, no se cuenta con ensayos de aplicación práctica para medir el fenómeno, y tampoco se conocen comúnmente los métodos teóricos para estimarlo.

Aparecen además algunas preguntas interesantes:

¿Se podría especificar un valor o rango de valores de recuperación elástica para cada clase de producto?

¿Existen herramientas teóricas para predecir el *springback*? ¿Se pueden aplicar indistintamente a cualquier producto?

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

El objetivo general de este proyecto es estudiar la recuperación elástica (o *springback*) en el plegado de chapas laminadas en frío de mayor uso en la industria automotriz, tanto por calidades de acero como por espesores.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Diseñar un método de ensayo de *springback* y fabricar el equipo de ensayo.
- Caracterizar el fenómeno en los materiales de mayor uso en la industria automotriz.
- Obtener medios analíticos/teóricos que aproximen el comportamiento de los materiales en el ensayo de *springback*.

## 1.4 Organización del trabajo

El presente trabajo está dividido en 8 capítulos, los cuales se enumeran a continuación:

1. Motivación y objetivos.
2. Ensayo de springback.
3. Análisis teórico del springback.
4. Selección y caracterización de los materiales.
5. Implementación del modelo de elementos finitos.
6. Simulación y análisis de resultados.
7. Conclusiones y trabajos futuros.
8. Bibliografía.

Las actividades descritas en los distintos capítulos fueron desarrolladas durante mi trabajo en Calidad de Producto Ternium Siderar y posteriormente en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

En el Capítulo 2 se explica cómo se selecciona y desarrolla de acuerdo a normas, un nuevo equipo y método de ensayo simple de springback, como medio para cuantificar la recuperación elástica de chapas laminadas en frío de distintos aceros. Estos desarrollos fueron realizados en forma conjunta con el sector de Asistencia a Procesos del Instituto Argentino de Siderurgia (IAS).

En cuanto a la selección y caracterización de materiales (Capítulo 4), se realiza en laboratorios de diferentes plantas de Ternium Siderar mediante análisis químico, metalográfico y mecánico.

En el Capítulo 5 se implementa un modelado por elementos finitos para simular y predecir el comportamiento de *springback* en el ensayo de plegado de los diferentes materiales estudiados. A continuación, en el Capítulo 6 se analizan las simulaciones obtenidas y se comparan los resultados con los obtenidos experimental y teóricamente.

Para finalizar, se presentan en el Capítulo 7 las conclusiones y los futuros trabajos a realizar con respecto a la recuperación elástica en el plegado de chapas de acero.

## **2. Ensayo de *springback***

### **2.1 Introducción**

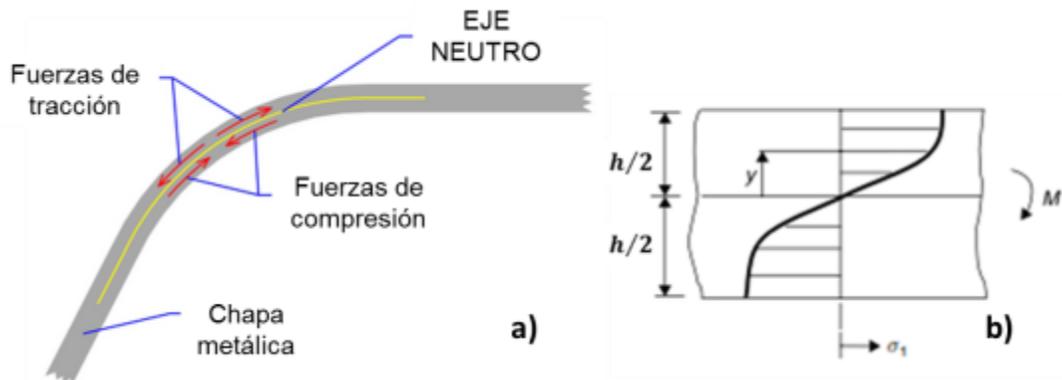
La recuperación elástica es el cambio dimensional que experimenta la pieza conformada después que la misma abandona el herramental, y que es resultante del cambio en las deformaciones producido por la descarga elástica. [1]

Este fenómeno se encuentra en todos los procesos de conformado, pero es más reconocido y ha sido más estudiado en el doblado. Durante el proceso de doblado, no todos los granos superan el límite elástico. Cuando se liberan las fuerzas que generan la flexión, estos cristales vuelven a su posición original y parte del material se recupera elásticamente.

Actualmente, se realizan diversos ensayos con el objetivo de caracterizar aceros utilizados por la industria automotriz, evaluando su aptitud para el conformado. Pero no se hacen ensayos de recuperación elástica. Por tal motivo se decide desarrollar del ensayo de *springback*, como medio para cuantificar la recuperación elástica de chapas laminadas en frío. En este capítulo se realiza una búsqueda bibliográfica general y de normas específicas para la selección del tipo de equipo a utilizar y el procedimiento de ensayo, a partir de la cual se presentan los fundamentos relacionados a la recuperación elástica de la chapa luego del conformado de la misma.

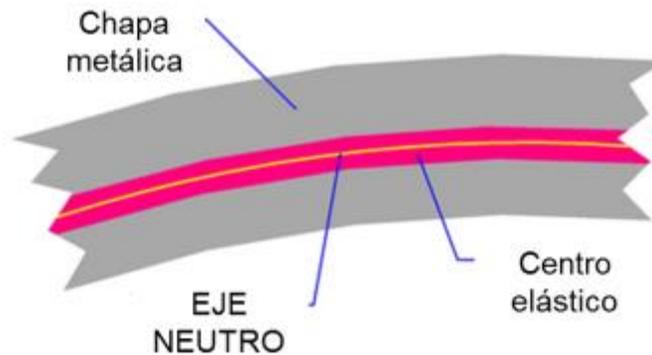
### **2.2 Fundamentos del ensayo**

Cuando se flexiona una chapa, las variaciones en los esfuerzos en una zona sometida a flexión causan la recuperación elástica después del doblado. La tensión cambia de tracción en la superficie exterior a compresión en la superficie interior del material durante el doblado. La mayor tensión de tracción se produce en la superficie exterior del material al doblarlo. El esfuerzo de tracción disminuye hacia el centro del espesor de la chapa y se hace cero en el eje neutro (Figura 2.1).



**Figura 2.1.** Doblado de chapa. **a)** Fuerzas internas. **b)** Diagrama de distribución de tensiones.

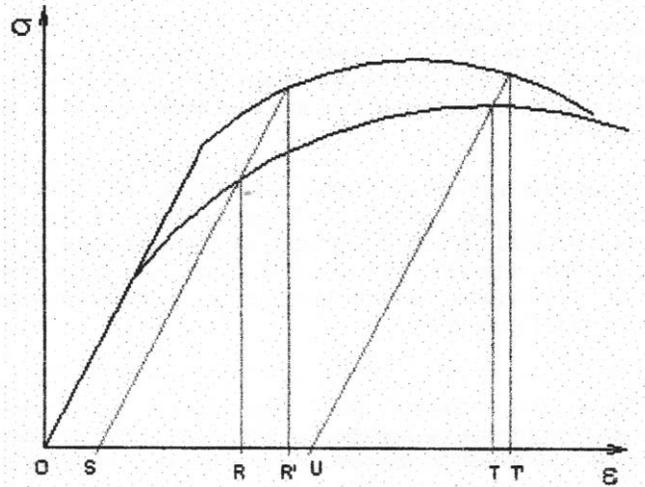
Cerca del eje neutro, el material ha sufrido esfuerzos a valores por debajo del límite elástico. Este metal crea una “banda elástica” estrecha en ambos lados del eje neutro (Figura 2.2). El material más lejos del eje se ha solicitado más allá del límite elástico y se ha deformado plásticamente. Cuando se retira la fuerza externa de doblado, la “banda elástica” intenta volver a la condición plana original, pero no puede, debido a la restricción que le imponen las zonas de deformación plástica. Algún leve retorno se produce a medida que las zonas elásticas y plásticas alcanzan el equilibrio, y esto se conoce como recuperación elástica. [2]



**Figura 2.2.** Ilustración de la “banda elástica” en la zona doblada.

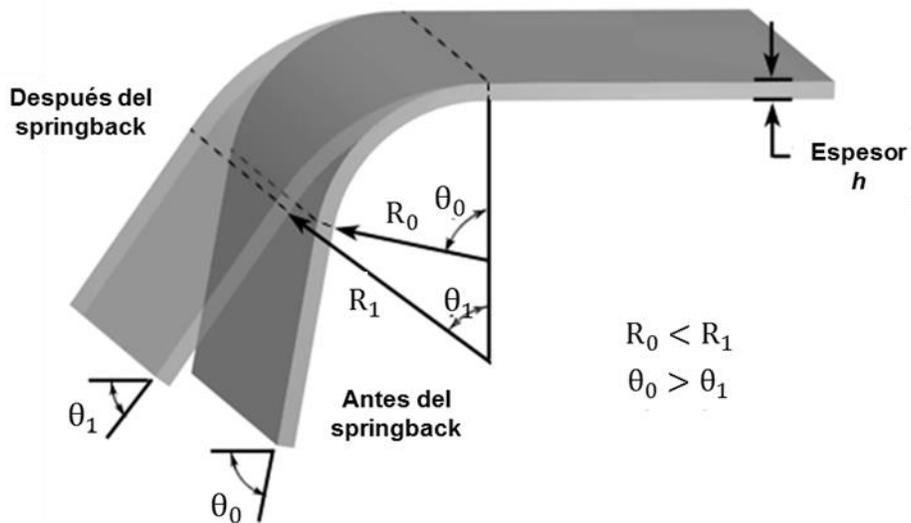
Si se analiza el caso de un mismo acero con distintos grados de deformación, cuando la deformación plástica es pequeña como la indicada con OS en la Figura 2.3, el efecto del aumento del límite de fluencia aumenta la deformación elástica desde SR hasta SR'. Cuando la deformación plástica es mayor como en el caso de la indicada con OU, el efecto del aumento del límite de fluencia aumentará la región elástica desde UT a UT'. Se puede observar claramente en la figura que el segmento RR' es mayor que el

$TT'$ , probando así que el efecto del aumento de límite elástico es más perjudicial en las piezas con pequeñas deformaciones plásticas (permanentes). [3]



**Figura 2.3.** Curva tensión-deformación de un acero con distintos grados de deformación plástica.

Como se puede observar en la Figura 2.4, la recuperación elástica disminuye la deformación de la pieza, y por tal motivo se incrementa tanto el ángulo como el radio de la pieza doblada. Esta recuperación será tanto mayor cuanto mayor sea la resistencia a la fluencia del material, mayor el límite elástico, menor el módulo de Young y cuanto mayor sea la relación Radio de doblado/espesor (doblado suave).



**Figura 2.4.** Recuperación elástica en el doblado. ( $h$ : espesor de la chapa,  $R_0$ : radio inicial de doblado,  $R_1$ : radio luego springback,  $\theta_0$ : ángulo inicial y  $\theta_1$ : ángulo luego de springback)

El radio de curvatura antes de la descarga ( $R_0$ ) es menor que después de producida la misma ( $R_1$ ). Como la longitud de la línea neutra  $L_n$  no cambia, resulta:

$$L_n = \left(R_0 + \frac{h}{2}\right) \theta_0 = \left(R_1 + \frac{h}{2}\right) \theta_1 \quad (2-1)$$

Así, la relación de recuperación elástica,  $\eta$  está dada por:

$$\eta = \frac{\theta_1}{\theta_0} = \frac{R_0 + h/2}{R_1 + h/2} = \frac{R'_0}{R'_1} \quad (2-2)$$

donde  $R'_0$  y  $R'_1$  son los radios de curvatura medidos hasta la mitad del espesor de la chapa.

Esta relación de recuperación elástica es independiente del ancho de la chapa y sólo depende de la relación del radio de doblado al espesor de la chapa.

Puesto que, como se ha visto, la recuperación también es función de la resistencia a la fluencia del material doblado, se cuenta con una expresión [4] [5] que considera este hecho:

$$\eta = \frac{\theta_1}{\theta_0} = \frac{R'_0}{R'_1} = 1 - 3 \left( \frac{R'_0 \sigma_Y (1-\nu)^2}{h E} \right) + 4 \left( \frac{R'_0 \sigma_Y (1-\nu)^2}{h E} \right)^3 \quad (2-3)$$

donde  $\sigma_Y$  es la tensión de fluencia,  $E$  es el módulo de Young y  $\nu$  es el coeficiente de Poisson del material doblado.

En el Capítulo 3 se explica la obtención de esta y otras fórmulas para estimar la recuperación elástica.

## 2.3 Análisis de normas

Se realizó una búsqueda y posterior análisis de normas técnicas relacionadas con el tema de estudio de este Proyecto Final.

Principalmente, se encontraron puntos interesantes en las siguientes normas:

- ASTM E290-14 Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility.
- ASTM E328-02 Standard Test Methods for Stress Relaxation Tests for Materials and Structures.
- ASTM E2492-07 Standard Test Method for Evaluating Springback of Sheet Metal Using the Demeri Split Ring Test.
- BS EN 10 203-91 Specification for Cold reduced electrolytic tinplate.

- BS EN 10 202-90 Specification for Cold reduced electrolytic chromium / chromium oxide coated steel.

A partir del análisis de la información recolectada se planteó el diseño de un nuevo equipo y método de ensayo teniendo en cuenta principalmente los requerimientos de plantas siderúrgicas, terminales automotrices y estampadoras. Así, se propusieron algunos lineamientos para equipo y ensayo.

- **Equipo:**

- Bajo o mediano costo (en etapa de prototipo). Esto implica que no haya dispositivos o partes de alta tecnología asociados al equipo.
- Portátil, o fácilmente transportable. De esta manera se podría emplear en visitas a proveedores o clientes para verificación de especificaciones, por ejemplo.

- **Método de ensayo:**

- Probetas de ensayo sencillas, de obtención rápida. Para encajar con los tiempos de circuitos de producción, comercialización y/o atención de reclamos de calidad.
- Ensayo de corta duración. Rápida obtención de resultados. Es importante porque valores atípicos pueden ayudar a detectar anomalías en los materiales, que de esta manera podrían ser reprocesados, asignados a otro uso o descartados, todo dentro de los tiempos de producción.
- Reporte de resultados simple. Al ser un factor poco conocido en la industria, se espera que sea un método de ensayo que permita obtener resultados de lectura e interpretación sencilla, de manera que pueda tratarse como especificación técnica del material.
- Altos grados de repetibilidad y reproducibilidad. La repetibilidad indica el grado de acuerdo entre resultados mutuamente independientes de un ensayo obtenidos utilizando el mismo método, en idénticos materiales, en el mismo laboratorio, por el mismo operador, usando el mismo equipo y en un corto intervalo de tiempo. Mientras que la reproducibilidad lo hace para resultados mutuamente independientes de un ensayo obtenidos utilizando el mismo método, en idénticos materiales, pero en diferentes laboratorios, con diferentes operadores y utilizando diferentes equipos.

## 2.4 Equipo y ensayo: *Springback* por plegado 180°

A partir de los requisitos expuestos en la sección anterior se elaboró un método de ensayo y se empezó a construir el aparato de ensayo, tomando como base diseños de las mencionadas normas y de bibliografía adicional.

El ensayo de *springback* propuesto provee una representación rápida y simple para estimar el cociente de *springback* a partir de la medición del ángulo de recuperación de una muestra de chapa rectangular después de doblarla 180° sobre un mandril de punta redondeada y luego liberarla.

Se trata de un ensayo de plegado semi-guiado, en el que la probeta se fija de un extremo mientras un mandril hace contacto con la superficie interior de la probeta respecto a la ubicación de la curva. Un dispositivo rotativo (rodillo) aplica la fuerza de plegado sobre el lado opuesto de la probeta para hacer que esta copie la forma del mandril.

### 2.4.1 Descripción del equipo

Se construyó un equipo basado sobre los diseños propuestos en [6] y [7] (Figura 2.5), que consiste en un mandril con punta semicircular de radio 12.5mm. Accionado mediante una palanca o brazo formador, un pequeño rodillo de 5mm de radio recorre la punta del mandril para doblar las probetas de chapa hasta 180°.

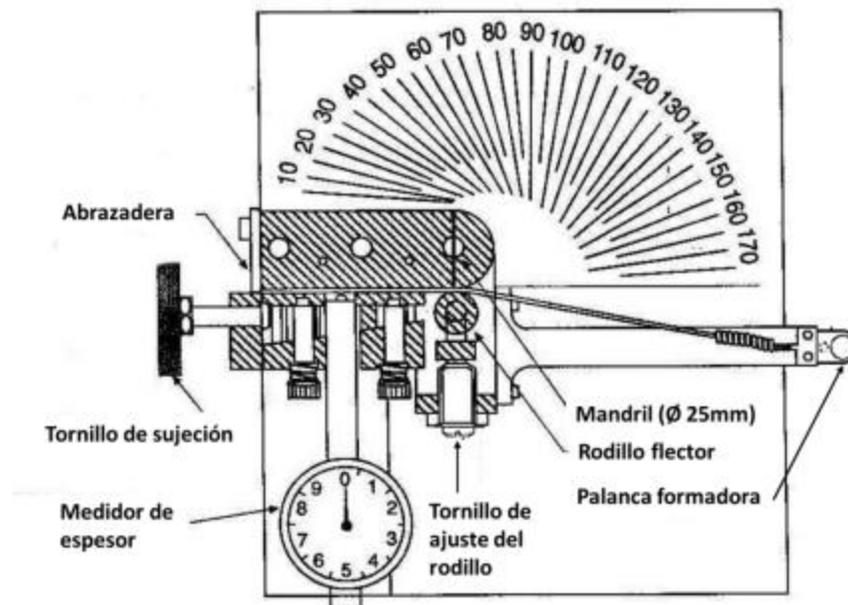
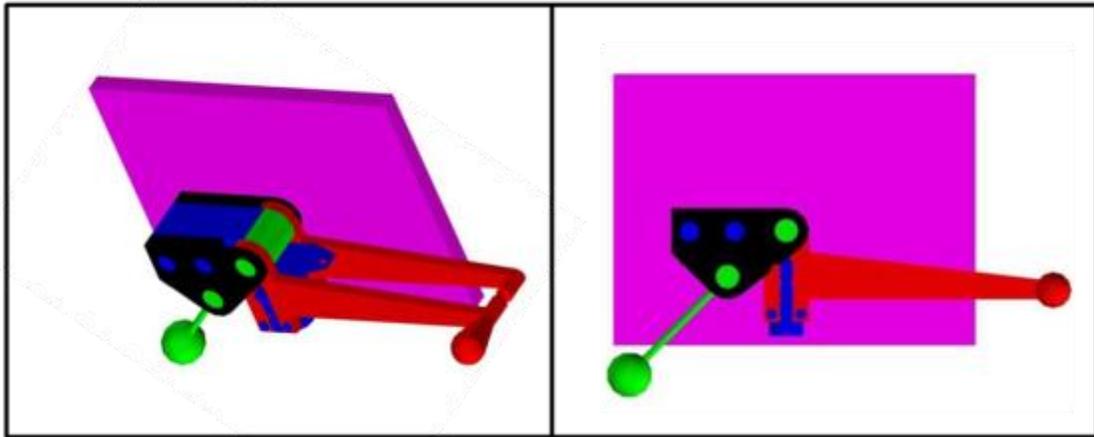


Figura 2.5. Esquema de un equipo típico para medir springback [7].

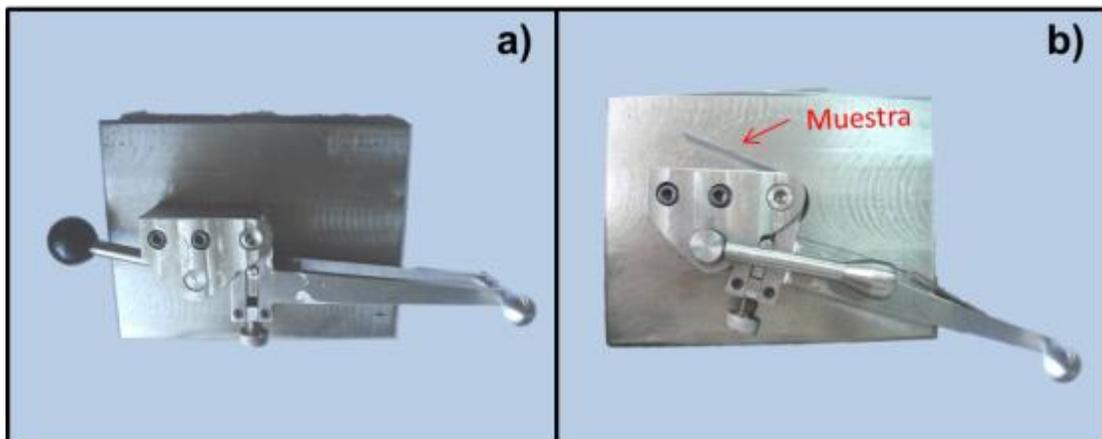
En la etapa de diseño se definió construir un equipo reforzado (incrementando su robustez), para tener la posibilidad de trabajar con chapas de mayor espesor. Se decidió no incorporar el medidor de espesor al equipo y reemplazar el tornillo de sujeción por una palanca. Se respetaron los radios de la matriz y del rodillo de doblado.

En la Figura 2.6 se puede ver una muestra de los diseños CAD del equipo.



**Figura 2.6.** Diseños CAD del equipo para ensayo de *springback*.

Al construir el equipo, se realizaron algunos cambios funcionales hasta llegar a la versión final, como se muestra en la Figura 2.7.



**Figura 2.7.** Equipo para ensayo de *springback*.  
a) Versión preliminar. b) Versión final.

## 2.4.2 Probetas

Las probetas usadas son similares a las del ensayo de tracción. Por cada hoja de chapa seleccionada, se cortan por chorro de agua con abrasivos (en inglés AWJC,

Abrasive Water Jet Cutting) tres probetas rectangulares de aproximadamente 120 mm de largo por 25 mm de ancho, paralelas a la dirección de laminación. Las probetas se obtienen a un mínimo de 25 mm del borde. Se informa un promedio de los tres ensayos correspondientes a cada muestra de material.

En la Figura 2.8 se muestran algunas probetas fuera del equipo luego de finalizado el ensayo de springback por plegado 180°.



**Figura 2.8.** Probetas luego de realizado el ensayo de *springback*.

### 2.4.3 Descripción del ensayo

Utilizando la numeración de las piezas de la Figura. 2.9, se describirán los pasos a seguir para realizar el ensayo.

- Medir con micrómetro y registrar el espesor de la probeta de chapa con precisión de 0,001 mm.
- Aflojar la palanca de sujeción (10) e insertar la probeta, paralela al brazo formador (6), asegurando que la misma haga contacto con el tope interno (11). Fijarla firmemente en la posición del ensayo, ajustando gradualmente la palanca de sujeción usando poca presión. De ser necesario, ajustar la altura del rodillo flector (7) ajustando suavemente el tornillo (8). El sistema de ajuste cuenta con un resorte interno (9) que facilita la adaptación del rodillo a espesores similares de chapa.

- c) Doblar la probeta un ángulo de  $180^\circ$  contra el mandril (2) basculando suavemente el brazo formador (procedimiento manual) a velocidad constante, en un tiempo aproximado de 2 segundos. Sujetar la planchuela base (1) durante la operación del equipo.
- d) Retornar el brazo a la posición de inicio, con ayuda de los muelles (4), a la misma velocidad que en el paso anterior. El retorno se debe hacer de forma controlada, sin dejar que el brazo formador golpee el tope (5).
- e) La probeta quedará curvada por su parte central. Su extremo libre, en forma recta, marcará un valor angular sobre la escala (3). A continuación, medir el ángulo final  $\theta_f$  que forma la probeta con la parte superior del mandril. Registrar la lectura y retirar la probeta del equipo.
- f) Después de extraer la probeta, examinar la superficie exterior de la zona doblada y reportar fisuras o imperfecciones. Se recomienda especificar la cantidad y el tamaño de fisuras admisibles por material.

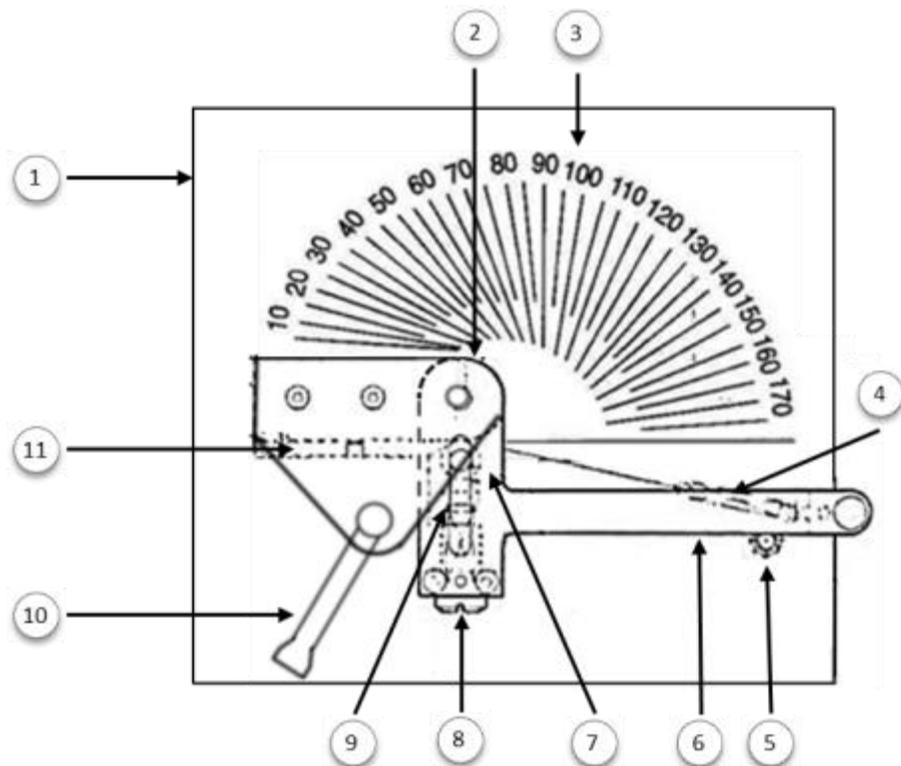
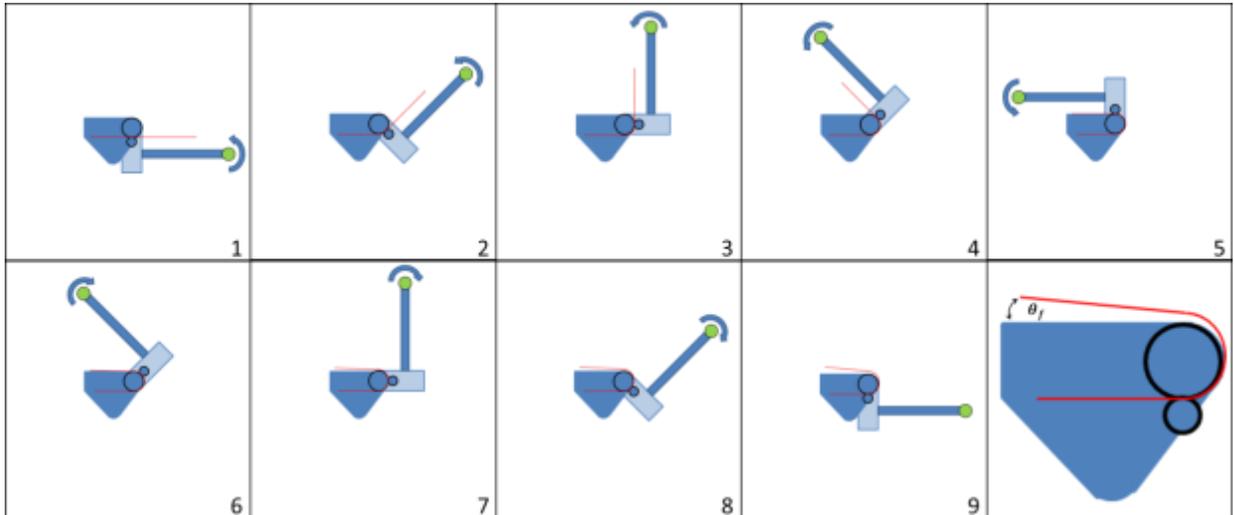


Figura 2.9. Detalle del equipo de *springback*.



**Figura 2.10.** Secuencia del ensayo de *springback* (1 a 9) y medición de  $\theta_f$ .

En la Figura 2.10 se presenta una secuencia de imágenes que ilustra el movimiento del brazo formador del equipo durante el ensayo. Partiendo de la posición inicial (1), se gira la palanca en sentido anti horario hasta alcanzar el tope en  $180^\circ$  (5). Inmediatamente después, y a la misma velocidad, se gira la palanca formadora en sentido horario hasta regresar a la posición inicial (9).

Se debe informar el  $\theta_f$  promedio de tres ensayos (mínimo) por cada muestra de material. Se utiliza el valor de ángulo promedio para calcular el cociente de springback según la fórmula:

$$\eta = \frac{\theta_0 - \theta_f}{\theta_0} = \frac{180 - \theta_f}{180}, \quad (2-4)$$

donde  $\theta_0$  es el ángulo de plegado (en el caso de este ensayo,  $180^\circ$ ) y  $\theta_f$  es el ángulo de recuperación elástica. Este último se mide en sentido contrario al ángulo de plegado.

**Error asociado al aparato de ensayo:** un grado ( $1^\circ$ ) [7].

Como herramienta de verificación teórica, se propone usar las fórmulas presentadas en el siguiente capítulo para calcular la recuperación elástica.

## 2.5 Conclusiones

- A partir de la información bibliográfica sobre el fenómeno y normas técnicas se construyó un equipo para el ensayo de springback. El equipo es lo suficientemente robusto para poder usarse en los principales productos consumidos por la industria automotriz (en calidades de acero y espesores).
- Se adoptó un método de ensayo de plegado semi guiado de 180° que consiste en la medición del ángulo de recuperación de una muestra de chapa rectangular después de doblarla 180° sobre un mandril de punta redondeada y luego liberarla.
- El ensayo propuesto provee una forma rápida y simple para estimar el cociente de *springback*.

## **3. Análisis teórico del *springback***

### **Deducción de ecuaciones para el cálculo de *springback* en flexión pura de chapas**

#### **3.1 Introducción**

En este capítulo se presentan las ecuaciones teóricas para calcular el cociente de *springback*.

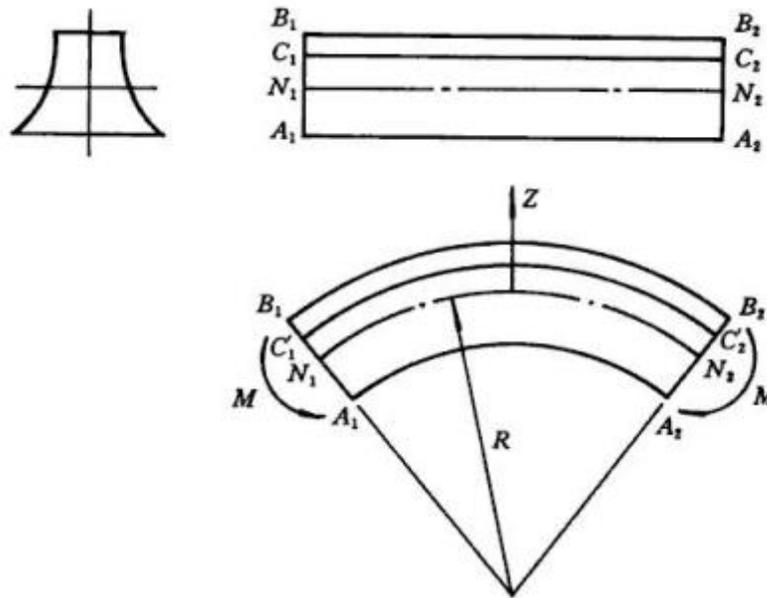
En el estudio de un proceso, el primer paso generalmente es obtener una indicación de la distribución de la deformación. Esto se puede hacer a través de mediciones o de algún análisis geométrico. El siguiente paso es determinar el estado tensional asociado con la deformación en cada punto. Para hacer esto, se deben tener las propiedades de tensión-deformación para el material. Los datos del ensayo de tracción se pueden generalizar para aplicar a cualquier proceso simple utilizando las relaciones de tensión-deformación efectivas. En modelos numéricos, la curva real tensión-deformación se puede utilizar como entrada. Pero en algunas situaciones a veces es preferible utilizar una ley empírica simple que se aproxime a los datos. A continuación se consideran algunas de estas leyes.

Para llegar a las ecuaciones que permitan predecir la recuperación elástica en el doblado de chapas de un material con endurecimiento por deformación por ley de la potencia, se partirá del análisis de flexión de una viga con comportamiento elástico – perfectamente plástico. Luego se ampliarán los desarrollos para el caso real estudiado en este Proyecto Final.

#### **3.2 Flexión pura y *springback* de vigas rectas**

##### **3.2.1 Formulación general**

Se considera la flexión pura de vigas rectas de sección transversal constante.



**Figura 3.1.** Flexión pura de una viga recta de sección transversal uniforme.

Se supone que una viga posee un plano de simetría en la dirección longitudinal y se ve sujeta a un par de momentos flectores aplicados en este plano, como se muestra en la Figura 3.1. Dado que se adopta la suposición de sección plana, bajo la aplicación de momento flector, dos secciones transversales  $A_1B_1$  y  $A_2B_2$  realizan una rotación relativa pero ambas se mantienen perpendiculares al plano de simetría de la viga. Entonces, las fibras longitudinales en la superficie convexa  $B_1B_2$  están sujetas a tensión mientras que las de la superficie cóncava  $A_1A_2$  están en compresión. Si la longitud de las fibras en un plano  $N_1N_2$ , el cual es perpendicular al plano de simetría, se mantienen sin cambios, entonces  $N_1N_2$  se llama superficie neutra, la cual divide las fibras traccionadas de las comprimidas. La intersección de la superficie neutra con una sección transversal se denomina eje neutro de esa sección, que es evidentemente perpendicular al eje de simetría de esa sección.

De acuerdo con las suposiciones básicas de la Teoría de Flexión Ingenieril, una fibra  $C_1C_2$  a una distancia  $z$  del eje neutro, forma un arco  $C_1'C_2'$  luego de la flexión, y la longitud de ese arco puede determinarse por

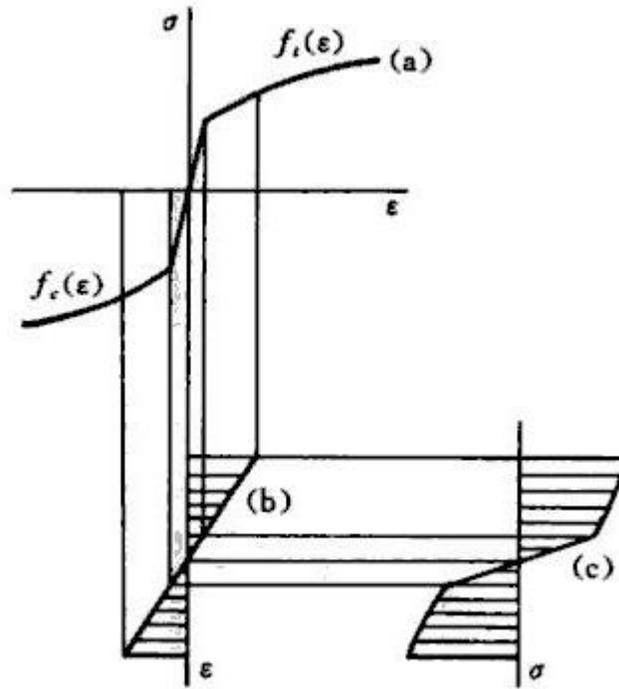
$$\frac{C_1'C_2'}{C_1C_2} = \frac{C_1C_2}{N_1N_2} = \frac{R+z}{R} = 1 + \frac{z}{R} \quad (3-1)$$

donde  $R$  es el radio de curvatura del eje neutro después de la flexión, siempre tomando un valor positivo, y  $z$  es una medida desde el eje neutro hacia la superficie convexa. La deformación ingenieril sufrida por la fibra  $C_1C_2$  es

$$\varepsilon = \frac{c_1'c_2' - c_1c_2}{c_1c_2} = \frac{z}{R} = zk \quad (3-2)$$

donde  $k = 1/R$  ( $\geq 0$ ) es la curvatura del eje neutro luego de la flexión.

La Ec. (3-2) indica que la deformación longitudinal varía linealmente a través del espesor de la viga, como se muestra en la Figura 3.2 (b).



**Figura 3.2.** (a) relación  $\sigma$ - $\varepsilon$  en tensión simple; (b) distribución de deformaciones; (c) distribución de tensiones.

Ahora se supone además que la relación de tensión-deformación para fibras longitudinales durante la flexión de la viga es idéntica a aquellas en tracción y compresión simples, como se ve en el gráfico de la Figura 3.2 (a), esto es

$$\sigma = \begin{cases} f_t(\varepsilon), & \text{si } \varepsilon \geq 0 \\ f_c(\varepsilon), & \text{si } \varepsilon \leq 0 \end{cases} \quad (3-3)$$

Por lo tanto, si no ocurre descarga durante la flexión, la tensión de la fibra  $C_1C_2$  es

$$\sigma = \begin{cases} f_t(zk), & \text{si } z \geq 0 \\ f_c(zk), & \text{si } z \leq 0 \end{cases} \quad (3-4)$$

La distribución de esta tensión es como se la muestra en la Figura 3.2 (c). La fibra en el eje neutro no tiene elongación ni acortamiento, entonces la tensión y la deformación son cero.

La condición de carga para flexión pura de una viga requiere que la tensión dada en la Ec. (3-4) satisfaga las siguientes ecuaciones:

$$\begin{cases} \iint_A \sigma dA = 0 \\ \iint_A \sigma z dA = M \end{cases} \quad (3-5)$$

donde  $A$  es la sección transversal de la viga y  $M$  es el momento flector aplicado. Si  $B(z)$  representa el ancho de la sección en una línea con distancia  $z$  del eje neutro, entonces las Ecs. (3-5) pueden escribirse como

$$\begin{cases} \int_{z_1}^{z_2} \sigma B(z) dz = 0 \\ \int_{z_1}^{z_2} \sigma B(z) z dz = M \end{cases} \quad (3-6)$$

donde  $z_1 (< 0)$  y  $z_2 (> 0)$  representan las distancias de la fibra más lejana en compresión y aquella en tracción, respectivamente, del eje neutro. Obviamente

$$-z_1 + z_2 = h, \quad (3-7)$$

donde  $h$  representa el espesor de la viga. Usando las Ecs. (3-4) y (3-7), la primera expresión de (3-6) se descompone como

$$\int_{z_2-h}^0 f_c(zk) B(z) dz + \int_0^{z_2} f_t(zk) B(z) dz = 0 \quad (3-8)$$

Para cada valor de  $k$ , el valor de  $z_2$  se puede determinar con la Ec. (3-8), como también la posición del eje neutro en la sección.

De la misma forma, se puede reescribir la segunda parte de la Ec. (3-6) como

$$\int_{z_2-h}^0 f_c(zk) B(z) z dz + \int_0^{z_2} f_t(zk) B(z) z dz = M \quad (3-9)$$

A partir de las Ecs. (3-8) y (3-9) se pueden obtener respectivamente las relaciones de  $z_2$  y  $M$  en función de la curvatura  $k$ . Estas relaciones dependen tanto de la sección transversal de la viga como de la curva tensión-deformación del material en tracción y en compresión.

Si la sección de la viga es doblemente simétrica y las curvas de  $\sigma$ - $\varepsilon$  en tracción y en compresión son idénticamente expresadas por  $\sigma = f(\varepsilon)$ , entonces el eje neutro debe estar fijo en el eje horizontal de simetría. Por lo tanto,  $-z_1 = z_2 = h/2$ , la Ec. (3-8) se transforma en identidad, mientras que la Ec. (3-9) se simplifica a

$$2 \int_0^{h/2} f(zk)B(z)zdz = M \quad (3-10)$$

### Consideraciones

1. Cuando la flexión está dentro del rango elástico, si se sustituye  $\sigma = f(\varepsilon) = E\varepsilon = Ekz$  en la Ec. (3-10) resulta

$$2Ek \int_0^{h/2} B(z)z^2 dz = M \quad (3-11)$$

que da la relación entre el momento flector y la curvatura en el rango elástico

$$Elk = M, \quad \text{con} \quad I = \int_0^{h/2} B(z)z^2 dz \quad (3-12)$$

donde  $I$  es el momento de inercia de la sección.

2. Cuando las fibras extremas de la sección están en fluencia,  $Ek(h/2) = \sigma_Y$ , siendo  $\sigma_Y$  la tensión de fluencia del material en tracción/compresión simple. De esta manera, la **curvatura elástica máxima** y el **momento flector elástico máximo** se definen por

$$k_e = 2\sigma_Y/Eh, \quad (3-13)$$

$$M_e = Elk_e = \frac{2YI}{h} = 4\sigma_Y \int_0^{h/2} B(z)z^2 dz$$

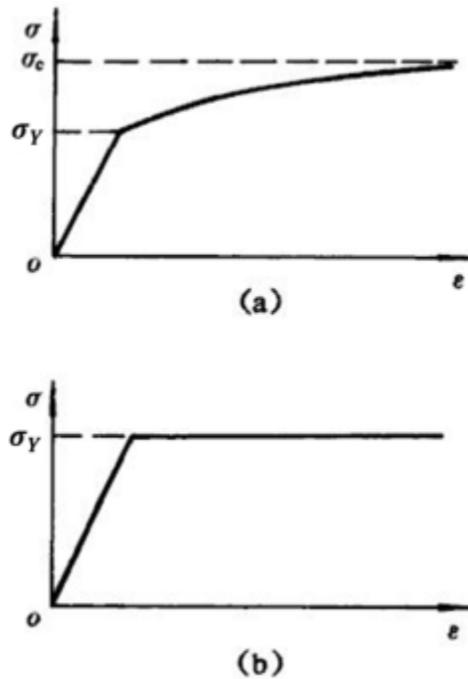
3. Si para un material la tensión  $\sigma$  se acerca a un valor constante  $\sigma_c$  cuando la deformación  $\varepsilon$  es suficientemente grande, como se muestra en la Figura 3.3 (a), luego se sabe por la Ec. (3-10) que cuando la curvatura  $k$  es suficientemente grande el momento flector  $M$  se acerca también a un valor constante. Esto es

$$M \rightarrow M_p = 2\sigma_c \int_0^{h/2} B(z)zdz \quad \text{a medida que } k \rightarrow \infty \quad (3-14)$$

Aquí  $M_p$  se llama **momento flector completamente plástico**, que representa el máximo momento flector que la viga puede soportar. La relación

$$\xi = M_p/M_e \quad (3-15)$$

depende de la forma de la sección (función  $B(z)$ ) y de las propiedades del material (relación  $\sigma_c/\sigma_Y$ ).



**Figura 3.3.** (a) Material con  $\sigma \rightarrow \sigma_c$  a medida que  $\varepsilon \rightarrow \infty$ ; (b) material elástico, perfectamente plástico.

4. Si el material es elástico – perfectamente plástico (Figura 3.3 (b)), entonces se mantiene  $\sigma_c = \sigma_Y$ , y

$$\xi = \frac{h \int_0^{h/2} B(z)z dz}{2 \int_0^{h/2} B(z)z^2 dz} \quad (3-16)$$

depende sólo de la forma de la sección. En este caso  $\xi$  se llama **factor de forma** de la sección.

5. Cuando se realiza una descarga completa luego de aplicar un momento flector  $M$  a una viga, si la descarga no causa fluencia reversa, entonces el proceso de descarga es efectivamente equivalente al efecto elástico causado al aplicar  $-M$  a la viga. Por lo tanto, la curvatura final de la viga es

$$k^F = \begin{cases} 0, & \text{si } 0 \leq M \leq M_e \\ f^{-1}(M) - \frac{M}{EI}, & \text{si } M_e \leq M \leq M_p \end{cases} \quad (3-17)$$

La viga disminuye su curvatura luego de la descarga y, como se ha mencionado anteriormente, este fenómeno se conoce como **springback**. La relación entre la curvatura posterior y la anterior a la descarga se conoce como **relación de springback**. Para vigas elásticas – perfectamente plásticas es

$$\eta = \frac{k^F}{k} = \begin{cases} 0, & \text{si } 0 \leq M \leq M_e \\ 1 - \frac{M}{EIf^{-1}(M)}, & \text{si } M_e \leq M \leq M_p \end{cases} \quad (3-18)$$

### 3.2.2 Sección rectangular

Se considera primero una viga elástica – perfectamente plástica de sección rectangular. Entonces la relación tensión-deformación es

$$\sigma = f(\varepsilon) = \begin{cases} E\varepsilon, & \text{si } |\varepsilon| \leq \varepsilon_y \\ \sigma_Y, & \text{si } |\varepsilon| \geq \varepsilon_y \end{cases} \quad (3-19)$$

donde  $\varepsilon_y = \sigma_Y/E$  es la deformación a fluencia del material cuando es sujeto a tracción simple.

De acuerdo con las Ecs. (3-12) y (3-16),

$$k_e = \frac{2\sigma_Y}{Eh} = \frac{2\varepsilon_y}{h}, \quad M_e = \frac{1}{6}\sigma_Ybh^2 \quad (3-20)$$

$$M_p = \frac{1}{4}\sigma_Ybh^2, \quad \xi = 1.5 \quad (3-21)$$

Cuando el momento flector aplicado  $M$  se encuentra dentro del rango  $M_e \leq M \leq M_p$ , la fibra a una distancia  $z_y = \varepsilon_y/k$  del eje neutro alcanza su fluencia inicial y la Ec. (3-10) da

$$M = 2 \int_0^{z_y} Ekbz^2 dz + \int_{z_y}^{h/2} \sigma_Y b z dz = \frac{2Eb\varepsilon_y^3}{3k^2} + \sigma_Y b \left[ \left(\frac{h}{2}\right)^2 - \left(\frac{\varepsilon_y}{k}\right)^2 \right] = \frac{1}{4}\sigma_Ybh^2 - \frac{\sigma_Y^3b}{3E^2k^2} \quad (3-22)$$

Si se comparan la Ec. (3-22) con la (3-20) se llega a que

$$\frac{M}{M_e} = \frac{3}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{k_e}{k}\right)^2, \quad \text{cuando } M_e \leq M \leq M_p \quad (3-23)$$

Definiendo un momento flector adimensional y una curvatura adimensional

$$m = M/M_e, \quad \phi = k/k_e \quad (3-24)$$

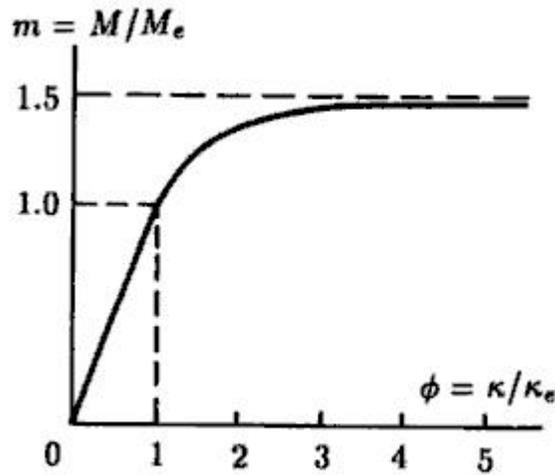
la relación momento flector – curvatura se puede reescribir en una forma adimensional:

$$m = \begin{cases} \phi, & \text{cuando } \phi \leq 1 \\ \frac{3}{2} - \frac{1}{2\phi^2}, & \text{cuando } \phi \geq 1 \end{cases} \quad (3-25)$$

o en forma de su función inversa

$$\phi = \begin{cases} m, & \text{cuando } 0 \leq m \leq 1 \\ \frac{1}{\sqrt{3-2m}}, & \text{cuando } 1 \leq m \leq \frac{3}{2} \end{cases} \quad (3-26)$$

Cuando  $M \rightarrow M_p$  ( $m = M_p/M_e \rightarrow 3/2$ ) tenemos que  $\phi \rightarrow \infty$ , lo que implica que la curvatura de una viga elástica – perfectamente plástica aumentará ilimitadamente cuando el momento flector aplicado se acerque al momento flector completamente plástico  $M_p$ . Las funciones dadas por las Ecs. (3-25) y (3-26) son ilustradas en la Figura 3.4.



**Figura 3.4.** Relación momento flector – curvatura de vigas con sección transversal rectangular.

Por referencia a la Ec. (3-17), la curvatura adimensional final de una viga de sección transversal rectangular después de descargada una flexión elasto –plástica resulta

$$\phi^F = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq m \leq 1 \\ \frac{1}{\sqrt{3-2m}} - m, & \text{para } 1 \leq m \leq \frac{3}{2} \end{cases} \quad (3-27)$$

y en consecuencia, la relación de *springback* es

$$\eta = \frac{k^F}{k} = \frac{\phi^F}{\phi} = \begin{cases} 0, & \text{para } 0 \leq m \leq 1 \\ 1 - m\sqrt{3 - 2m}, & \text{para } 1 \leq m \leq \frac{3}{2} \end{cases} \quad (3-28)$$

que expresa la relación de *springback* en términos del momento flector adimensional  $m$ . Reemplazando la Ec. (3-24) en la (3-28) se obtiene una expresión de la relación de *springback* en términos de la curvatura  $\phi$ :

$$\eta = \frac{\phi^F}{\phi} = \begin{cases} 0, & \text{si } 0 \leq \phi \leq 1 \\ \left(1 + \frac{1}{2\phi}\right) \left(1 - \frac{1}{\phi}\right)^2, & \text{si } 1 \leq \phi \end{cases} \quad (3-29)$$

Si se observa que  $1/2\phi = k_e/2k = \sigma_Y R/Eh$  con  $R = 1/k$  siendo el radio de curvatura de la viga bajo flexión, la Ec. (3-29) puede reescribirse como:

$$\eta = \frac{k^F}{k} = \frac{R}{R^F} = \left(1 + \frac{\sigma_Y R}{Eh}\right) \left(1 - 2 \frac{\sigma_Y R}{Eh}\right)^2 \quad (3-30)$$

o

$$\eta = 1 - 3 \left(\frac{\sigma_Y R}{Eh}\right) + 4 \left(\frac{\sigma_Y R}{Eh}\right)^3, \quad \text{para } \frac{\sigma_Y R}{Eh} \leq \frac{1}{2} \quad (3-31)$$

Aplicando la Ec. (3-30) o (3-31), obtenida por Gardiner en 1957 [5], se puede calcular fácilmente el radio de curvatura luego del *springback*  $R^F = 1/k^F$  a partir del radio de curvatura anterior al *springback*,  $R$ .

### 3.3 Chapas

El análisis anterior de flexión y *springback* es válido para una viga cuyos ancho  $b$  y espesor  $h$  son del mismo orden; esto es, válido para el caso de **tensión plana**. Para una chapa ancha en la que  $b$  es mucho mayor que  $h$ , la flexión cilíndrica pura satisface aproximadamente la condición de **deformación plana**, por lo que la relación momento flector – curvatura en el rango elástico es

$$M = \frac{EI}{(1-\nu^2)} k = E' I k \quad (3-32)$$

donde  $\nu$  es el coeficiente de Poisson y  $E' = E/(1 - \nu^2)$ . Esta relación también es válida para el cálculo de *springback*.

Una consideración importante a tener en cuenta es que en el plegado al aire de chapas de acero se ha comprobado que el eje neutro permanece en el centro del espesor cuando el radio de doblado es mayor a tres veces el espesor de la chapa. [8]

Las ecuaciones anteriores de flexión y *springback*, entonces, pueden ser aplicadas al doblado cilíndrico y subsecuente *springback* de chapas reemplazando E por E'. Por lo tanto, resulta

$$\eta = 1 - 3 \left[ \frac{\sigma_Y R(1-\nu^2)}{Eh} \right] + 4 \left[ \frac{\sigma_Y R(1-\nu^2)}{Eh} \right]^3, \quad \text{para } \frac{\sigma_Y R(1-\nu^2)}{Eh} \leq \frac{1}{2} \quad (3-33)$$

### 3.3.1 Endurecimiento por deformación con ley de la potencia

En relación con el comportamiento del material, Queener y de Angelis [9] opinan que el considerar un comportamiento de deformación sin endurecimiento no es una descripción apta del comportamiento tensión – deformación de muchos de los materiales de ingeniería. Por lo tanto, se consideró una ecuación constitutiva más general para describir el comportamiento elasto – plástico con endurecimiento por deformación según la ley de la potencia:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon & , \quad \text{para } \sigma \leq \sigma_Y \\ K\varepsilon^n & , \quad \text{para } \sigma > \sigma_Y \end{cases} \quad \text{donde } \sigma_Y = K \left( \frac{K}{E} \right)^{n/n-1} \quad (3-34)$$

siendo  $\sigma$  y  $\varepsilon$  la tensión y la deformación real respectivamente, y K y n parámetros del material que definen el límite de fluencia y la ley de endurecimiento.

La relación de *springback* que se obtiene es la siguiente:

$$\eta = \frac{k^F}{k} = 1 - \left( \frac{2R}{h} \right)^{1-n} \left[ \frac{3K(1-\nu^2)}{(3/4)^{(n+1)/2}(n+2)E} \right] + \left[ \left( \frac{2R}{h} \right) \left( \frac{K}{E} \right)^{1/(1-n)} \right]^3 \left[ \frac{3(1-\nu^2)^{n+3}}{(3/4)^{(n+1)/2}(n+2)(1-\nu+\nu^2)^{(n+2)/2}} - \frac{(1-\nu^2)^3}{(1-\nu+\nu^2)^{3/2}} \right] \quad (3-35)$$

Esta fórmula semiempírica es aproximada y no es completa o rigurosa dentro del marco de referencia matemático de la teoría de plasticidad debido a las hipótesis asumidas. Sin embargo se obtiene una ecuación con resultado preciso y lo suficientemente simple para tener utilidad práctica sobre un rango amplio de condiciones de recuperación.

Para la mayoría de los materiales de ingeniería, si la relación  $R/h$  no es grande (menor que 30), la magnitud del último término en la Ec. (3-35) es tan pequeña que la expresión puede simplificarse a:

$$\eta = \frac{k^F}{k} = 1 - \left(\frac{2R}{h}\right)^{1-n} \left[ \frac{3K(1-v^2)}{(3/4)^{(n+1)/2}(n+2)E} \right] \quad (3-36)$$

Esta simplificación es equivalente a asumir que la expresión de la ley de la potencia es una representación adecuada del comportamiento tensión – deformación del material en un ensayo de tracción simple para todos los esfuerzos. En cambio, en la Ec. (3-35) se asume que la expresión de la ley de la potencia es válida solamente a partir de un esfuerzo determinado y que el comportamiento es elástico para esfuerzos más pequeños.

Las ecuaciones (3-33), (3-35) y (3-36) son útiles para calcular el cociente de *springback* en la flexión de chapas en casos reales.

A continuación, se renombran dichas ecuaciones para ser usadas más adelante en este trabajo:

$$\eta = 1 - 3 \left[ \frac{\sigma_Y R(1-v^2)}{Eh} \right] + 4 \left[ \frac{\sigma_Y R(1-v^2)}{Eh} \right]^3, \quad \text{para } \frac{\sigma_Y R(1-v^2)}{Eh} \leq \frac{1}{2} \quad \mathbf{SP1}$$

$$\eta = \frac{k^F}{k} = 1 - \left(\frac{2R}{h}\right)^{1-n} \left[ \frac{3K(1-v^2)}{(3/4)^{(n+1)/2}(n+2)E} \right] + \left[ \left(\frac{2R}{h}\right) \left(\frac{K}{E}\right)^{1/(1-n)} \right]^3 \left[ \frac{3(1-v^2)^{n+3}}{(3/4)^{(n+1)/2}(n+2)(1-v+v^2)^{(n+2)/2}} - \frac{(1-v^2)^3}{(1-v+v^2)^{3/2}} \right] \quad \mathbf{SP2}$$

$$\eta = \frac{k^F}{k} = 1 - \left(\frac{2R}{h}\right)^{1-n} \left[ \frac{3K(1-v^2)}{(3/4)^{(n+1)/2}(n+2)E} \right] \quad \mathbf{SP3}$$

La aplicación de una u otra en el ámbito industrial dependerá del grado de precisión que se desee y de la información que se disponga sobre las propiedades del material (el coeficiente  $K$  comúnmente no es informado por los fabricantes de acero).

En este Trabajo Final se contrastarán los valores calculados mediante las tres ecuaciones con resultados experimentales (Capítulo 4) y de simulación numérica (Capítulo 5).

### 3.4 Conclusiones

- Partiendo de la formulación general de flexión para vigas se llegó a tres ecuaciones para calcular la recuperación elástica de chapas sometidas a flexión pura usando como datos de entrada  $\sigma_Y$ ,  $E$ ,  $\nu$ ,  $K$  y  $n$ , espesor de chapa y radio de doblado.
- La primera ecuación, **SP1**, considera un comportamiento de deformaciones elástico – perfectamente plástico. Las otras dos ecuaciones, **SP2** y **SP3**, consideran chapas con endurecimiento por deformación según la ley de la potencia.
- La ecuación **SP2** considera un comportamiento elástico hasta un determinado esfuerzo, a partir del cual el material pasa a comportarse según la ley de la potencia.
- La ecuación **SP3** representa las relaciones de tensión-deformación del material con la ley de la potencia para todo el rango de esfuerzos.



## 4. Selección y caracterización de los materiales

*Se caracterizaron 18 muestras de material, de 6 calidades diferentes en los espesores más comunes para el mercado automotriz.*

### 4.1 Descripción de los materiales:

#### Calidades E1, E2, E3.

Acero laminado en frío, calidades embutibles aptas para la fabricación de piezas que requieran aptitud al embutido (partes expuestas y no expuestas de carrocerías de automotores, perfilería de construcción, etc.). Material fabricado con acero calmado y tratamiento termomecánico para evitar el envejecimiento/aparición de líneas de Lüders.

#### Calidades R1, R2, R3.

Aceros refosforados y microaleados calmados al aluminio, calidad alto resistencial, laminados en frío. Materiales fabricados a partir de aceros especiales que combinan excelentes propiedades mecánicas con buenas condiciones de conformabilidad y soldabilidad. Aptos para uso en paragolpes, parantes, travesaños, pisos de automóviles, etc.

### 4.2 Composición química

En la Tabla 4.1 se muestran las composiciones químicas de las seis calidades de acero estudiadas den este trabajo. Son composiciones de análisis de cuchara expresado como máximo contenido, excepto donde es aclarado.

Grado		E1 (a)	E2 (a)	E3 (b)	R1 (c)	R2 (c)	R3 (c)
Elemento	Unidad						
Carbono	%	0,08	0,06	0,08	0,08	0,12	0,15
Manganeso	%	0,4	0,35	0,4	0,8	0,90 (4)	1,3
Fósforo	%	0,03	0,025	0,025	(1)	(1)	(1)
Azufre	%	0,03	0,025	0,025	0,035	0,035	0,035
Aluminio	%	(0,01 mín.)	(0,01 mín.)	(0,01 mín.)	(0,01 mín.)	(0,01 mín.)	(0,01 mín.)
Otros				(3)	(2)	(2)	(2)

Composición según normas (a) IRAM – IAS U 500-05/04, (b) PSA Peugeot B53 3106, (c) IRAM – IAS U 500-131/01

- (1) El contenido de P es suficiente para asegurar las propiedades mecánicas.
- (2) El contenido de elementos microaleantes (Nb, V y/o Ti) es suficiente para asegurar las propiedades mecánicas.
- (3)  $C_{eq} = 1,8\% \text{ máx. } C_{eq} = C + (Mn + Si)/6$
- (4) El contenido de Manganeso podrá alcanzar 1,20% a condición de que se cumplan las propiedades mecánicas.

**Tabla 4.1.** Composición química según calidades de acero.

## 4.2.1 Resultados

Se realizó el análisis químico de cada una de las muestras en un espectrofotómetro de absorción (para base hierro, es decir sólo para análisis químicos de materiales ferrosos), marca SPECTROLAB. El análisis consiste en el ataque por chispa de la muestra y la lectura del espectro resultante. En función de la longitud de onda de este espectro se determinan los componentes de la muestra. El chispeo se realiza en varios lugares de la muestra con una atmósfera de argón para eliminar el oxígeno.

Estos análisis sirvieron para corroborar la composición química de “colada” informada por la acería donde se produjeron los materiales.

Todas las muestras resultaron dentro de los valores de composición química admitidos para su correspondiente calidad (Tabla 4.1). Los valores de los análisis químicos para cada muestra se encuentran en el Anexo 1.

## 4.3 Propiedades mecánicas

En la Tabla 4.2 se presentan las propiedades mecánicas especificadas por diseño de material para cada una de las seis calidades de acero analizadas.

Grado			E1	E2	E3	R1	R2	R3
Elemento	Unidad	Direc.	(a)	(a)	(b)	(c)	(c)	(c)
Tensión de Fluencia	MPa	T	200 máx. (1)	180 máx. (1)	160-200 (2) 160-210 (3)	260 mín.	280 mín.	300 mín.
Tensión de Rotura	MPa	T	270-350	270-330	280-340	360 mín.	370 mín.	380 mín.
Alargamiento mín. (50 mm)	%	T	34 (4)	34 (4)	37	25	24	24
			38 (5)	40 (5)				
			39 (6)	41 (6)				
$n_{90}$			0,18 mín.	0,20 mín.	0,19 mín.			
$r_{90}$			1,6 mín.	1,9 mín.	1,8 (2) 1,6 (3)			
HRB (7)			50 máx.	50 máx.				

Ensayos según normas (a) IRAM IAS U 500-131/01, (b) PSA Peugeot B53 3055, (c) IRAM IAS U 500-05/04.

(1) Para espesor  $\leq 0,5$  mm el valor de fluencia se incrementa en 50 MPa. Para espesores entre 0,51 y 0,56 mm el valor de fluencia se incrementa en 30 MPa.

(2) Espesor  $\leq 1,47$  mm. (3) Espesor  $> 1,47$  y  $\leq 1,95$  mm.

(4) Espesor  $\leq 0,5$  mm. (5) Espesor  $> 0,5$  y  $\leq 1,6$  mm. (6) Espesor  $> 1,6$  mm.

(7) Ensayo de dureza según Norma IRAM IAS U500-105/76.

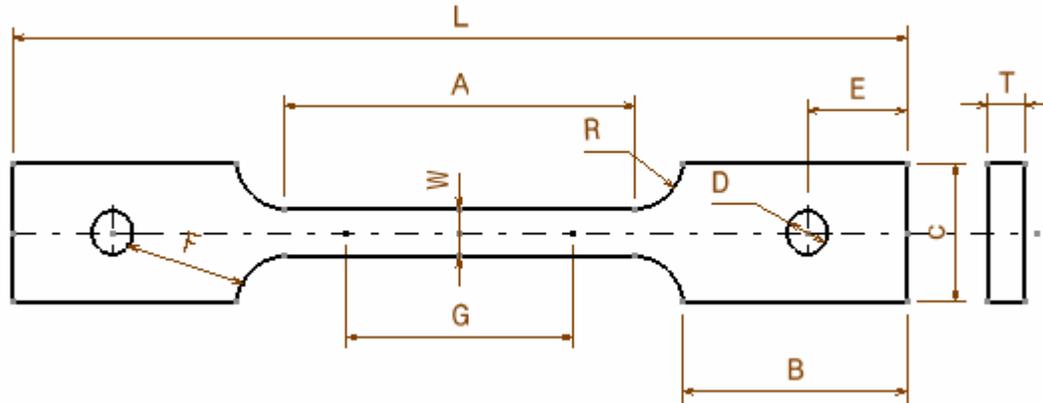
**Tabla 4.2.** Propiedades mecánicas según calidades de acero y espesores.

### 4.3.1 Ensayo de tracción

**Se caracterizó cada uno de los materiales que luego se sometieron a ensayos de *springback*.**

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta.

La probeta (tomada en dirección transversal a la dirección de laminación) se sostiene por los dos extremos, a la vez que una fuerza de tracción se aplica a velocidad constante; obteniéndose la curva tensión- deformación. Las dimensiones de la probeta obedecen a la norma ASTM-E 8M y se muestran en la Figura 4.1.



**Figura 4.1.** Probeta normalizada.

G – Longitud calibrada: 50.0 mm  $\pm$  0.1

W – Ancho: 12.5 mm  $\pm$  0.2

T – Espesor del material

R – Radio del filete, mín.: 12.5 mm

L – Longitud total, mín.: 200 mm

A – Longitud de la sección reducida, mín.: 57 mm

B – Longitud de la sección de sujeción, mín.: 50 mm

C – Ancho de la sección de sujeción, aproximado: 20 mm

Del ensayo de tracción de cada material interesan particularmente los valores de tensión de fluencia ( $\sigma_Y$ ), coeficiente de resistencia ( $K$ ) y exponente de endurecimiento por deformación ( $n$ ). Estos datos serán utilizados en este trabajo para el cálculo teórico del cociente de *springback* y para simulación numérica.

Para la caracterización de propiedades de conformado, durante el ensayo de tracción se determinan a menudo los valores  $r$  y  $n$ . El valor  $n$  determina el endurecimiento (aumento de la tensión) durante la deformación plástica hasta el alargamiento no uniforme o estricción. Se obtiene a partir de los datos de la fuerza de tracción y los valores del alargamiento. El valor  $r$  describe la anisotropía vertical. Para el valor  $r$  se mide adicionalmente la variación transversal de la probeta de tracción. Las probetas se extraen del fleje o la chapa de forma que guarden un ángulo determinado respecto al sentido de laminación.

El espesor de la chapa se mantiene como espesor de la probeta. La longitud paralela se obtiene mediante el estampado o el fresado con su mecanizado posterior.

Durante los ensayos de tracción, en la extensometría y medición transversal de las probetas, se combina un extensómetro digital del tipo *Macro* con un extensómetro transversal óptico. Dicha combinación se caracteriza por su gran robustez y un alto grado de automatización, así como el fácil manejo de las probetas. Ambos extensómetros miden hasta la rotura de las probetas.

### 4.3.2 Equipo

Se utilizó el equipo detallado a continuación:

Máquina de ensayo: ZWICK Z100/SN3A

Celda de carga: Fmax 100kN

Extensómetro principal: Zwick / Roell makroXtens II

Extensómetro transversal: Zwick / Roell videoXtens

Sujeción: grampas hidráulicas

Velocidad de ensayo aprox.: 20 mm/min. Control por desplazamiento hasta rotura de la probeta.

Software: Zwick testXpert II

### 4.3.3 Resultados

Para el presente Proyecto Final interesan particularmente los valores de tensión de fluencia ( $\sigma_Y$ ) y los parámetros que determinan el endurecimiento por deformación según la ley de la potencia: coeficiente de resistencia ( $K$ ) y exponente de endurecimiento por deformación ( $n$ ). Estos datos serán utilizados para el cálculo teórico del coeficiente de *springback* y para simulación numérica.

Se realizaron ensayos de tracción a dos probetas normalizadas por cada una de las 18 muestras de chapa. Esto se hizo para asegurar que las propiedades encontraran dentro de lo especificado para su calidad y espesor (Tabla 4.2), y no se registraran diferencias importantes por posibles inhomogeneidades de las chapas. Debido a que para las simulaciones numéricas y en los cálculos teóricos de *springback* se usan los datos de las curvas tensión-deformación y parámetros directamente dependientes de ellas ( $K$  y  $n$ ), no se promedian los valores de los dos ensayos de tracción sino que se elige aleatoriamente un ensayo y de éste se toman todos los resultados obtenidos.

Muestra	Calidad	Espesor (mm)	Tensión de fluencia $\sigma_Y$ (MPa)	n	K (MPa)
M1	E1	0,70	173	0,21	514,11
M2	E1	1,00	166	0,22	515,45
M3	E1	1,50	170	0,21	508,79
M4	E1	2,00	184	0,21	500,24
M5	E2	0,80	154	0,22	480,28
M6	E2	1,00	136	0,23	497,58
M7	E2	1,80	149	0,23	505,96
M8	E2	2,00	173	0,21	483,85
M9	E3	0,67	178	0,21	483,95
M10	E3	1,17	172	0,22	523,36
M11	E3	1,17	164	0,22	517,2
M12	E3	1,17	163	0,22	490,07

**Tabla 4.3.** Resultados de los ensayos de tracción. Calidades embutibles.

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados de los ensayos realizados a materiales de las calidades E1, E2 y E3. Se puede observar la combinación de tensión de fluencia baja y exponente  $n$  alto, lo que hace a estos materiales óptimos para el conformado por embutido profundo (*deep drawing*) y estampado.

Muestra	Calidad	Espesor (mm)	Tensión de fluencia $\sigma_Y$ (MPa)	n	K (MPa)
M13	R1	0,97	306	0,19	673,71
M14	R1	1,50	286	0,18	634,54
M15	R2	1,50	372	0,16	743,48
M16	R3	1,05	407	0,16	750,21
M17	R3	1,50	413	0,15	766,98
M18	R3	2,00	379	0,16	758,13

**Tabla 4.4.** Resultados de los ensayos de tracción. Calidades alto-resistenciales.

Los materiales de calidades alto-resistenciales (Tabla 4.4) combinan tensión de fluencia y  $K$  altos, mientras que tienen  $n$  bajos en comparación con los materiales de la Tabla 4.3. Esto los hace aptos para piezas finales que soporten altas tensiones o esfuerzos.

Se destaca que todos los valores obtenidos en los ensayos de tracción resultaron dentro de las especificaciones correspondientes para cada material y espesor. El coeficiente de resistencia ( $K$ ) no es especificado comúnmente en las fichas técnicas de proveedores de acero.

## 4.4 Análisis de microestructura

Se realizaron análisis de estructura metalográfica por microscopía óptica de las muestras en cortes longitudinales a la dirección de laminación. Fueron atacadas con Nital y se las analizó con aumentos de 128x y 256x.

Se determinó el tamaño de grano medio de cada muestra según la norma ASTM E112: “Método estándar para la determinación del tamaño de grano” [10].

También se analizaron las fases constituyentes, la orientación de la estructura, la relación de aspecto de los granos, y la cantidad, tamaño y distribución de carburos.

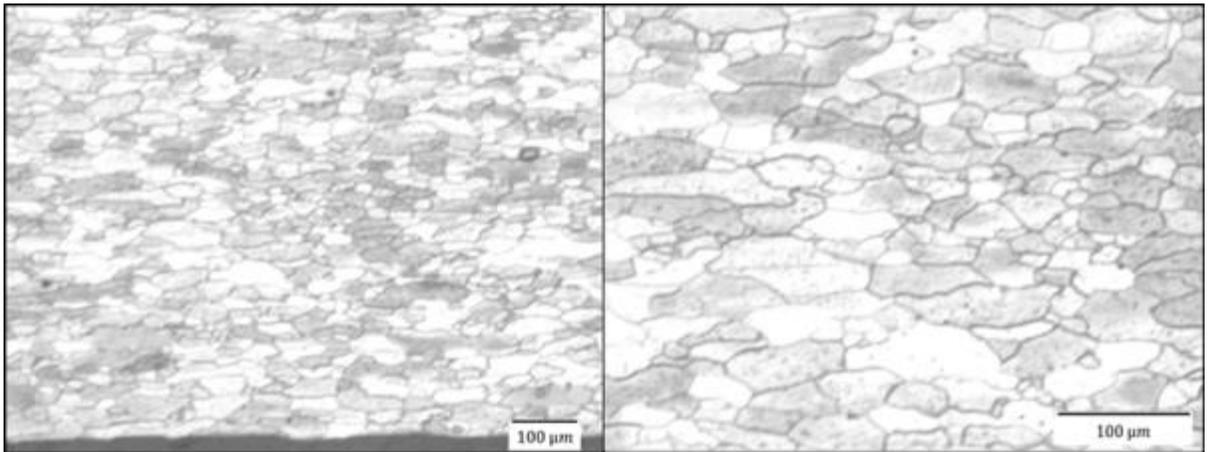
### 4.4.1 Resultados

A continuación se presentan dos micrografías en diferentes aumentos para una muestra de cada calidad analizada.

#### Calidad E1:

Estructura orientada en la dirección de laminación, constituida por granos de ferrita proeutectoide con carburos esféricos ubicados preferentemente en los bordes de granos.

Tamaño de grano: 6. Relación de aspecto: 2

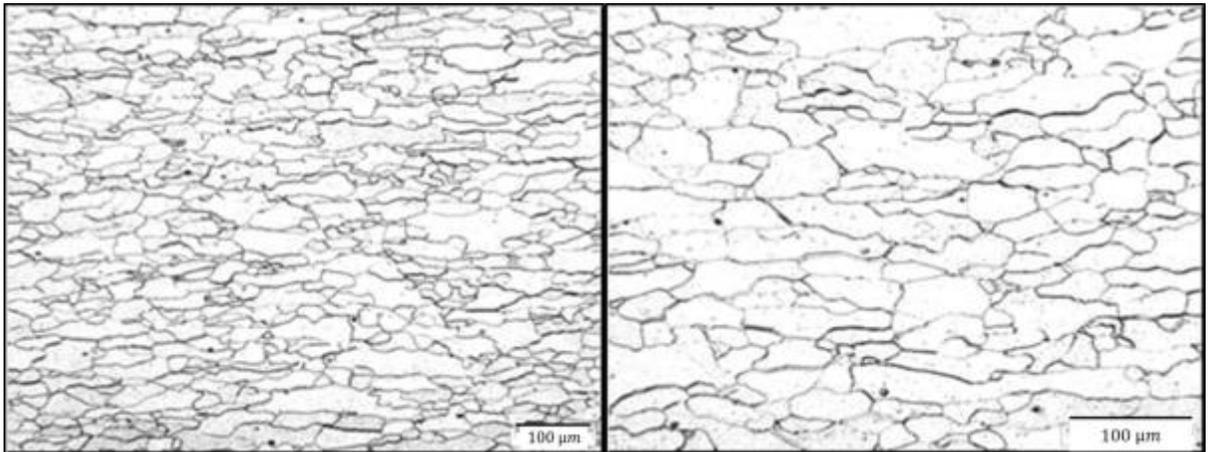


**Figura 4.1.** Microscopías 128x y 256x. Muestra 2, calidad E1.

**Calidad E2:**

Estructura orientada en la dirección de laminación, constituida por granos de ferrita proeutectoide con carburos esféricos y algunos bordes de grano con carburos continuos.

Tamaño de grano: 5/6. Relación de aspecto: 2

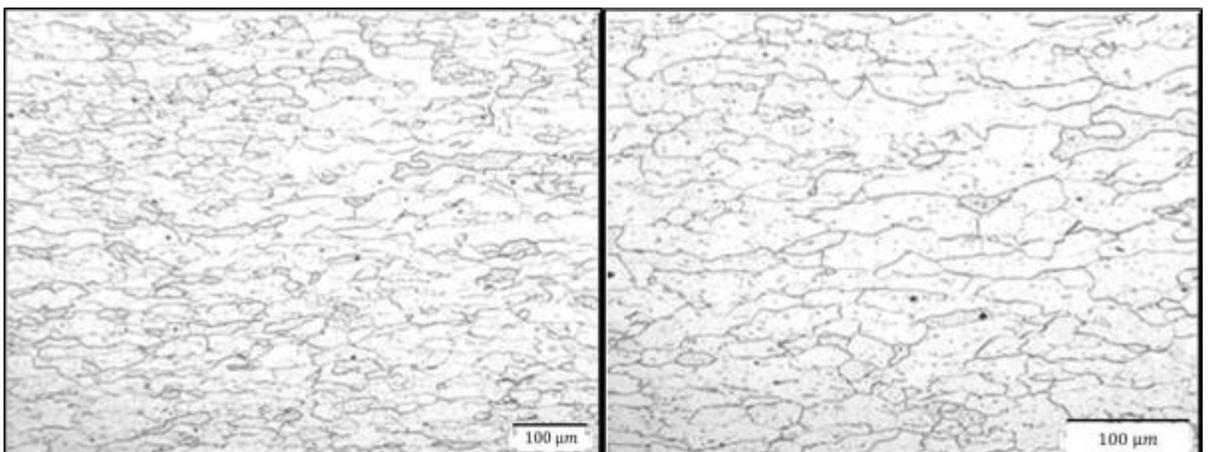


**Figura 4.2.** Microscopías 128x y 256x. Muestra 7, calidad E2.

**Calidad E3:**

Estructura orientada en la dirección de laminación, constituida por granos de ferrita proeutectoide con presencia de pequeños carburos esféricos dispersos.

Tamaño de grano: 5/6. Relación de aspecto: 1,5

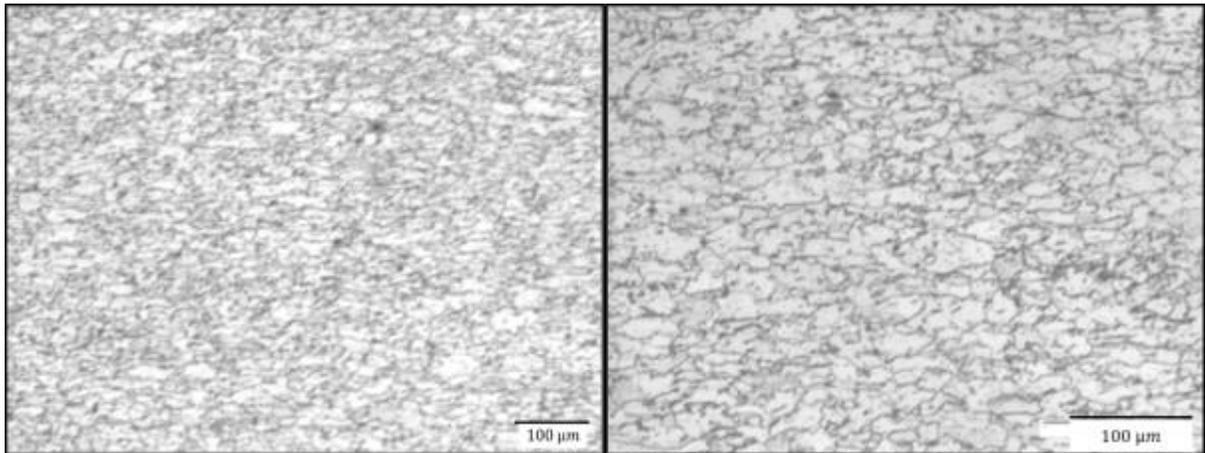


**Figura 4.3.** Microscopías 128x y 256x. Muestra 10, calidad E3.

**Calidad R1:**

Estructura orientada en la dirección de laminación, constituida por granos de ferrita proeutectoide con presencia de pequeños carburos esféricos dispersos.

Tamaño de grano: 7/8. Relación de aspecto: 1,5

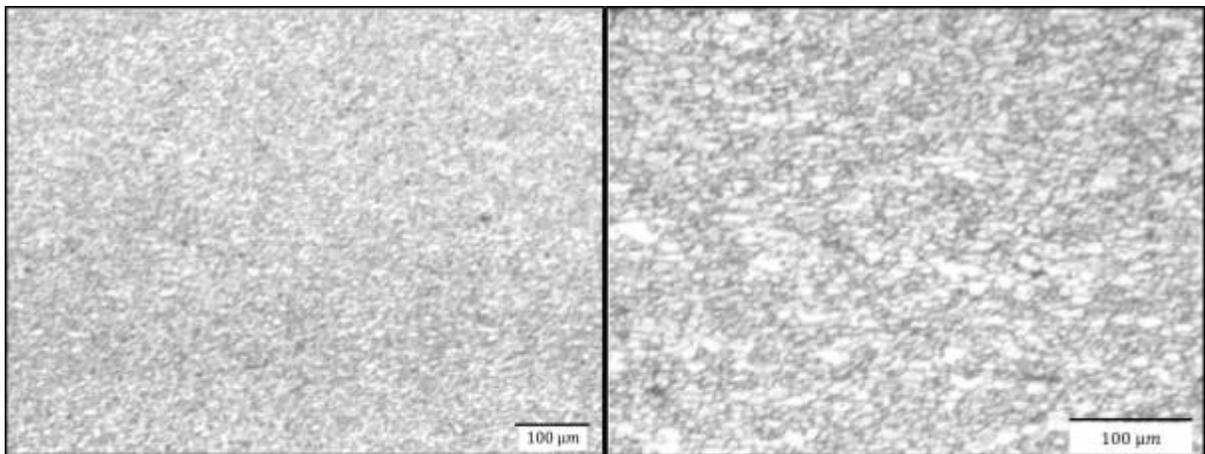


**Figura 4.4.** Microscopías 128x y 256x. Muestra 13, calidad R1.

**Calidad R2:**

Estructura orientada en la dirección de laminación, constituida por granos finos de ferrita proeutectoide con presencia de pequeños carburos esféricos dispersos.

Tamaño de grano: 7/8. Relación de aspecto: 1,5



**Figura 4.5.** Microscopías 128x y 256x. Muestra 15, calidad R2.

**Calidad R3:**

Estructura de granos finos de ferrita proeutectoide orientados en la dirección de laminación, con presencia de pequeños carburos esféricos dispersos.

Tamaño de grano: 8. Relación de aspecto: 1,5

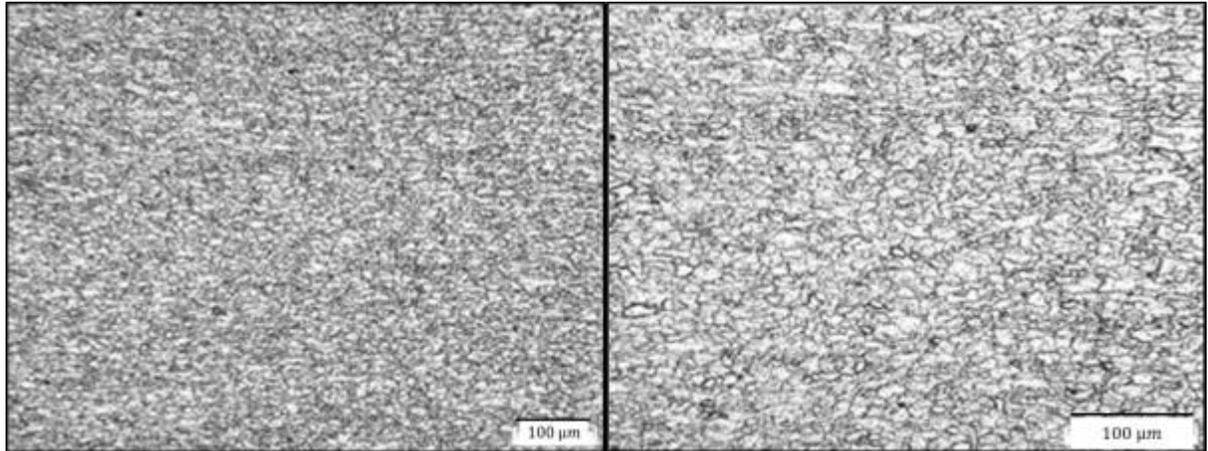


Figura 4.6. Microscopías 128x y 256x. Muestra 18, calidad R3.

## 4.5 Ensayo de springback

Se realizaron tres ensayos por cada muestra. En la Tabla 4.5 se informan las tres mediciones, el promedio de los ángulos de recuperación medidos y sus correspondientes errores absolutos (teniendo en cuenta las desviaciones estándar en las mediciones y el error asociado al aparato de ensayo [11]). Se utiliza el valor de ángulo promedio para calcular el cociente de *springback* según la fórmula (2-4).

Identificación	$\theta_f$ ensayo 1 (grados)	$\theta_f$ ensayo 2 (grados)	$\theta_f$ ensayo 3 (grados)	$\theta_f$ promedio (grados)	Error absoluto $\Delta\theta_f$	Cociente de <i>springback</i> $\eta$
M1	10	12	13	13.67	1.25	0.924074
M2	9	8	9	8.67	1.00	0.951852
M3	8	7	8	7.67	1.00	0.957407
M4	8	9	9	8.67	1.00	0.951852
M5	12	10	14	12.00	1.63	0.933333
M6	8	8	8	8.00	1.00	0.955556
M7	8	8	8	8.00	1.00	0.955556
M8	7	7	8	7.33	1.00	0.959259

<b>M9</b>	11	10	14	11.67	1.70	0.935185
<b>M10</b>	9	11	8	9.33	1.25	0.948148
<b>M11</b>	8	10	11	9.67	1.25	0.946296
<b>M12</b>	8	9	8	8.33	1.00	0.953704
<b>M13</b>	12	14	13	13.00	1.00	0.927778
<b>M14</b>	11	11	10	10.67	1.00	0.940741
<b>M15</b>	8	8	8	8.00	1.00	0.955556
<b>M16</b>	15	15	15	15.00	1.00	0.916667
<b>M17</b>	12	12	11	11.67	1.00	0.935185
<b>M18</b>	11	12	12	11.67	1.00	0.935185

**Tabla 4.5.** Resultados de los ensayos de *springback*.

## 4.6 Cálculos teóricos de *springback*

A partir de las ecuaciones **SP1**, **SP2**, y **SP3** presentadas en el Capítulo 3, se calcularon los ángulos de recuperación y cocientes de *springback* para las muestras ensayadas anteriormente. Es decir, se utilizaron los datos de espesor de muestra medidos, y de tensión de fluencia  $\sigma_Y$ , coeficiente de resistencia  $K$  y exponente de endurecimiento por deformación  $n$  obtenidos en cada ensayo de tracción (Tablas 4.3 y 4.4).

Por la disposición del ensayo de *springback* por plegado 180°, se tiene que la dirección circunferencial  $\theta$  es una dirección principal de tensiones y deformaciones. Considerando deformación plana, se tomó para la ecuación **SP1** la tensión de fluencia equivalente de von Mises en la dirección  $\theta$ , esto es  $\sigma_\theta = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_Y$ , donde  $\sigma_Y$  es la tensión de fluencia uniaxial obtenida del ensayo de tracción realizado al material [12].

Además, se tomó el módulo elástico  $E$  del acero como 210 GPa, y el coeficiente de Poisson  $\nu$  como 0.3.

Identificación	Ec. SP1		Ec. SP2		Ec. SP3	
	$\theta_f$ (grados)	Cociente de <i>springback</i> $\eta$	$\theta_f$ (grados)	Cociente de <i>springback</i> $\eta$	$\theta_f$ (grados)	Cociente de <i>springback</i> $\eta$
<b>M1</b>	8.58	0.952344	11,16	0,938000	11,16	0,937997
<b>M2</b>	5.83	0.967611	8,22	0,954327	8,22	0,954326
<b>M3</b>	4.06	0.977460	6,20	0,965571	6,20	0,965571
<b>M4</b>	3.36	0.981357	4,93	0,972630	4,93	0,972630
<b>M5</b>	6.71	0.962731	9,06	0,949657	9,06	0,949656
<b>M6</b>	4.78	0.973463	7,66	0,957454	7,66	0,957453

<b>M7</b>	3.00	0.983350	5,07	0,971836	5,07	0,971836
<b>M8</b>	3.16	0.982472	4,77	0,973526	4,77	0,973526
<b>M9</b>	9.21	0.948834	10,87	0,939637	10,87	0,939635
<b>M10</b>	5.20	0.971128	7,42	0,958762	7,42	0,958761
<b>M11</b>	4.96	0.972471	7,34	0,959247	7,34	0,959247
<b>M12</b>	4.93	0.972638	6,95	0,961385	6,95	0,961384
<b>M13</b>	11.06	0.938544	12,25	0,931968	12,25	0,931963
<b>M14</b>	6.82	0.962085	8,50	0,952760	8,50	0,952758
<b>M15</b>	8.88	0.950691	10,62	0,941007	10,62	0,941003
<b>M16</b>	13.63	0.924277	14,25	0,920834	14,25	0,920820
<b>M17</b>	9.85	0.945261	11,31	0,937171	11,31	0,937164
<b>M18</b>	6.91	0.961606	8,64	0,952009	8,64	0,952007

**Tabla 4.6.** Valores de *springback* calculados teóricamente.

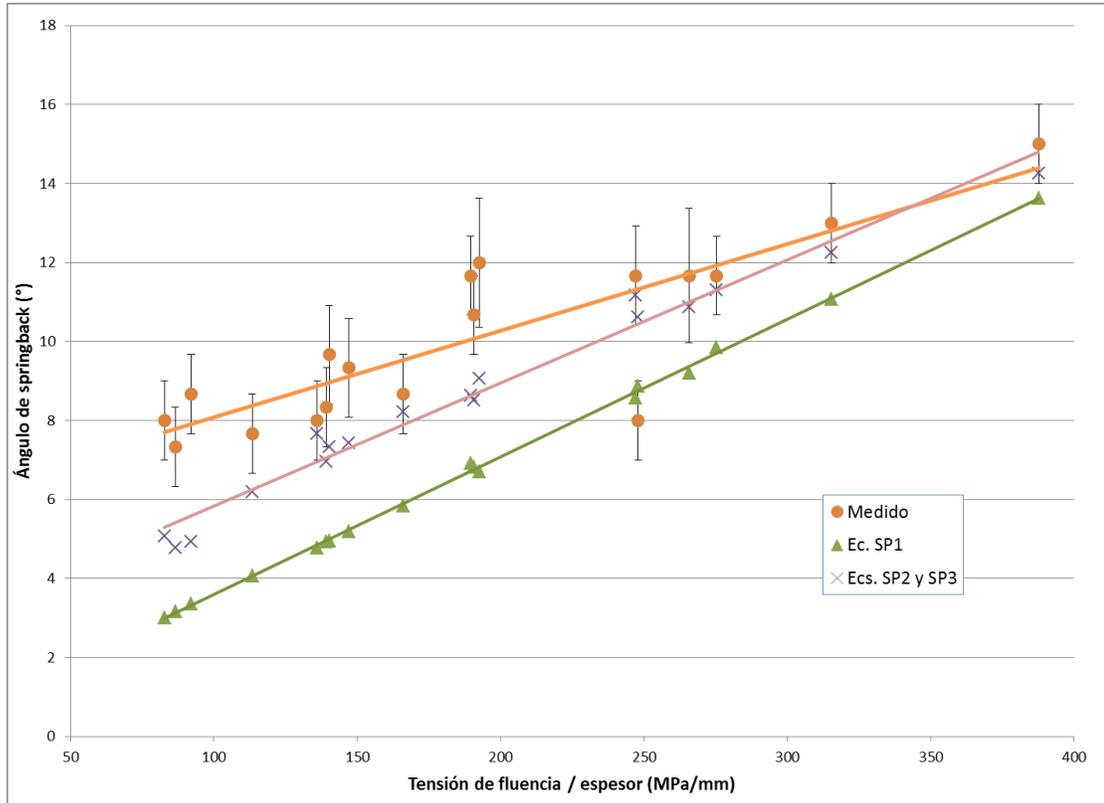
En la Tabla 4.6 se presentan los valores calculados. Se observa que los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones **SP2** y **SP3** son muy próximos, y en todos los casos los ángulos son mayores a los obtenidos con la ecuación **SP1**.

## 4.7 Discusión del capítulo

En la Figura 4.7 se pueden observar los valores de ángulo de *springback* medidos experimentalmente y los calculados por las tres ecuaciones teóricas. Como se dijo antes, la recuperación elástica en el doblado se relaciona directamente con la tensión de fluencia y el espesor del material. Por esto, se elige usar el cociente  $\sigma_y/\text{espesor}$  como abscisa al graficar los valores de *springback*. De esta manera se puede ver claramente que los resultados obedecen una relación lineal.

Los resultados calculados con las ecuaciones **SP2** y **SP3** no presentaron variaciones significativas entre ellos, por lo que se los graficó en una misma serie de puntos.

Los resultados experimentales son los valores promedio de tres ensayos, por lo que se graficaron con barras de error, representando sus correspondientes errores absolutos.



**Figura 4.7.** Ángulos de *springback*. Resultados experimentales y calculados.

Se puede observar en la Figura 4.7 que las ecuaciones **SP2** y **SP3** aproximan mejor que la **SP1** los resultados experimentales de la recuperación elástica en el plegado de 180° de chapas de acero. Si se consideran las líneas de tendencia, se puede decir que las tres aproximaciones son mejores para relaciones altas de *tensión de fluencia / espesor*.

En la Tabla 4.8 se presentan las diferencias entre los ángulos medidos experimentalmente y los calculados a partir de las ecuaciones teóricas. Se puede ver que las ecuaciones **SP2** y **SP3** mejoran la predicción de **SP1** aproximadamente en un 50%. Tomando un promedio de los 18 casos estudiados en este trabajo, se determina que las ecuaciones **SP2** y **SP3** aproximan los valores experimentales de ángulo de *springback* con un error de 1.72°. Las mayores diferencias con los valores experimentales se presentan generalmente para chapas con relaciones bajas de *tensión de fluencia / espesor*, llegando a ser del 3.74°. La tendencia hacia mejores predicciones se dio para los casos con relaciones medias y altas de *tensión de fluencia / espesor*, teniendo sólo 0.36° de diferencia en la mejor aproximación al ángulo de *springback* experimental.

Experimental		Ec. SP1		Ecs. SP2 y SP3	
Muestra	$\theta_f$ (grados)	$\theta_{SP1}$ (grados)	$ \theta_f - \theta_{SP1} $ (grados)	$\theta_{SP2-3}$ (grados)	$ \theta_f - \theta_{SP2-3} $ (grados)
M1	11.67	8.58	3.09	11.16	0.51
M2	8.67	5.83	2.84	8.22	0.45
M3	7.67	4.06	3.61	6.20	1.47
M4	8.67	3.36	5.31	4.93	3.74
M5	12.00	6.71	5.29	9.06	2.94
M6	8.00	4.78	3.22	7.66	0.34
M7	8.00	3.00	5.00	5.07	2.93
M8	7.33	3.16	4.18	4.77	2.57
M9	11.67	9.21	2.46	10.87	0.80
M10	9.33	5.20	4.14	7.42	1.91
M11	9.67	4.96	4.71	7.34	2.33
M12	8.33	4.93	3.41	6.95	1.38
M13	13.00	11.06	1.94	12.25	0.75
M14	10.67	6.82	3.84	8.50	2.16
M15	8.00	8.88	0.88	10.62	2.62
M16	15.00	13.63	1.37	14.25	0.75
M17	11.67	9.85	1.81	11.31	0.36
M18	11.67	6.91	4.76	8.64	3.03
Promedio →			3.44		1.72

**Tabla 4.8.** Diferencia entre ángulos de *springback* experimentales y calculados teóricamente.

En la Tabla 4.9 se volcaron los valores de cociente de springback calculados mediante la Ec. 2-4 y los ángulos de la Tabla 4.8. Se puede ver que el error promedio en el cociente de springback predicho por las ecuaciones **SP2** y **SP3** con respecto al resultante de las mediciones experimentales es del 1.01%. Se observa que las predicciones teóricas de las ecuaciones son mejores a mayores relaciones de *tensión de fluencia / espesor*, en forma consistente con lo discutido anteriormente en este trabajo.

Resulta destacable luego de este análisis la ecuación **SP3**. Como se mostró, predice el cociente de springback del ensayo 180° con un error del 1%. Además, es una ecuación mucho más simple que la **SP2**, y utiliza los parámetros  $K$  y  $n$  de la Ley de la potencia, que se obtienen en forma sencilla en un ensayo de tracción.

Experimental		Ec. SP1		Ecs. SP2 y SP3	
Muestra	$\eta$	$\eta$	% error	$\eta$	% error
1	0.935185	0.952344	1.84	0.938000	0.30
2	0.951852	0.967611	1.66	0.954327	0.26
3	0.957407	0.977460	2.09	0.965571	0.85
4	0.951852	0.981357	3.10	0.972630	2.18
5	0.933333	0.962731	3.15	0.949657	1.75
6	0.955556	0.973463	1.87	0.957454	0.20
7	0.955556	0.983350	2.91	0.971836	1.70
8	0.959259	0.982472	2.42	0.973526	1.49
9	0.935185	0.948834	1.46	0.939637	0.48
10	0.948148	0.971128	2.42	0.958762	1.12
11	0.946296	0.972471	2.77	0.959247	1.37
12	0.953704	0.972638	1.98	0.961385	0.81
13	0.927778	0.938544	1.16	0.931968	0.45
14	0.940741	0.962085	2.27	0.952760	1.28
15	0.955556	0.950691	0.51	0.941007	1.52
16	0.916667	0.924277	0.83	0.920834	0.46
17	0.935185	0.945261	1.08	0.937171	0.21
18	0.935185	0.961606	2.83	0.952009	1.80
			<b>2.02</b>		
				<b>1.01</b>	

**Tabla 4.9.** Diferencia entre *springback* experimental y calculado teóricamente.

Hasta aquí se analizó el fenómeno de recuperación elástica en el plegado de chapas a partir de un ensayo experimental y el cálculo con ecuaciones teóricas.

Un aspecto muy importante desde un punto de vista profesional es la posibilidad de modificar las características del material, las dimensiones o la tipología de carga, lo que permitiría mejorar el producto final sin tener que realizar procesos de prueba y error y, por lo tanto, reducir costos.

Debido a la limitación de las técnicas experimentales para medir las tensiones internas, y la dificultad que tiene la resolución de las ecuaciones no lineales que rigen el comportamiento de los materiales en el estado elastoplástico, se hace necesaria la utilización de técnicas de simulación numérica por elementos finitos que puedan replicar lo que ocurre en el ensayo de *springback* por plegado 180°.

Una vez que se tienen los resultados de cálculos teóricos y los experimentales, si estos concuerdan con los obtenidos por elementos finitos, se podría validar el proceso de simulación numérica.

## 4.8 Conclusiones

- Los diferentes materiales estudiados, grupo de materiales alto-resistenciales y materiales embutibles, pudieron ser analizados mediante las mismas metodologías ya que el parámetro de comparación se fijó en tensión de fluencia / espesor de chapa.
- Las ecuaciones que modelan el comportamiento de springback usando parámetros de la ley de la potencia, no presentaron variaciones significativas entre ellas. Estas ecuaciones aproximaron un 50% mejor los resultados experimentales que la ecuación teórica que considera un comportamiento de material elástico – completamente plástico.
- La ecuación nombrada en este trabajo como **SP3** resulta muy interesante ya que es una expresión simple que, usando datos típicos del ensayo de tracción de los materiales, logra predecir el cociente de springback en el plegado de 180° de chapas de acero con un error aceptable (1.01% en promedio de los casos estudiados).
- Todas las ecuaciones teóricas planteadas aproximaron mejor el comportamiento de springback para relaciones altas de tensión de fluencia / espesor de chapa.

## **5. Implementación del modelo de elementos finitos**

### **5.1 Introducción**

En esta sección se presentan el programa numérico empleado para las simulaciones, el método de análisis, las definiciones del modelo y sus partes constituyentes, el tipo de elementos, el mallado y la asignación de los correspondientes materiales a las partes, los contactos, las condiciones de contorno, la estructura de las simulaciones, y las consideraciones importantes para el ingreso de datos, la verificación de la validez del modelo y el análisis de los resultados.

### **5.2 Abaqus. Discusión del problema**

Para la simulación del estudio de la recuperación elástica en la flexión de chapas se utilizó el software comercial de elementos finitos Abaqus.

Abaqus es un programa de cálculo por elementos finitos de propósito general, con capacidad para resolver problemas de mecánica del sólido, lineales y no lineales, estáticos y dinámicos. Incluye modelos de material de tipo elastoplástico y viscoplástico, entre otros. En lo que se refiere a problemas de no linealidad geométrica incluye formulaciones para grandes deformaciones y problemas de contacto. Incluye también formulaciones acopladas sólido-fluido en los que el fluido es un medio independiente con una interfase de contacto con el medio sólido. Además tiene capacidad para resolver problemas de análisis piezoeléctrico, de transmisión de calor, de difusión de masa y de análisis termoeléctrico acoplado.

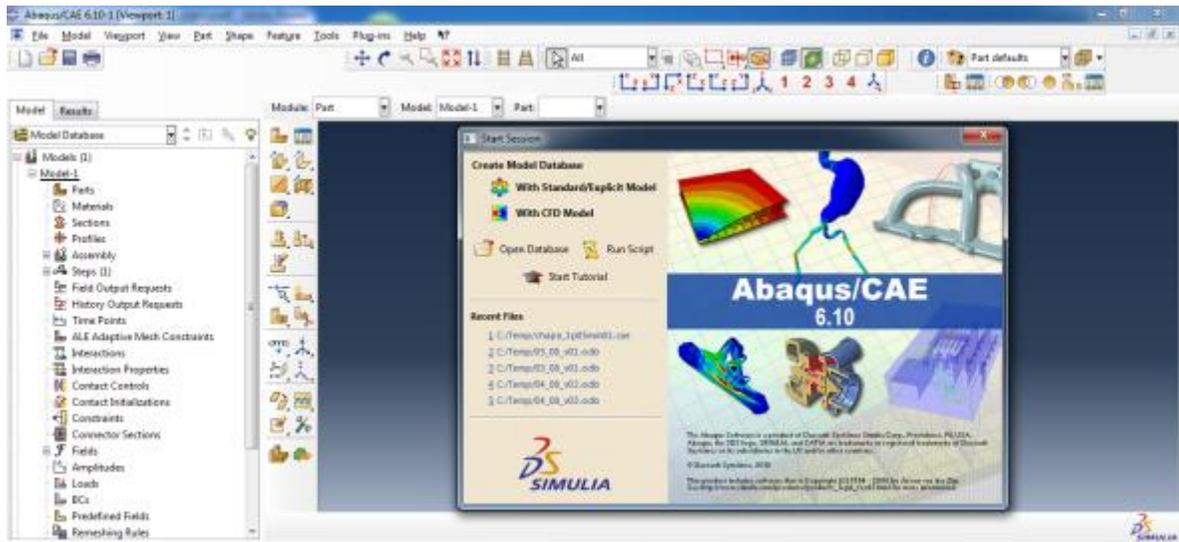


Figura 5.1. Ventana principal de Abaqus.

El problema de este Proyecto Final puede ser considerado como un problema cuasi-estático, en el que los efectos inerciales pueden ser despreciados frente a los de la fuerza aplicada.

Es importante aclarar que para el análisis del problema mediante un modelo 2D se consideró la hipótesis de deformación plana. Esto implica la ausencia de flujo de material en la dirección perpendicular al plano de estudio, y que el flujo en cada plano paralelo a la sección simulada es idéntico. Por lo tanto, se tendrá en todas las secciones el mismo estado tensional.

La principal característica del problema es su alta no linealidad, debida a las siguientes características:

- La geometría sufre grandes desplazamientos y deformaciones, experimentando importantes cambios con respecto a la geometría inicial del modelo.
- El material tiene un comportamiento elastoplástico.
- El contacto entre la chapa, la matriz y el rodillo.

### 5.3 Problema Explícito

Existen dos formas de abordar este análisis: mediante una formulación explícita o una implícita. Ambos son métodos numéricos para la resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias variables en el tiempo y ecuaciones diferenciales parciales.

La formulación implícita es más eficiente desde el punto de vista computacional, pero no es tan versátil como la explícita (puede presentar problemas de convergencia) a la hora de tratar con problemas altamente no lineales.

Luego de algunas pruebas preliminares, se optó por utilizar la formulación explícita en este trabajo.

La formulación explícita es un método de integración de las ecuaciones del movimiento a lo largo del tiempo, en el que las variables del movimiento en el instante  $t$  se conocen a partir de las mismas en un instante anterior (algoritmo de diferencias centradas). Usando esta técnica se pueden calcular las variables del movimiento en cada momento sin iteraciones.

El incremento de tiempo estable entre iteración e iteración en Abaqus / Explicit es muy pequeño, del orden del tiempo que tardan las ondas de presión en propagarse de un nodo al siguiente en el modelo.

$$\Delta t = \frac{L^e}{c_d}, \quad c_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (5-1)$$

$L^e$  = longitud característica del elemento

$c_d$  = velocidad de onda dilatacional

$E$  = módulo elástico

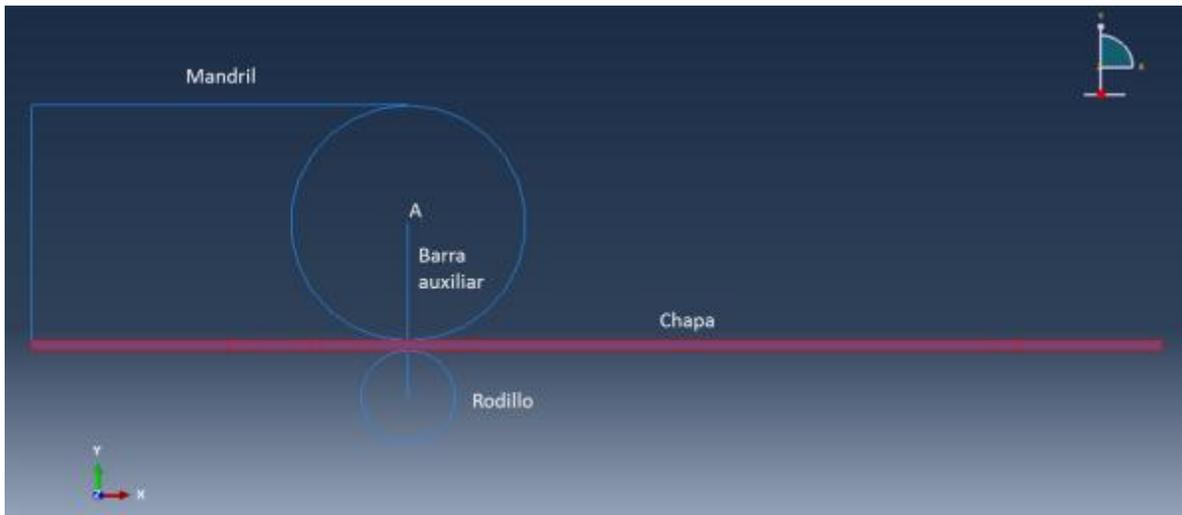
$\rho$  = densidad del material

El límite de estabilidad del modelo depende de la velocidad de la onda de dilatación a través del material. En un material de respuesta lineal, la velocidad de la onda es constante; por lo tanto, los únicos cambios en el límite de estabilidad durante el análisis son el resultado de cambios en la dimensión del elemento más pequeño durante el análisis. En un material no lineal, tal como un metal con plasticidad, la velocidad de onda varía a medida que se produce la fluencia y la rigidez del material cambia.

Abaqus / Explicit monitorea las velocidades de onda efectivas en el modelo a lo largo del análisis, y el estado actual del material en cada elemento se utiliza para las estimaciones de estabilidad. Después de la fluencia, la rigidez disminuye, reduciendo la velocidad de onda y, en consecuencia, aumentando el límite de estabilidad.

## 5.4 Modelo

Para las simulaciones en Abaqus se modela el aparato utilizado para el ensayo de *springback* como se muestra en la siguiente figura.



**Figura 5.2.** Modelo del ensayo de *springback*.

En este modelo bidimensional, que se observa en la Figura 5.2, además de la chapa sobre la que se estudiará el *springback*, se presentan tres partes funcionales: un mandril de punta semicilíndrica, un rodillo cilíndrico y una barra auxiliar.

El mandril se encuentra fijo. En el eje central de su punta se fija un extremo de la barra auxiliar, permitiendo únicamente el giro de la misma en el plano  $xy$ , alrededor del punto A. El rodillo se une desde su eje central al otro extremo de la barra, permitiendo tanto el giro sobre su eje como la traslación en el plano  $xy$ .

La chapa se ubica entre el mandril y el rodillo, en contacto con los mismos. Presenta un tramo unido a la base del mandril y el resto libre para moverse en el plano  $xy$ .

El funcionamiento del modelo es el siguiente:

- Antes de comenzar con el giro del rodillo flector, la barra auxiliar se contrae longitudinalmente por efecto de un enfriamiento localizado, simulando la fuerza del resorte interno en el sistema de ajuste del rodillo mostrado en la Figura 2.6.

- En una primera etapa, se impone el giro de  $180^\circ$  de la barra auxiliar alrededor del punto A en sentido anti horario a velocidad constante. Esto obliga al cilindro a realizar una trayectoria semicircular hasta la parte superior del mandril, doblando  $180^\circ$  a la chapa en su recorrido en un tiempo de 2 segundos.

- Inmediatamente finalizada la primera etapa, comienza una segunda etapa en la que se impone a la barra el giro horario de  $180^\circ$  a velocidad constante, regresando el cilindro a su posición inicial en 2 segundos. El rodillo tiene libertad para girar sobre su eje por lo que, tanto en la “ida” como en la “vuelta”, la rodadura o el deslizamiento del rodillo sobre la chapa será consecuencia del roce entre ellos y de la deformación de la chapa a cada instante.

- En una tercera etapa se espera que la chapa amortigüe sus oscilaciones para luego medir el ángulo de *springback*.

### 5.4.1 Unidades

Antes de empezar a definir este o cualquier modelo se debe definir qué sistema de unidades se utilizará. En Abaqus no se especifica la unidad correspondiente a cada magnitud al momento de ingresarla como dato. Por lo tanto, se debe trabajar con unidades consistentes y considerarlas tanto para el ingreso de datos como para la correcta interpretación de los resultados.

Para este Proyecto Final se ha elegido trabajar con el Sistema Internacional (SI). Esto se muestra en la Tabla 5.1.

Entidad	Unidad en SI
Longitud	m
Fuerza	N
Masa	kg
Tiempo	s
Tensión	Pa (N/m <sup>2</sup> )
Energía	J
Densidad	kg/m <sup>3</sup>

Tabla 5.1. Unidades consistentes en SI.

### 5.4.2 Chapa

La chapa es el objeto de estudio de este modelo. Se la define como “2D Shell deformable”.

➤ **Dimensiones:**

Una vez definidas las características iniciales, se pasa a definir la geometría mediante la herramienta de CAD que posee el software.

Largo total: 0.12m

Espesor: dependiente de cada caso.



**Figura 5.3.** Croquis: chapa.

Las subdivisiones que se muestran en la Figura 5.3 son únicamente por motivos de mallado y condiciones de contorno de la chapa, y serán explicadas más adelante.

### ➤ **Mallado**

Una vez creada la geometría, se utiliza un procedimiento para definir y dividir el modelo en "pequeños" elementos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. En general, un modelo de elementos finitos está definido por una malla, la cual está conformada por elementos y nodos. Los nodos representan puntos en los cuales se calcula el desplazamiento (análisis estructural). El programa de análisis enumera los nodos como una herramienta de identificación. Los elementos están determinados por conjuntos de nodos, y definen propiedades localizadas de masa y rigidez. Los elementos también están definidos por la numeración de la malla, la cual permite referenciar la correspondiente deflexión o esfuerzo (en análisis estructural) para una localización específica.

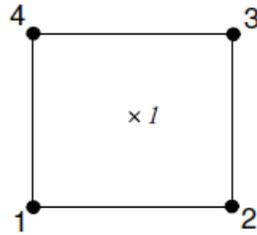
La densidad de la malla puede variar a través del material, en función por ejemplo del cambio esperado en los niveles de esfuerzos de un área en particular. Las partes que experimentan grandes cambios de tensión por lo general requieren una densidad de malla superiores a los que experimentan pocos o ningún esfuerzo.

En Abaqus, sólo las partes deformables deben ser malladas. Para este modelo solamente interesa el mallado de la chapa.

### **Selección del tipo de elementos**

Por la geometría del problema analizado en este Proyecto Final, la bibliografía recomienda el uso de elementos lineales para su resolución mediante el método explícito con contacto.

Se utiliza para mallar la chapa el tipo de elemento CPS4R: cuadriláteros de cuatro nodos de tensión plana bilineal, con integración reducida en un punto y control de "hourglass", como se muestra en la Figura 5.4.



**Figura 5.4.** Elemento CPS4R y su punto de integración.

El “*hourglassing*” es un problema numérico propio de los elementos lineales de integración reducida, a consecuencia del cual tienden a ser demasiado flexibles.

Si se considera un único elemento de integración reducida modelando una pequeña pieza de material sometido a flexión pura, el material se distorsionará como se muestra en la Figura 5.5.



**Figura 5.5.** Deformación de material sujeto a un momento flector M.

La línea inicialmente paralela al eje 1 se curva y la línea que atraviesa el espesor se mantiene recta.

Los bordes de un elemento lineal no son capaces de curvarse; por lo tanto, si se modela la pequeña pieza de material usando un único elemento, su estado deformado es como se muestra en la Figura 5.6.



**Figura 5.6.** Deformación de un elemento lineal con integración reducida sujeto a un momento flector M.

Ninguna de las líneas puntuadas que pasan por el punto de integración ha cambiado en longitud, y el ángulo entre ellas tampoco cambió, lo que significa que todos los componentes de tensión en el único punto de integración del elemento son cero.

Por lo tanto, este modo de deformación en la flexión es un modo de energía nula, ya que esta distorsión del elemento no genera energía de deformación. El elemento no es capaz de resistir este tipo de deformación dado que no tiene rigidez en este modo. En mallas gruesas, este modo de energía nula puede propagarse a través de la malla, produciendo resultados no significativos.

Para limitar la propagación de los modos *hourglass*, en Abaqus / Explicit se introduce una pequeña cantidad de “rigidez de *hourglass*” artificial en los elementos de integración reducida de primer orden. Esta rigidez resulta más efectiva para limitar los modos *hourglass* cuantos más elementos se usan en el modelo, lo que significa que los

elementos lineales de integración reducida pueden dar resultados aceptables mientras se use una red razonablemente fina. Los errores que se ven con mallas finas de elementos lineales de integración reducida caen dentro de un rango aceptable para muchas aplicaciones. Estos resultados sugieren que se deben usar al menos cuatro elementos a través del espesor cuando se modela con este tipo de elemento cualquier estructura afectada a cargas de flexión.

En el mallado, se procura utilizar elementos lo más pequeños posible. De esta manera se asegura que el problema converja y que se pueda obtener una solución precisa. Pero al mismo tiempo debe considerarse el gasto computacional y el tiempo de resolución al momento de elegir una malla.

### Descripción y criterios de mallado

En el mallado de la chapa se definen elementos de dimensiones **a** y **b** en el sentido del espesor y del largo de la chapa, respectivamente.

Para evitar un estado de cargas antisimétrico que produzca desplazamientos no deseados del modelo, se usa un número par de elementos a través del espesor de la chapa. Así, **Espesor** =  $2 \times n \times a$ , donde **n** será la cantidad de veces que se repita el elemento a través del semi-espesor. Esta discretización del espesor se aplicará de forma pareja a toda la longitud de la chapa.

Como se aclaró anteriormente, para evitar errores por *hourglass* se deben usar al menos cuatro elementos a través del espesor cuando se modela con elementos lineales de integración reducida cualquier estructura afectada a cargas de flexión. Por lo tanto, se debe tomar  $n \geq 2$ .

Para especificar un valor óptimo de **n** aplicable a todas las simulaciones se analizan tanto los resultados obtenidos (ángulos de *springback*) como el costo computacional de las simulaciones (tiempo empleado en cada simulación).

Al realizar el mallado de las chapas, se decidió dividir las longitudinalmente en zonas según la criticidad por los diferentes estados de tensiones y deformaciones a los que se ven sometidas y especificar un refinamiento acorde de la malla. De esta manera, se reduce notablemente el tiempo de cómputo.

En la Figura 5.7 se indican las zonas de mallado, sus longitudes y la longitud total de chapa.

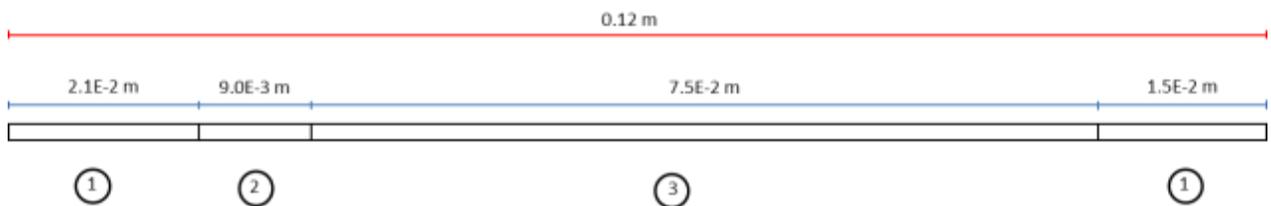


Figura 5.7. Chapa. Zonas de mallado y longitudes.

El grado de criticidad de las zonas aumenta de 1 a 3; por lo tanto, el tamaño de elemento elegido para la malla disminuye en el mismo sentido.

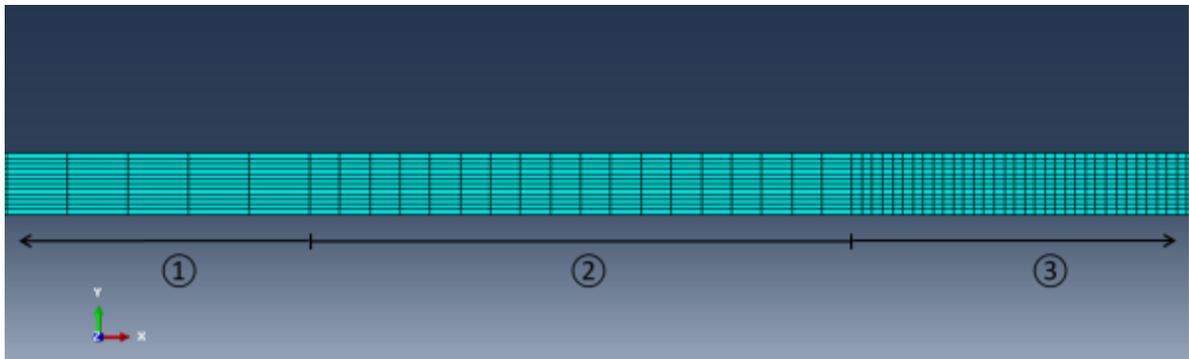
La zona 3 es la más crítica y es donde se producirá la totalidad de la deformación plástica de la chapa. Por este motivo, se especifica un elemento de malla más pequeño en esta zona.

Habiendo definido en un paso anterior la altura del elemento ( $a = \frac{\text{Espesor}}{2n}$ ), se toma un valor de largo  $b = 2 \times a$  para que la relación de aspecto de los elementos se mantenga constante en todas las simulaciones, a pesar de trabajar con chapas de diferente espesor.

En la Figura 5.8 se muestra un sector de chapa en la que se ven tres tamaños de elementos, correspondientes a diferentes zonas de mallado. Como se comentó anteriormente, la altura de los elementos (en el sentido del espesor de la chapa, dirección Y) es  $a = \frac{\text{Espesor}}{2n}$ , constante para todas las zonas. Mientras que el largo  $b$  varía según la zona de mallado:

$$\text{Zona 1: } b = 0.001m \quad ; \quad \text{Zona 2: } b = 0.0005m \quad ; \quad \text{Zona 3: } b = 2 \times a$$

Para especificar una malla en Abaqus, ingresando en el módulo “Mesh”, se selecciona la parte a mallar y, utilizando a los comandos que proporciona el programa, se aplica la malla a la parte correspondiente siguiendo las indicaciones.



**Figura 5.8.** Mallado diferencial sobre una chapa.

## ➤ Materiales

Para cada simulación se especifican las propiedades de material de la chapa a partir de los datos del ensayo de tracción realizado a ese material en particular.

En Abaqus, se ingresan para la chapa por un lado los valores constantes de densidad, coeficiente de Poisson y módulo de elasticidad (tomados de las especificaciones técnicas), y por otro los datos de tensiones y deformaciones a partir del punto determinado como el comienzo de la fluencia (tomados de ensayos de tracción de cada material).

**Valores constantes para acero al carbono:**

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 0.3$$

$$E = 2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

**Datos de plasticidad:**

Se elige en el programa el comportamiento plástico de la chapa según el modelo “clásico de plasticidad de metal”. Este modelo considera:

- **Elasticidad isotrópica.** Las propiedades elásticas están completamente definidas por el módulo de Young,  $E$ , y el coeficiente de Poisson,  $\nu$ . El módulo de corte,  $G$ , puede ser expresado en términos de  $E$  y  $\nu$  como  $G = E/(1 + \nu)$ .
- **Fluencia isotrópica.** Para esto, se usa una superficie de fluencia de Mises (supone que la fluencia del metal es independiente del esfuerzo de presión equivalente), que se define dando el valor de tensión de fluencia uniaxial como una función de la deformación plástica uniaxial equivalente.
- **Endurecimiento isotrópico**, que significa que la superficie de fluencia cambia su tamaño uniformemente en todas las direcciones de modo tal que la tensión de fluencia aumenta (o disminuye) en todas las direcciones de tensión a medida que ocurre la deformación plástica.

Al especificar los datos de plasticidad en Abaqus se debe trabajar con tensiones y deformaciones reales. Mientras que para pequeñas deformaciones existen pocas diferencias entre los valores nominales y reales, hay diferencias muy significativas para valores mayores de deformación; por lo tanto, es extremadamente importante proveer los datos de tensión-deformación apropiados al programa si las deformaciones en la simulación van a ser grandes.

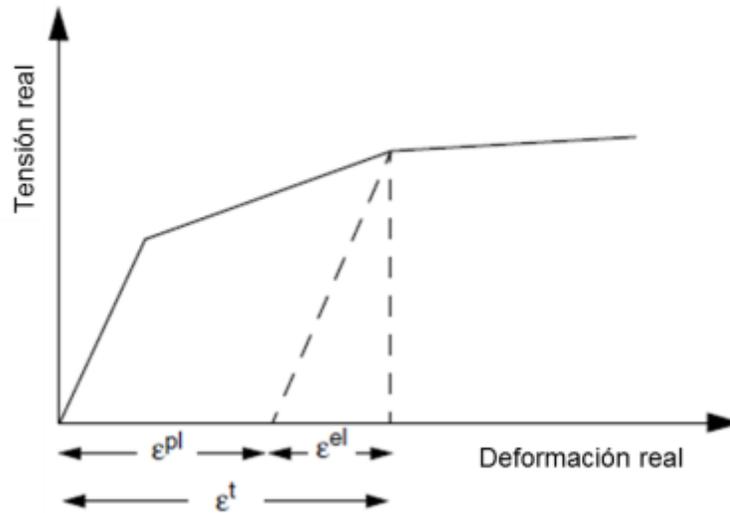
Generalmente, los datos de ensayos de tracción se suministran usando valores de tensión y deformación nominales (o ingenieriles). Tal es el caso de este Proyecto, en el que se debieron usar las ecuaciones presentadas a continuación para convertir la información de plasticidad de valores de tensión-deformación nominal a tensión-deformación real.

El modelo clásico de plasticidad de metal en Abaqus especifica el comportamiento post-fluencia para la mayoría de los metales. Abaqus aproxima el comportamiento tensión-deformación del material con una serie de líneas rectas uniendo los puntos de datos proporcionados. Se puede usar cualquier cantidad de puntos para aproximar el comportamiento real del material; por lo tanto, se puede conseguir una aproximación muy cercana al comportamiento real.

Los datos de plasticidad especifican la tensión de fluencia real como una función de la deformación plástica real. El primer par de datos ingresado define la tensión de

fluencia inicial del material y, por lo tanto, debe tener un valor de deformación plástica igual a cero.

Los datos de deformaciones extraídos de un ensayo de tracción no corresponden a la deformación plástica sino a la deformación total del material. Entonces, se deben descomponer esas deformaciones totales en las componentes de deformación elástica y plástica (Figura 5.9). La deformación plástica se obtiene restando la deformación elástica (el valor de tensión real dividido el módulo elástico) al valor de deformación total.



**Figura 5.9.** Descomposición de la deformación total en componentes elástica y plástica.

Esta relación se escribe

$$\varepsilon^{pl} = \varepsilon^t - \varepsilon^{el} = \varepsilon^t - \sigma/E, \quad (5-2)$$

donde

$\varepsilon^{pl}$  es la deformación real plástica,  
 $\varepsilon^t$  es la deformación real total,  
 $\varepsilon^{el}$  es la deformación real elástica,  
 $\sigma$  es la tensión real, y  
 $E$  es el módulo de elasticidad.

La relación entre deformación real y nominal es:

$$\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (5-3)$$

La relación entre tensión real y nominal es:

$$\sigma = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (5-4)$$

Se debe aclarar que estas relaciones son válidas solamente antes de la estricción en el ensayo de tracción.

### 5.4.3 Otras partes del modelo

- Mandril

Tipo de parte: “2D Shell Analytical rigid”

Dimensiones:

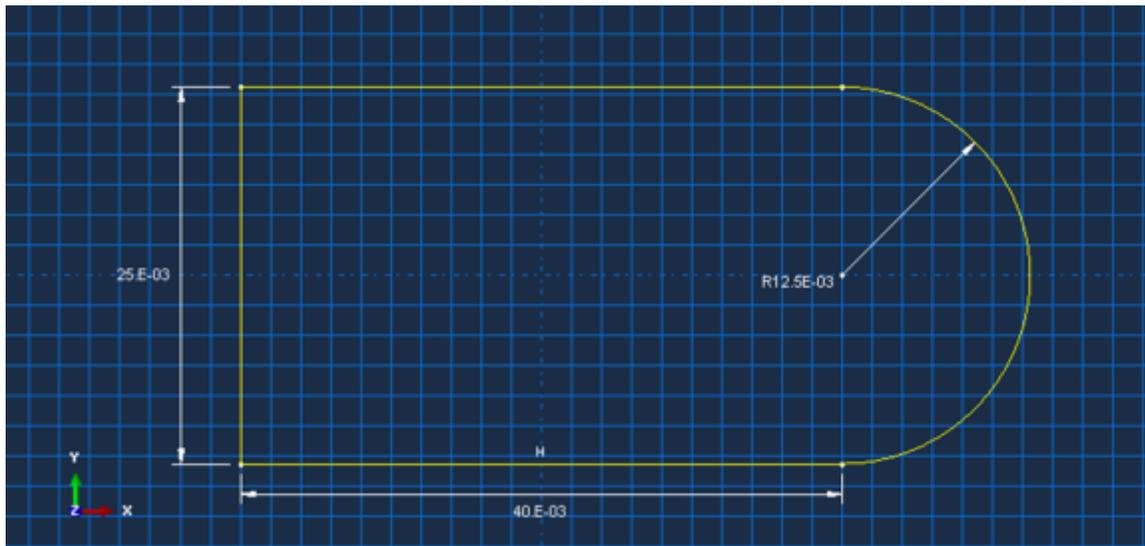
Altura: 0.025m

Ancho: 0.025m

Largo, tramo recto: 0.04m

Radio de punta: 0.0125m

Se presenta el croquis de la parte en la Figura 5.10.



**Figura 5.10.** Croquis: mandril.

Material:

Es una parte definida como un cuerpo rígido analítico, indeformable. Por lo tanto, no se le asignan materiales al cargar sus propiedades sino que se le asignan su masa y momentos de inercia, considerando que está construido de un acero inoxidable austenítico tipo AISI-304 (densidad  $\rho = 8050 \text{ kg/m}^3$ ).

$$\text{Masa} = 0.0988 \text{ kg} \quad I_{zz} = 7.718 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2 \quad I_{xx} = I_{yy} = 9.004 \times 10^{-6} \text{ kg.m}^2$$

- Rodillo

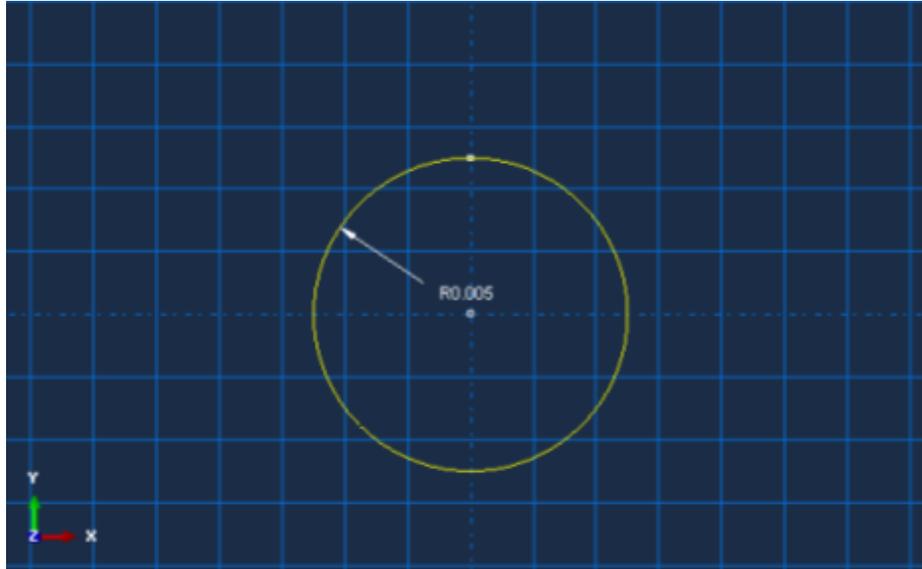
Tipo de parte: "2D Shell Analytical rigid"

Dimensiones:

Radio: 0.005m

Ancho: 0.025m

Se presenta el croquis de la parte en la Figura 5.11.



**Figura 5.11.** Croquis: rodillo.

Material:

Considerado como construido de acero inoxidable austenítico tipo AISI-304 (densidad  $\rho = 8050 \text{ kg/m}^3$ ).

$$\text{Masa} = 0.0158 \text{ kg} \quad I_{ZZ} = 1.975 \times 10^{-7} \text{ kg.m}^2 \quad I_{XX} = I_{YY} = 9.217 \times 10^{-7} \text{ kg.m}^2$$

#### ▪ Barra auxiliar

Las funciones de esta parte son conectar el eje central del rodillo con el de la punta del mandril, apretar el rodillo contra la chapa para conseguir la condición de rodadura, e imponerle al rodillo la rotación necesaria para plegar la chapa en su recorrido. La fuerza de apriete se logra a partir de una contracción de la parte debida a un enfriamiento localizado. Por ese motivo, la barra se define como "deformable". Pero para evitar otras deformaciones que no sean las debidas a la contracción térmica, se especifica a la barra un perfil de sección muy grande.

Tipo de parte: "2D Shell deformable"

Dimensiones:

Largo: dependiente del espesor de la chapa (ver Figura 5.2)

Sección: circular, radio = 0.05m

Material:

Se le asignan propiedades de acero al carbono, y un coeficiente de expansión térmica ( $\alpha$ ) elegido arbitrariamente para obtener la fuerza de apriete del rodillo necesaria (sección 5.4.7).

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

$$\nu = 0.3$$

$$E = 2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$$

$$\alpha = 5 \times 10^{-6} \text{ 1/K (Expansión térmica isotrópica)}$$

## 5.4.4 Ensamblado de partes

Para conseguir el modelo final sobre el que se hace el análisis se debe ensamblar todas las partes. El ensamblado consiste básicamente en colocar todas las partes en el sitio correspondiente e introducir las restricciones de movimiento relativo, de manera que el modelo simule la máquina dobladora de ensayos de *springback*.

Cada parte se dispone en su correspondiente posición, asegurando que no se deje ningún espacio entre ellas ni haya superposición en los sectores de superficies en contacto.

## 5.4.5 Definición de las entidades de contacto

El contacto entre superficies es la fase más delicada e importante de la simulación o análisis del modelo.

Se define el contacto en Abaqus / Explicit creando las superficies de contacto y especificando tres conceptos claves: entidades de contacto, tipo de contacto y parámetros de la fricción.

### ✓ Entidades en contacto

Un contacto siempre requiere dos partes. Estas dos partes son: maestro y esclavo [13].

En el caso de este análisis, la superficie *esclavo* será la chapa; el mandril y el rodillo serán superficies *maestro*.

### ✓ Tipo de contacto

El modo explícito del programa Abaqus provee dos algoritmos para modelar problemas de contacto e interacción: el algoritmo de contacto general y el algoritmo de pares de contacto.

**Se utiliza el algoritmo de pares de contacto** porque es el recomendado para modelar interacciones de superficies bidimensionales en pares rígido/deformable, como es el caso del problema de estudio de este Proyecto Final.

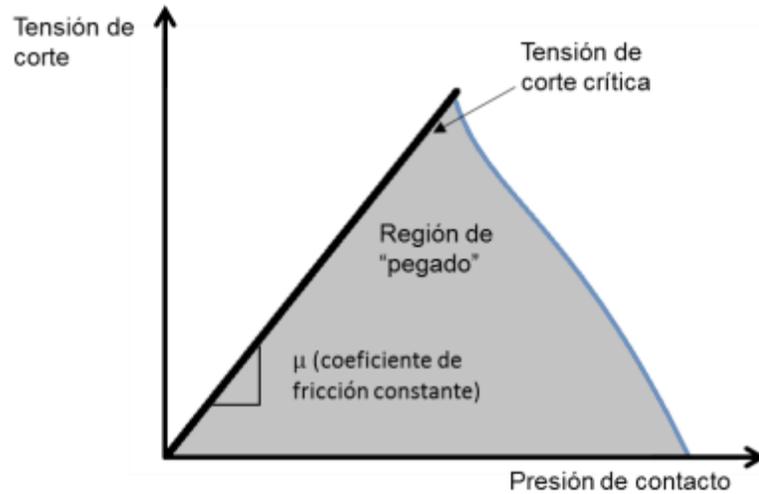
### ✓ Parámetros de la fricción

Cuando las superficies están en contacto por lo general transmiten esfuerzos de corte, así como fuerzas normales a través de su interfaz.

En general, existe una relación entre estos dos componentes de fuerza. La relación, conocida como fricción entre los cuerpos en contacto, se expresa en términos de las tensiones en la interfaz de los cuerpos. Entre los modelos de fricción disponibles en Abaqus, se elige el modelo de fricción de Coulomb isotrópica clásica, recomendado en bibliografía para este tipo de problemas.

El concepto básico del modelo de fricción de Coulomb es relacionar la tensión de fricción (corte) máxima permisible a través de una interfaz a la presión de contacto entre los cuerpos en contacto. En la forma básica del modelo de fricción de Coulomb, dos superficies de contacto pueden desarrollar tensiones de corte hasta una cierta magnitud a través de su interfaz antes de que comience el deslizamiento relativo entre ellas; este estado se conoce como de “pegado”.

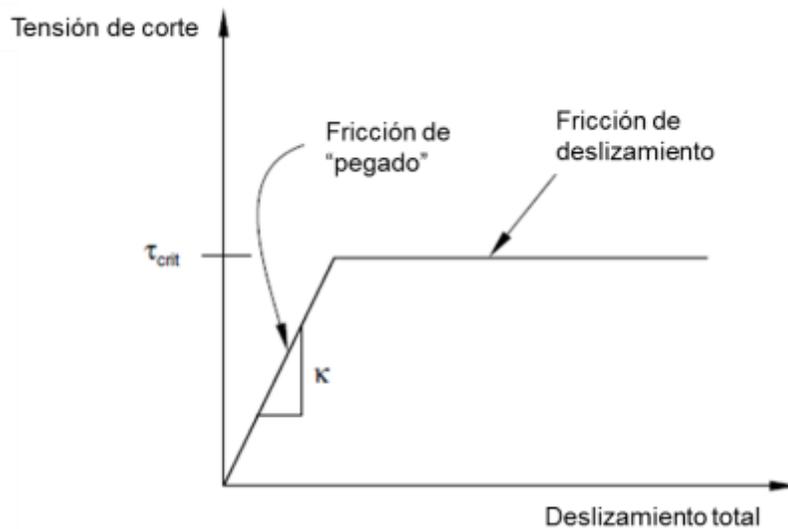
El modelo de fricción de Coulomb define a este esfuerzo de corte crítico  $\tau_{crit}$  (en el que comienza el deslizamiento de las superficies), como una fracción de la presión de contacto  $p$ , entre las superficies ( $\tau_{crit} = \mu p$ ). Los cálculos de pegado / deslizamiento determinan cuando un punto pasa de “pegado” a deslizamiento o de deslizamiento a “pegado”, y se ilustran en la Figura 5.12. La fracción  $\mu$  se conoce como coeficiente de fricción. El modelo básico asume que  $\mu$  es el mismo en todas las direcciones (fricción isotrópica).



**Figura 5.12.** Regiones de deslizamiento para el modelo de fricción básico de Coulomb.

- Para las simulaciones se tomó un **coeficiente de fricción ( $\mu$ ) de 0.30** [14], tanto para *chapa-rodillo* como para *chapa-mandril*.

En algunos casos puede producirse algún deslizamiento gradual a pesar de que el modelo de fricción determina que el estado debiera ser el de "pegado". En otras palabras, la pendiente de la tensión de corte (de fricción) frente a la relación total de deslizamiento puede ser finita mientras se está en el estado de "pegado", como se muestra en la Figura 5.13.



**Figura 5.13.** Regiones de deslizamiento para el modelo de fricción básico de Coulomb.

En Abaqus/Explicit, un valor finito de la rigidez de “pegado” puede reflejar un comportamiento físico especificado por el usuario o puede ser característico del método de aplicación de la restricción. El método de rigidez utilizado para imponer las restricciones de fricción con el algoritmo de pares de contacto es un método de penalización que permite cierto movimiento relativo de las superficies (un “deslizamiento elástico”) cuando se deberían estar “pegando”. Cuando las superficies se están “pegando” ( $\tau < \tau_{crit}$ ), la cantidad del deslizamiento está limitada a este deslizamiento elástico. El programa ajusta continuamente la magnitud de la restricción de penalización para asegurar esta condición.

- Para el análisis de este problema, después de hacer varias pruebas con los parámetros de fricción, se tomó la rigidez de deslizamiento elástico mínima permitida por el programa (1E-36), asegurando que las penalizaciones de contacto no afecten el balance energético total de la simulación (sección 5.4.9). Este valor se eligió tomando como referencia los casos presentados en [14].

### 5.4.6 Condiciones de contorno (fijaciones)

Para tener el modelo completamente definido resta introducir las condiciones de carga y desplazamiento que tenga aplicadas. En el caso este modelo, las cargas y desplazamientos se especifican en los *steps* de la simulación (sección 5.4.7). Aquí se presentan las condiciones de contorno de fijaciones y desplazamientos.

En la Figura 5.14 se muestran las condiciones de contorno impuestas a las diferentes partes del modelo para simular las condiciones de la máquina de ensayos de *springback*, las cuales se detallan a continuación:

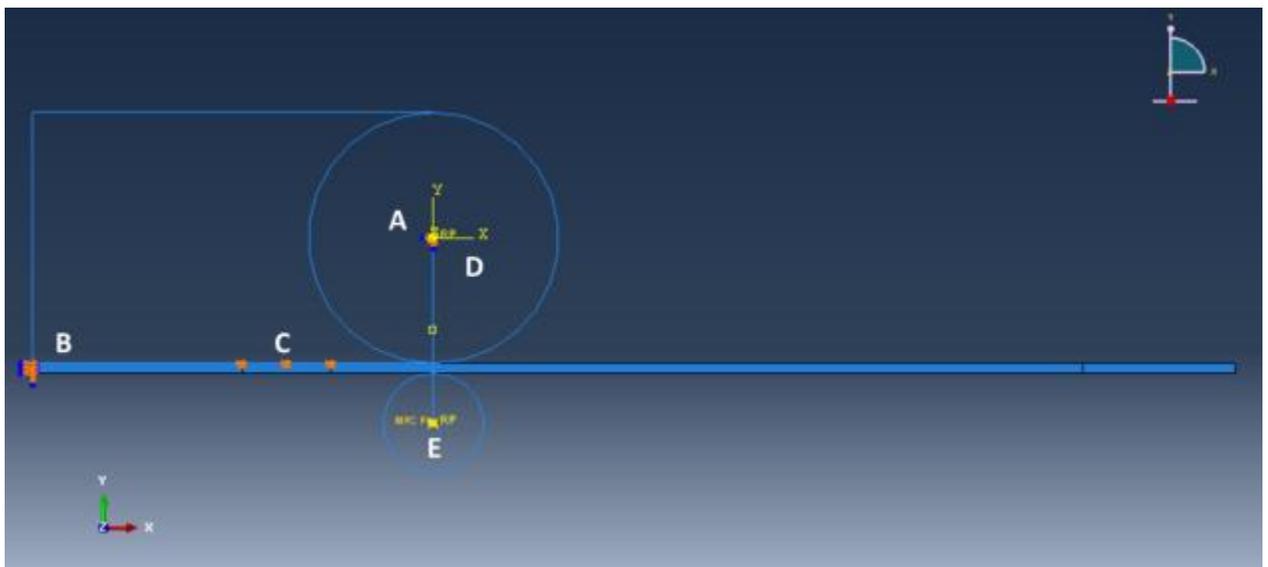


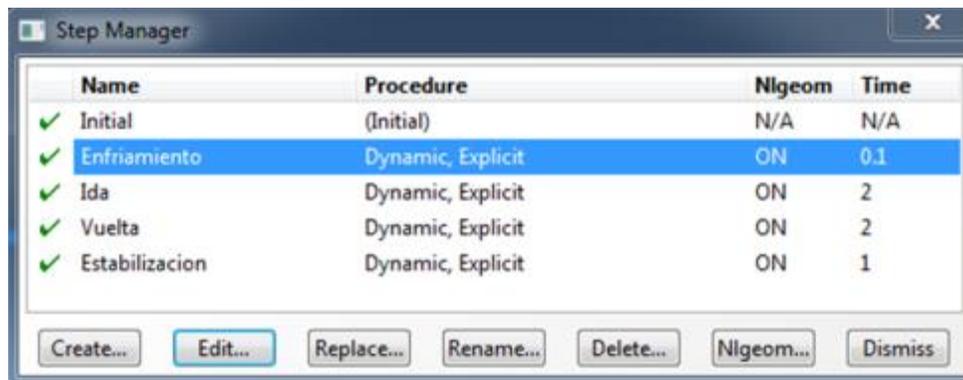
Figura 5.14. Condiciones de contorno del modelo.

- A. Encastre del mandril (aplicado en el punto de referencia creado en el origen del sistema de coordenadas). Impide todos los desplazamientos y rotaciones del mandril.
- B. Encastre del extremo izquierdo de la chapa.
- C. "Clavado" (*pinned*) de la superficie superior de la chapa. Impide los desplazamientos en las direcciones x, y, z.
- D. Barra auxiliar fija en su extremo superior (punto de referencia en el origen del sistema de coordenadas). Se impiden sus desplazamientos en direcciones x, y. Se le deja libertad para rotar alrededor del eje z.
- E. Extremo inferior de la barra auxiliar unido al eje central del rodillo. Permite la rotación del cilindro sobre su eje.

### 5.4.7 Secuencia de la simulación: steps

Abaqus tiene una forma de trabajar por pasos o steps. En cada uno de estos steps se le pueden aplicar al modelo contactos y condiciones de contorno distintas.

Los pasos en los que están divididas las simulaciones se muestran en la Figura 5.15.



Name	Procedure	Ngeom	Time
✓ Initial	(Initial)	N/A	N/A
✓ Enfriamiento	Dynamic, Explicit	ON	0.1
✓ Ida	Dynamic, Explicit	ON	2
✓ Vuelta	Dynamic, Explicit	ON	2
✓ Estabilizacion	Dynamic, Explicit	ON	1

Figura 5.15. Secuencia de steps de una simulación.

A continuación se describe la secuencia de pasos.

#### 1. Inicial.

El paso inicial permite definir las condiciones de contorno y las interacciones de los pares de superficies *mandril-chapa* y *rodillo-chapa* que se aplican en el comienzo y continúan durante todo el análisis.

2. **Enfriamiento.** Duración: 0,1 seg.

Es un paso auxiliar previo al giro del rodillo, en el que se enfría solamente la barra auxiliar para conseguir una contracción controlada de la misma. Esto se traduce en una leve presión del rodillo sobre la chapa, tal como sucede en el aparato de ensayos de *springback*.

$$\Delta T = -10 ; P = \alpha E \Delta T = -12.6 \text{ MPa}$$

3. **Ida.** Duración: 2 seg.

Se impone a la barra auxiliar un giro anti horario de 180° respecto al eje z, que conlleva el movimiento ascendente del rodillo hasta la parte superior del mandril en una trayectoria semi circular.

4. **Vuelta.** Duración: 2 seg.

Se impone a la barra auxiliar un giro horario de 180° respecto al eje z, por lo que el rodillo regresa a su posición inicial.

5. **Estabilización.** Duración: 1 seg.

En la etapa final del análisis se aplica una carga de presión viscosa sobre la superficie libre de la chapa para amortiguar los efectos de onda transitorios, de modo que se pueda alcanzar rápidamente la posición de equilibrio. Se tomó un coeficiente de presión viscosa de  $0.395 \text{ MPa s/m}$ , aproximadamente un 1% del valor de  $\rho C_d$ , donde  $\rho$  es la densidad de la chapa y  $C_d$  es la velocidad de onda dilatacional ( $C_d = 5029 \text{ m/s}$  para estos aceros).

Por último, se destaca que para todos los steps se tuvo en cuenta la no-linearidad geométrica de los elementos durante el análisis (**Nlgeom**), y se utilizó un “escalado de la masa” (**Mass scaling**) con un objetivo de incremento de tiempo de  $1 \times 10^{-6}$  segundos.

*Mass scaling* consiste en un aumento artificial de la masa del modelo, que logra mejorar la eficiencia computacional manteniendo al mismo tiempo el grado de precisión necesario para el análisis. Para la mayoría de los casos cuasi-estáticos generalmente es posible escalar la masa en una cantidad limitada, para lograr un incremento de la magnitud del paso estable de tiempo y reducir así el tiempo computacional (Ec. 5.1). Sin embargo, debe asegurarse que los cambios en la masa y el consiguiente aumento de las fuerzas de inercia no alteren la solución de manera significativa.

### 5.4.8 Post-procesador

Para poder verificar la validez del modelo, comprobar el funcionamiento correcto de las simulaciones y analizar los resultados, se utilizan la sección de Visualización y los reportes de salida del programa.

Antes de comenzar la simulación del modelo, se seleccionan los datos que se quiere obtener en los reportes de salida.

Abaqus provee dos tipos de reportes de salida:

- Reportes de salida de campos (**field outputs**): se refieren a cantidades distribuidas espacialmente por todo el modelo (por ejemplo campo de tensiones, campo de deformaciones, campo de desplazamientos, campo de temperaturas, etc.)
- Reportes de salida de historia (**history outputs**): se refieren a cantidades en puntos específicos o cantidades que caracterizan al modelo completo o a una región del modelo (por ejemplo la energía de deformación elástica, la energía disipada plásticamente u otras cantidades similares).

Ambas salidas pueden variar con el tiempo (o con variación de la carga a través de una secuencia de steps).

En la Figura 5.16 se muestran las ventanas de gestión de estos reportes.

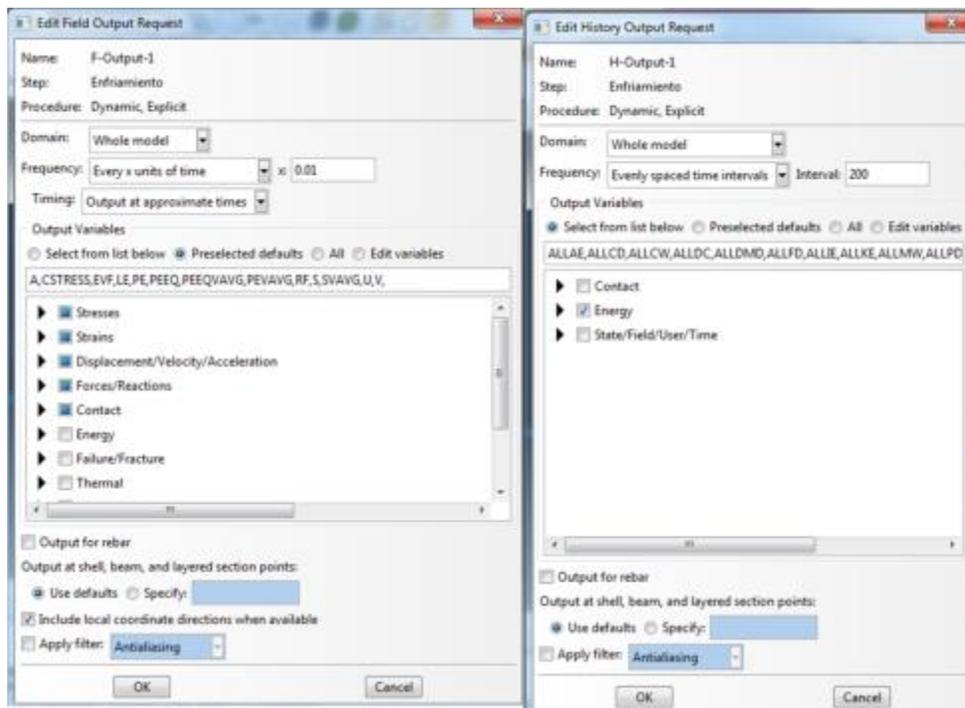


Figura 5.16. Ventanas de gestión de reportes de salida.

Para el análisis presentado en este Proyecto se especificaron las siguientes salidas:

#### Reportes de salida de campos:

- Componentes e invariantes de tensión.
- Componentes e invariantes de tensión promediados en volumen.
- Componentes de deformación plástica.
- Componentes de deformación plástica promediados en volumen.
- Deformación plástica equivalente.

- Deformación plástica equivalente promediada en volumen.
- Componentes de deformación logarítmica.
- Traslaciones y rotaciones.
- Velocidades traslacionales y rotacionales.
- Aceleraciones traslacionales y rotacionales.
- Fuerzas y momentos de reacción.
- Tensiones de contacto.
- Fracción volumétrica de vacío/material en los elementos.

#### Reportes de salida de historia:

- Energía de deformación “artificial”.
- Energía disipada por viscoelasticidad.
- Energía disipada por efectos de fricción.
- Energía de deformación total.
- Energía cinética.
- Energía disipada por deformación plástica.
- Energía de deformación recuperable.
- Energía disipada por efectos viscosos.
- Trabajo externo.
- Energía de calor interno.
- Energía de calor externo a través de flujos externos.
- Energía disipada por daños.
- Energía disipada por control de distorsión.
- Energía de cavidad de fluido.
- Trabajo realizado por penalizaciones de contacto.
- Trabajo realizado por penalizaciones de restricción.
- Trabajo realizado al impulsar la masa añadida en el *mass scaling*.
- Energía total.

### 5.4.9 Calibración y verificación del modelo

#### Calibración

Los ensayos de tracción descritos en el Capítulo 4, “**Selección y caracterización de los materiales**” se modelizaron numéricamente empleando para ello el mismo tipo de elemento y condiciones de escalado de masa que se usaron en las simulaciones de *springback*. Los resultados obtenidos permiten calibrar de manera más fina los parámetros del modelo constitutivo.

Se simuló el ensayo de tracción replicando las dimensiones de la probeta normalizada ASTM-E 8M y las condiciones de ensayo descritas anteriormente.

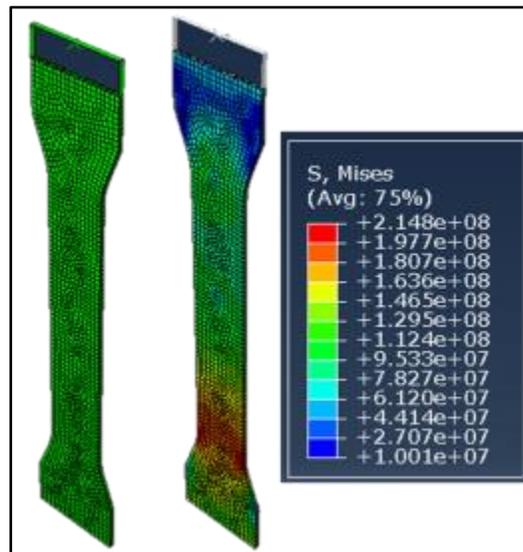
Siguiendo lo especificado en [15], la simulación se diseñó con las siguientes características:

- una primera etapa hasta el comienzo de la fluencia del material, con baja velocidad de ascenso de la travesa,
- una segunda etapa desde la fluencia hasta deformaciones previas a la estricción de la probeta, con mayor velocidad de ascenso de la travesa,
- y una tercera etapa en la que se reproduce la liberación de la probeta, simulando una descarga.

Las velocidades de ascenso de la travesa y las duraciones de las dos primeras etapas se tomaron a partir de los datos reales de cada ensayo que se simuló.

La discretización de la malla se realizó de igual manera que para las simulaciones de *springback*, como se detalló en la sección 5.4.2. Se trabajó con el parámetro de red  $n$  igual a 3, 4 y 5.

Una muestra de la probeta diseñada, su mallado y los campos de esfuerzos resultantes luego de una simulación se presenta en la Figura 5.17.

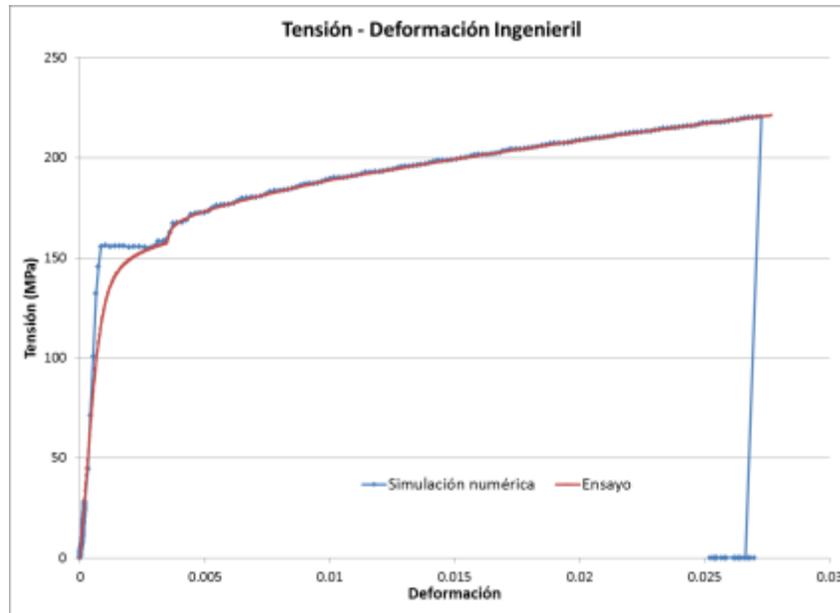


**Figura 5.17.** Simulación de un ensayo de tracción.

A partir de los datos obtenidos de los reportes de salida de cada simulación se pudo confeccionar una curva tensión-deformación que fue comparada directamente con la resultante del ensayo de tracción real.

La simulación numérica permitió observar que el ajuste de las curvas tensión-deformación es muy preciso en todo en todo el rango de deformaciones, presentando alguna diferencia sólo alrededor del comienzo de la fluencia.

Como ejemplo, en la Figura 5.18 se muestran las curvas resultantes de la simulación y del ensayo de tracción real para el material identificado en este trabajo como M2, con un mallado con parámetro de red  $n = 5$ .



**Figura 5.18.** Comparación de curvas del ensayo de tracción real y simulado (material M2,  $n = 5$ ).

## Verificación

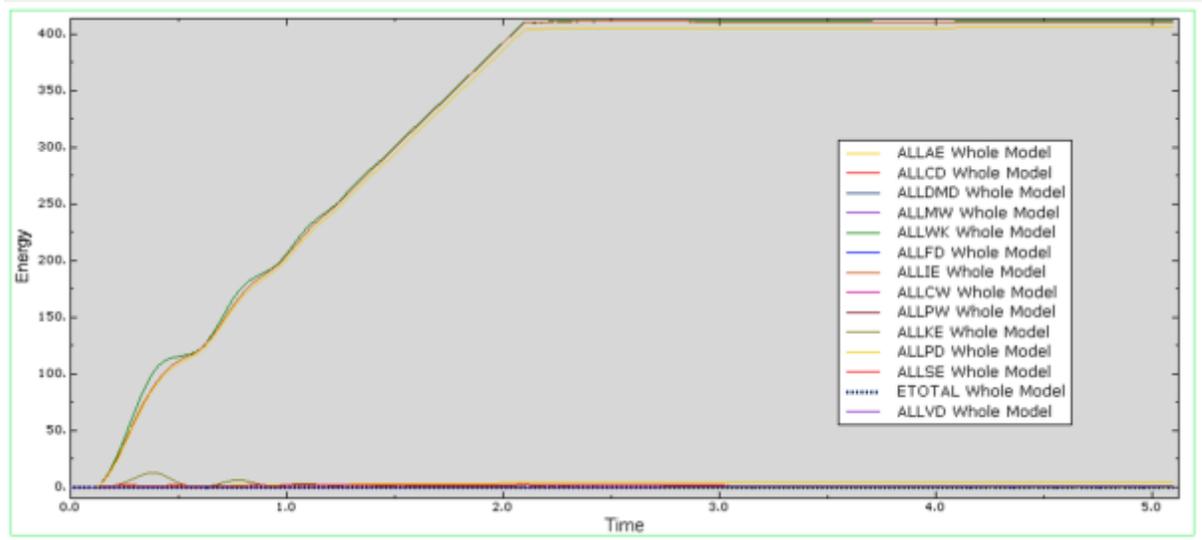
Es imprescindible verificar que el análisis esté dando una respuesta energéticamente consistente. Para ello se usan los reportes de energía, con datos a lo largo de toda la simulación. El balance de energía y las comparaciones entre los diferentes componentes de energía se utilizan para hacer esta evaluación. Principalmente, se verifica que la energía total se mantenga relativamente constante a través de la simulación. La energía total ( $ETOTAL$ ) engloba la energía interna ( $ALLIE$ ), la energía viscosa disipada ( $ALLVD$ ), la energía de fricción disipada ( $ALLFD$ ), la energía cinética ( $ALLKE$ ), la energía de calor interna, el trabajo realizado por las cargas externas aplicadas ( $ALLWK$ ), y el trabajo realizado por las penalidades de contacto ( $ALLPW$ ), las penalidades de restricción ( $ALLCW$ ) y el escalado de la masa ( $ALLMW$ ).

Se puede utilizar una ecuación de balance de energía para evaluar si una simulación está dando una respuesta cuasi-estática adecuada. En Abaqus/Explicit esta ecuación se escribe como:

$$ALLIE + ALLVD + ALLFD + ALLKE - ALLWK - ALLPW - ALLCW - ALLMW = ETOTAL = constante$$

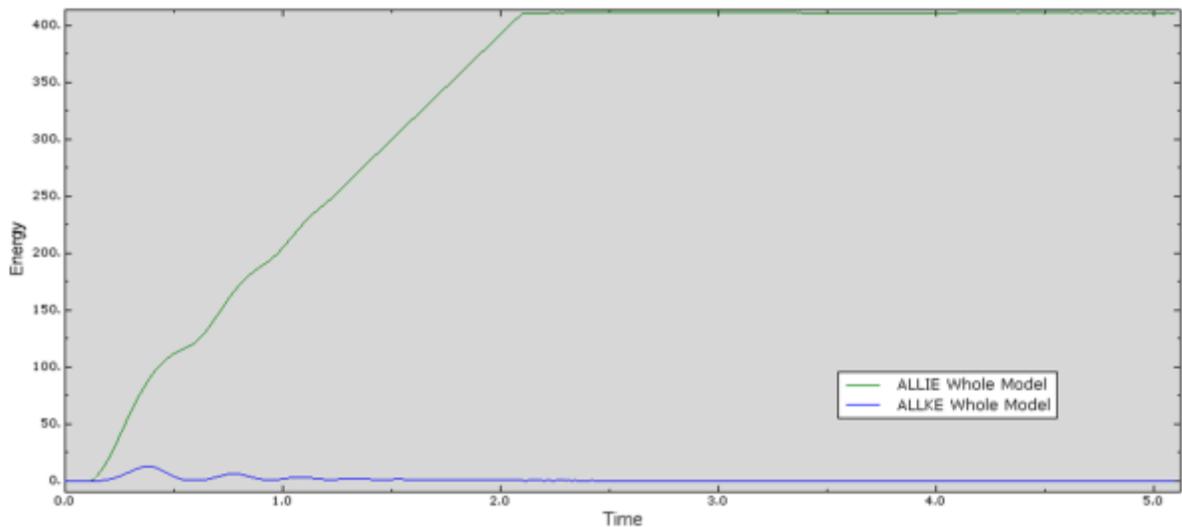
En la Figura 5.19 se pueden ver estas curvas de energía, entre otras descritas en la sección 5.4.8. Se verifica el hecho de que la energía total es constante durante la

simulación y que su valor es nulo porque inicialmente el modelo no posee deformación ni energía cinética.



**Figura 5.19.** Curvas de energía en la simulación de *springback* (material M2,  $n = 5$ ).

Otra consideración energética a evaluar es que la energía cinética del material deformado no exceda una pequeña fracción (5-10%) de su energía interna a lo largo de la mayor parte del proceso de conformado [16]. Esto se puede ver en la Figura 5.20.



**Figura 5.20.** Energía interna y energía cinética (material M2,  $n = 5$ ).

Mediante la evaluación de los reportes de energía, se fueron ajustando los valores del “deslizamiento elástico” y del objetivo de incremento de tiempo (*mass scaling*) hasta que se cumplieran las consideraciones energéticas y el modelo de simulación se considerara válido.

## 5.5 Conclusiones

- Se logró simular el ensayo de springback por plegado de 180° mediante un modelo bidimensional con método de análisis con formulación explícita.
- El mallado diferencial de la chapa permitió evaluar el comportamiento según criticidad de las zonas.
- El modelo se calibró haciendo simulaciones de un ensayo de tracción simple y se verificó la consistencia de las predicciones de los modelos mediante el análisis de la evolución temporal del balance energético.

## 6. Simulación y análisis de resultados

### 6.1 Introducción

En este capítulo se presenta el análisis de convergencia del modelo con la discretización y el cálculo teórico de los ángulos y coeficientes de recuperación elástica en el plegado de 180° para todos los casos estudiados experimentalmente.

### 6.2 Medición de ángulos de springback en el modelo

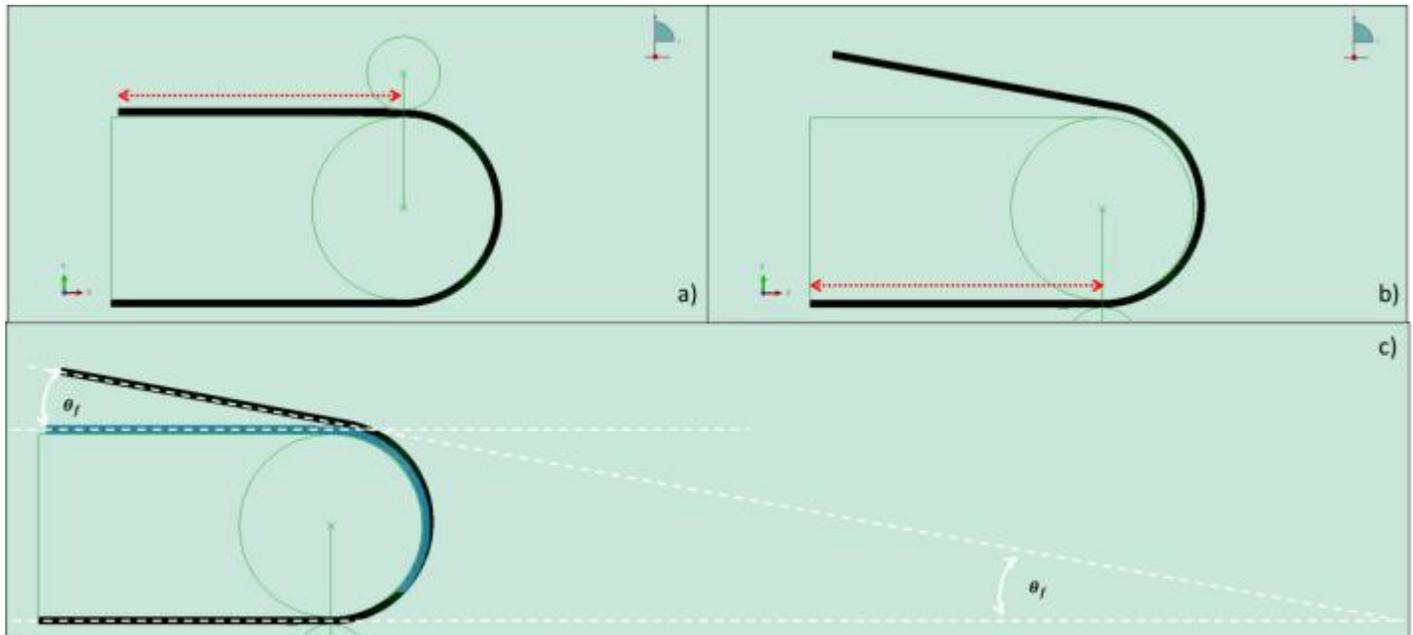
Dada la configuración del aparato de ensayo que se simula, la deformación de la chapa se produce copiando la punta semi-circular del mandril (Fig. 6.1). Al retirarse el rodillo hasta la posición inicial, la recuperación elástica hace que la chapa se separe de la punta del mandril. Dicha separación será tanto más pronunciada cuanto mayor sea la recuperación del material. Por lo tanto, la forma más adecuada de medir el ángulo de *springback*  $\theta_f$  es a partir de la intersección de las proyecciones de los tramos no deformados de la chapa; dichos tramos son rectos y van desde los extremos de la chapa hasta los límites de la zona de acción del rodillo [6].

La medición de los ángulos de *springback* se realiza en el módulo de visualización de resultados del programa. Allí, una vez finalizada la simulación, se mide la posición de dos puntos en el lado libre de la chapa, ubicados en su línea media: uno sobre el extremo y otro a una distancia preestablecida del extremo (Figura 6.2). Con las coordenadas de estos puntos se calcula la pendiente de la recta que los une. Sabiendo que la relación entre esta pendiente ( $m$ ) y  $\theta_f$  está dada por  $\text{tg } \theta_f = -m$ , luego se calcula fácilmente  $\theta_f$ .

Se utiliza el valor del ángulo de recuperación elástica  $\theta_f$  para calcular el cociente de *springback*  $\eta$  según la fórmula (2-4), que se repite a continuación.

$$\eta = \frac{\theta_0 - \theta_f}{\theta_0} = \frac{180 - \theta_f}{180}, \quad (2-4)$$

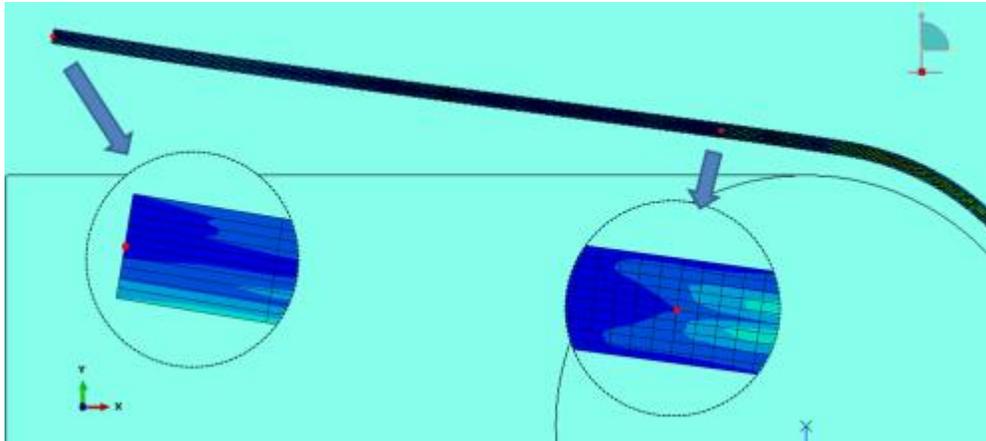
donde  $\theta_0$  es el ángulo de plegado (en el caso de este ensayo, 180°).



**Figura 6.1.** Medición del ángulo de *springback*.

Tramos rectos de chapa (en rojo) y sus proyecciones para calcular  $\theta_f$ .

**a)** Rodillo a 180°. **b)** Fin de la simulación (rodillo a 0°). **c)** Superposición de los estados en **a)** y **b)**.



**Figura 6.2.** Puntos en la chapa usados para calcular  $\theta_f$ .

Como se indicó en la sección 5.4.2, antes de realizar una simulación se debe definir el valor de  $n$ , que representa la cantidad de veces que se repetirá el elemento de malla en el semi-espesor de la chapa.

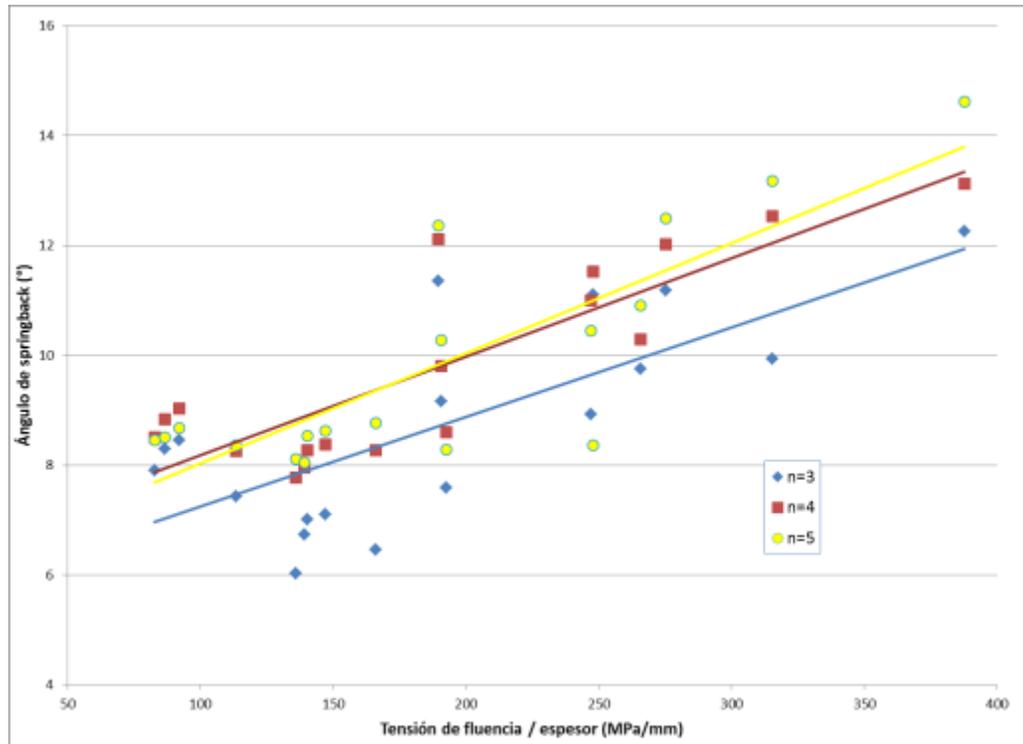
Se realizaron simulaciones partiendo de  $n = 2$ , afinando la malla. Al llegar a  $n = 6$ , el costo computacional (tiempo de procesamiento) se consideró demasiado alto. Los resultados para  $n = 2$  no se reportan por considerar demasiado gruesa la malla.

En la Tabla 6.1 se muestran los resultados obtenidos para discretizaciones de mallado con  $n$  igual a 3, 4 y 5.

Identificación	n=3		n=4		n=5	
	$\theta_f$ (grados)	Cociente de <i>springback</i> $\eta$	$\theta_f$ (grados)	Cociente de <i>springback</i> $\eta$	$\theta_f$ (grados)	Cociente de <i>springback</i> $\eta$
M1	8.93	0.950405	11.00	0.938898	10.44	0.941978
M2	6.46	0.964105	8.27	0.954083	8.77	0.951286
M3	7.43	0.958747	8.25	0.954142	8.36	0.953528
M4	8.45	0.953040	9.03	0.949819	8.68	0.951805
M5	7.59	0.957845	8.59	0.952259	8.28	0.954004
M6	6.03	0.966509	7.77	0.956816	8.11	0.954950
M7	7.90	0.956101	8.51	0.952741	8.46	0.952994
M8	8.30	0.953913	8.84	0.950880	8.51	0.952723
M9	9.75	0.945813	10.29	0.942832	10.91	0.939415
M10	7.10	0.960545	8.37	0.953500	8.62	0.952116
M11	7.01	0.961069	8.27	0.954046	8.53	0.952601
M12	6.74	0.962540	7.95	0.955827	8.05	0.955287
M13	9.94	0.944761	12.54	0.930343	13.18	0.926802
M14	9.17	0.949064	9.81	0.945516	10.27	0.942929
M15	11.10	0.938334	11.52	0.935986	8.36	0.953528
M16	12.25	0.931921	13.12	0.927116	14.62	0.918778
M17	11.18	0.937884	12.02	0.933205	12.50	0.930566
M18	11.35	0.936954	12.12	0.932665	12.37	0.931285

**Tabla 6.1.** Valores de *springback* obtenidos por simulación numérica.

Se puede observar que no hay una relación directa entre el afinamiento de la malla y el aumento del ángulo de recuperación elástica.



**Figura 6.3.** Ángulos de springback obtenidos por simulación numérica.

Al graficar los ángulos de *springback* con respecto al cociente *tensión de fluencia / espesor* (Figura 6.3) se puede observar que nuevamente se cumple una relación lineal.

Casi todos valores obtenidos para el mallado con  $n = 3$  son menores que los de las simulaciones para  $n = 4$  y  $n = 5$ . Los valores para las simulaciones con  $n = 4$  y  $n = 5$  son cercanos entre sí en la mayoría de los casos.

### 6.3 Discretización, costo computacional y convergencia del modelo

En la sección anterior se mostraron los resultados de las simulaciones realizadas con diferentes discretizaciones de la chapa en la simulación del ensayo de springback por plegado de  $180^\circ$ . En esta sección se muestra la justificación práctica de los tamaños de malla analizados y la comparación de los resultados con los valores experimentales.

Puede observarse en la Tabla 6.2 que a medida que disminuye el tamaño de la malla, aumenta el número de nodos en la misma y por consiguiente aumenta el costo computacional.

Identificación	n=3		n=4		n=5	
	Cantidad de nodos	Tiempo de procesamiento (hh:mm:ss)	Cantidad de nodos	Tiempo de procesamiento (hh:mm:ss)	Cantidad de nodos	Tiempo de procesamiento (hh:mm:ss)
M1	3725	08:47:14	5444	15:14:52	7602	20:47:31
M2	3039	07:04:01	4274	11:29:43	5809	16:50:35
M3	2465	05:06:01	3311	08:29:38	4357	11:24:49
M4	2206	03:36:47	2861	06:01:51	3752	08:58:33
M5	3431	07:56:38	4949	14:51:25	6843	18:34:17
M6	3039	06:53:25	4274	10:48:05	5809	16:44:40
M7	2290	04:27:47	3014	07:58:03	3895	10:07:38
M8	2206	03:35:18	2861	06:10:19	3675	08:43:03
M9	3816	08:53:53	5606	16:15:15	7844	19:04:35
M10	2808	06:27:15	3887	09:54:10	5215	14:49:08
M11	2808	07:00:44	3887	09:55:42	5215	14:58:08
M12	2808	06:59:24	3887	09:50:00	5215	14:52:33
M13	3088	07:17:49	4355	11:50:34	5941	17:47:20
M14	2465	04:37:28	3311	08:29:18	4357	11:29:41
M15	2465	04:55:34	3311	07:37:01	4357	11:20:55
M16	2962	07:02:12	4148	11:17:05	5611	25:09:25
M17	2465	04:45:26	3311	07:34:44	4357	11:28:44
M18	2206	04:10:44	2861	06:21:52	3675	08:24:47

**Tabla 6.2.** Valores de discretización y costo computacional de las simulaciones.

Se verificó la tendencia convergente en los valores calculados a medida que se aumentó la densidad de mallado en las discretizaciones. Esto se puede observar en la Tabla 6.3, donde se muestran las diferencias entre los ángulos de recuperación elástica obtenidos para mallas con  $n = 3$ ,  $n = 4$  y  $n = 5$ . Para las simulaciones con un mallado aún más fino, usando  $n = 6$ , los tiempos de cómputo llegaron a ser de más de 50 horas. Considerando además que los resultados obtenidos presentaron poca diferencia con los de  $n = 5$ , se decidió no continuar con el afinado de la malla.

La convergencia del modelo hacia soluciones más precisas se puede ver en la Tabla 6.4, donde se muestran los valores de ángulo de springback obtenidos experimentalmente, los obtenidos con el análisis por elementos finitos y la diferencia entre estos.

Identificación	n=3		n=4		n=5
	$\theta_3$	$ \theta_3 - \theta_4 $	$\theta_4$	$ \theta_4 - \theta_5 $	$\theta_5$
M1	8.93	2.07	11.00	0.55	10.44
M2	6.46	1.80	8.27	0.50	8.77
M3	7.43	0.83	8.25	0.11	8.36
M4	8.45	0.58	9.03	0.36	8.68
M5	7.59	1.01	8.59	0.31	8.28
M6	6.03	1.74	7.77	0.34	8.11
M7	7.90	0.60	8.51	0.05	8.46
M8	8.30	0.55	8.84	0.33	8.51
M9	9.75	0.54	10.29	0.62	10.91
M10	7.10	1.27	8.37	0.25	8.62
M11	7.01	1.26	8.27	0.26	8.53
M12	6.74	1.21	7.95	0.10	8.05
M13	9.94	2.60	12.54	0.64	13.18
M14	9.17	0.64	9.81	0.47	10.27
M15	11.10	0.42	11.52	3.16	8.36
M16	12.25	0.86	13.12	1.50	14.62
M17	11.18	0.84	12.02	0.48	12.50
M18	11.35	0.77	12.12	0.25	12.37
Promedio →		1.09		0.57	

Tabla 6.3. Convergencia de los ángulos de springback en simulaciones numéricas.

Experimental		n=3		n=4		n=5	
Muestra	$\theta_f$	$\theta_3$	$ \theta_f - \theta_3 $	$\theta_4$	$ \theta_f - \theta_4 $	$\theta_5$	$ \theta_f - \theta_5 $
M1	11.67	8.93	2.74	11.00	0.67	10.44	1.22
M2	8.67	6.46	2.21	8.27	0.40	8.77	0.10
M3	7.67	7.43	0.24	8.25	0.59	8.36	0.70
M4	8.67	8.45	0.21	9.03	0.37	8.68	0.01
M5	12.00	7.59	4.41	8.59	3.41	8.28	3.72
M6	8.00	6.03	1.97	7.77	0.23	8.11	0.11
M7	8.00	7.90	0.10	8.51	0.51	8.46	0.46
M8	7.33	8.30	0.96	8.84	1.51	8.51	1.18
M9	11.67	9.75	1.91	10.29	1.38	10.91	0.76

<b>M10</b>	9.33	7.10	2.23	8.37	0.96	8.62	0.71
<b>M11</b>	9.67	7.01	2.66	8.27	1.39	8.53	1.13
<b>M12</b>	8.33	6.74	1.59	7.95	0.38	8.05	0.29
<b>M13</b>	13.00	9.94	3.06	12.54	0.46	13.18	0.18
<b>M14</b>	10.67	9.17	1.50	9.81	0.86	10.27	0.39
<b>M15</b>	8.00	11.10	3.10	11.52	3.52	8.36	0.36
<b>M16</b>	15.00	12.25	2.75	13.12	1.88	14.62	0.38
<b>M17</b>	11.67	11.18	0.49	12.02	0.36	12.50	0.83
<b>M18</b>	11.67	11.35	0.32	12.12	0.45	12.37	0.70
<b>Promedio →</b>			<b>1.80</b>		<b>1.07</b>		<b>0.74</b>

**Tabla 6.4.** Ángulos de springback. Comparación entre valores experimentales y de simulaciones.

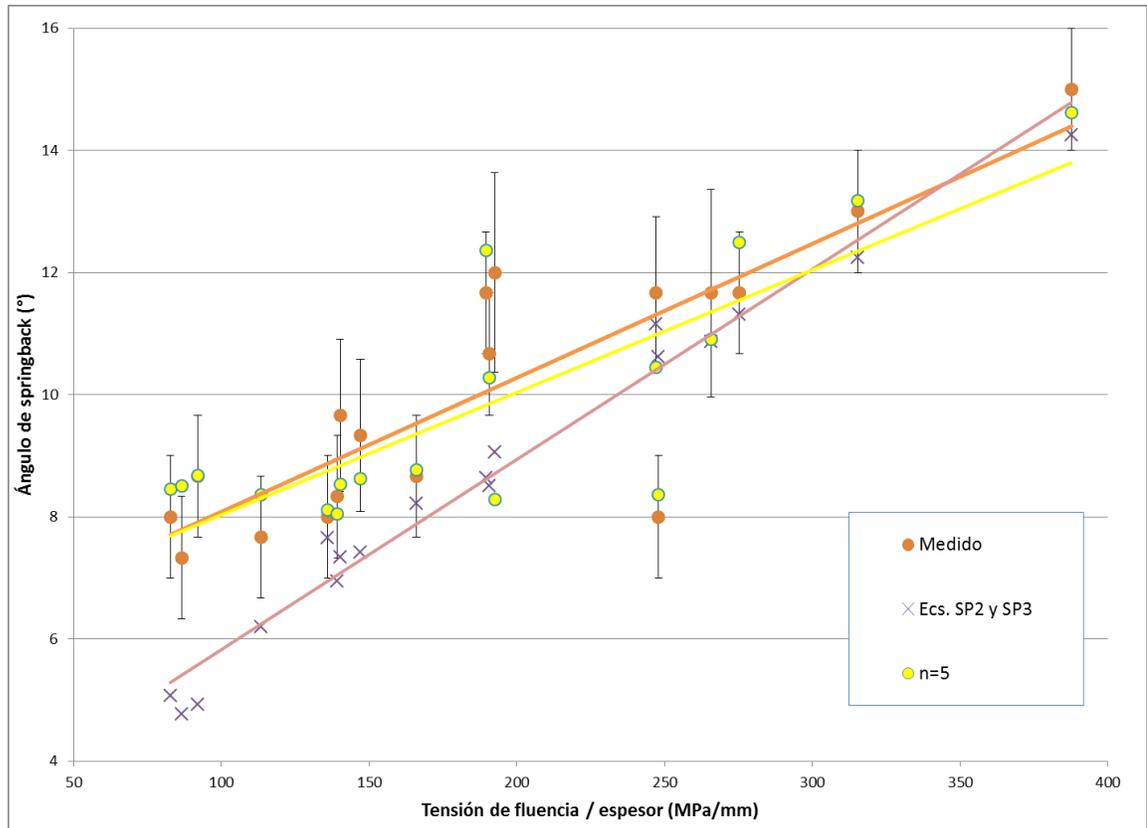
Se puede ver que a medida que el mallado se vuelve más fino, la solución del modelo se acerca más al valor experimental.

## 6.4 Comparación entre ajuste teórico y de simulación a los datos experimentales

En la Figura 6.4 pueden observarse los valores obtenidos con las ecuaciones teóricas SP2 - SP3 y la simulación numérica con mallado de la chapa utilizando el parámetro de red  $n = 5$ . Estos fueron los mejores ajustes usando ecuaciones teóricas y elementos finitos, respectivamente.

Se destaca que los resultados obtenidos por métodos numéricos son más exactos que los teóricos, incluso para relaciones de *tensión de fluencia / espesor* bajos.

En base a lo discutido en el Capítulo 4, se puede afirmar que los resultados teóricos obtenidos con la ecuación SP3 tienen la precisión suficiente para predecir de manera correcta el fenómeno de recuperación elástica en el ensayo de plegado de 180° de chapas metálicas. Considerando la estructura simple y la facilidad de obtención de los datos de entrada para dicha ecuación, se puede tomar este modelo teórico como la herramienta más sencilla, económica y directa para la predicción del fenómeno de springback.



**Figura 6.4.** Sección de chapa durante el doblado. (Material M13;  $\sigma_Y = 306 \text{ MPa}$ )

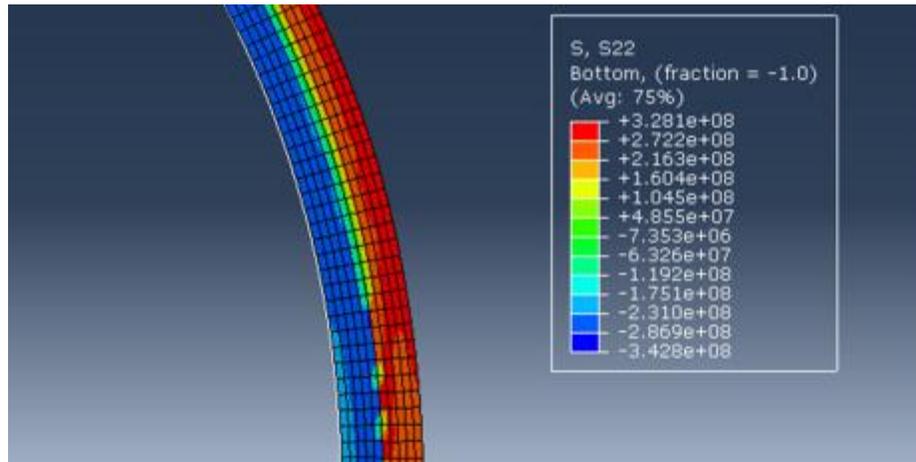
La simulación numérica es una herramienta más completa y versátil, de la cual pueden obtenerse más datos, en comparación a las ecuaciones teóricas. Pero para este análisis en particular, su uso (que implica el ingreso de gran cantidad de información como datos de entrada y altos tiempos de procesamiento) puede ser justificable cuando se requiere un análisis más profundo o de desarrollo de materiales.

## 6.5 Análisis de tensiones y deformaciones

El uso de la herramienta numérica permite, además de obtener los resultados finales, analizar los estados tensionales y de deformaciones a lo largo del ensayo. Esto es útil para verificar que el comportamiento del material sea efectivamente como se predice en la teoría.

Como se dijo anteriormente y tal cual se puede comprobar con el análisis por las teorías clásicas de la resistencia de materiales, en un proceso de doblado como el que se presenta en este trabajo, la carga en las zonas más solicitadas es lo suficientemente elevada como para que se supere el límite elástico. Por lo tanto, cuando se libera la chapa existe un grupo de fibras que no recupera su estado anterior, acumulando en su

interior tensiones internas (residuales) que son las que se reflejan en el estudio teórico del Capítulo 3 y, como se verá, aparecen en los gráficos obtenidos a partir de esta simulación.

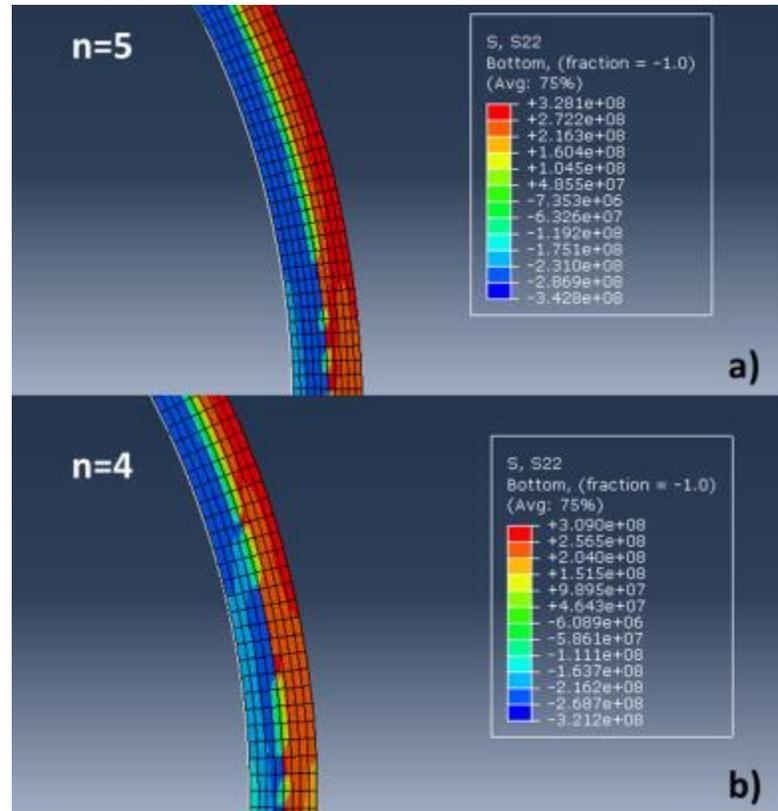


**Figura 6.5.** Sección de chapa durante el doblado. (Material M13;  $\sigma_Y = 306 \text{ MPa}$ )

En la Figura 6.5 se pueden ver los estados tensionales de una sección de chapa. El diagrama policromático revela las fibras que están comprimidas y las que están traccionadas. El color azul intenso indica que esas fibras llegaron a la tensión de fluencia de este material ( $\sigma_Y = 306 \text{ MPa}$ ) por compresión, mientras que el color rojo intenso muestra las fibras que han alcanzado la tensión de fluencia por tracción. Se puede ver claramente que el módulo de las tensiones disminuye hacia la zona central, marcando la línea o fibra neutra.

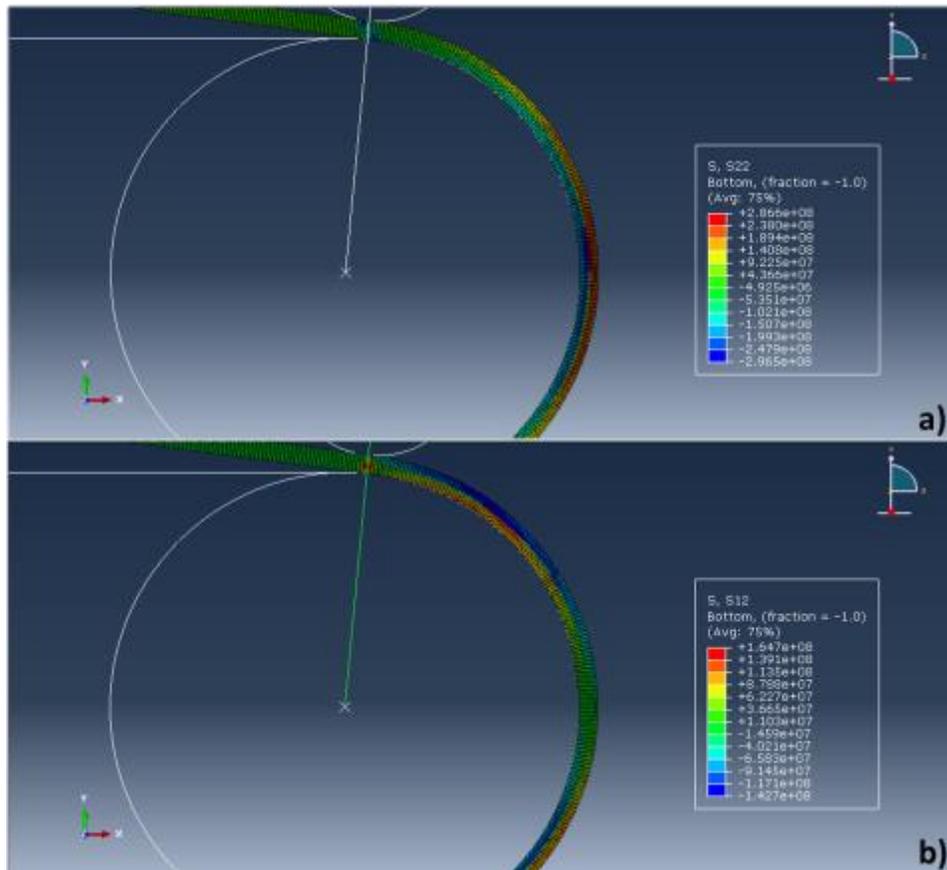
Según la teoría, las tensiones máximas de tracción y compresión deberían ser iguales. Pero aquí se puede observar que las de compresión resultan mayores y esto se refleja en el desplazamiento de la fibra neutra hacia el extremo en compresión, situación que se verifica en la práctica.

Un análisis importante para este trabajo es el referido a la sensibilidad de las tensiones y deformaciones al tamaño de elemento de malla. En la Figura 6.6 se puede ver que las tensiones máximas alcanzadas son mayores mientras más fina es la malla, tanto en tracción como en compresión. Al disminuir el tamaño de elemento, estas tensiones tienen acción sobre zonas más reducidas. Por lo tanto, debe analizarse con cuidado si este cambio en el tamaño de elemento aumenta o no la cantidad de plastificación en el material.



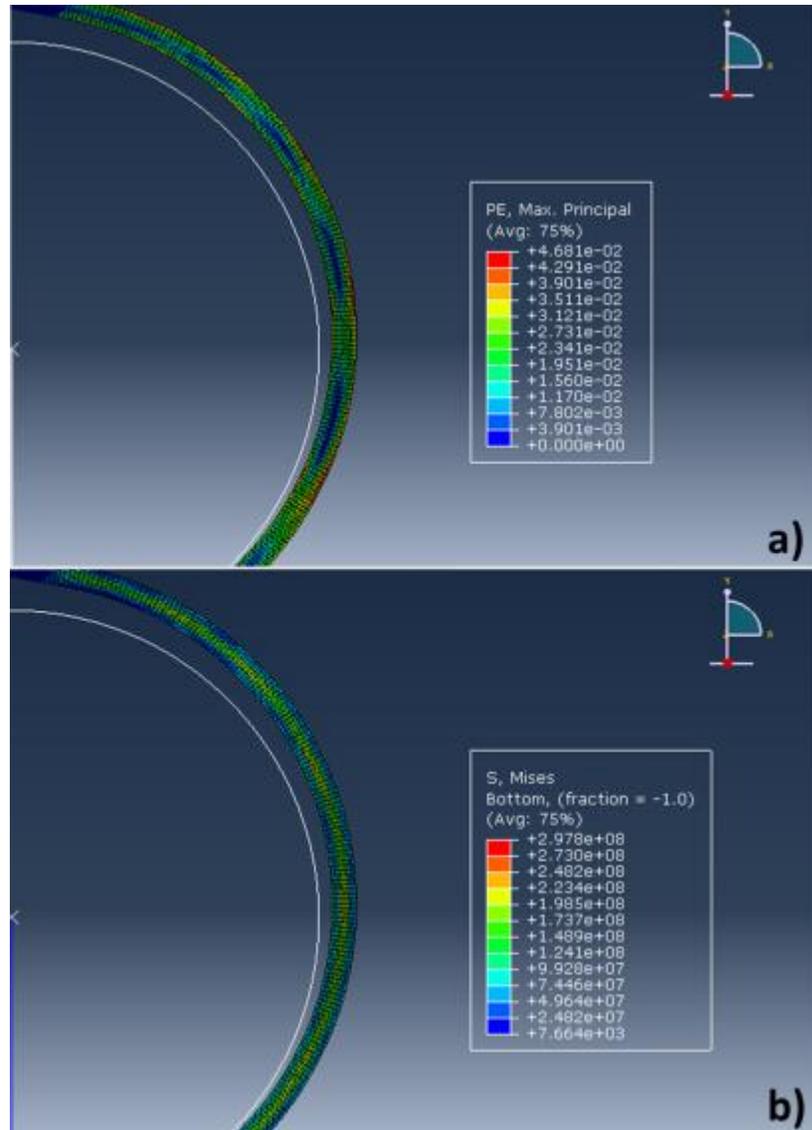
**Figura 6.6.** Efecto del tamaño de elemento sobre las tensiones.  
**a)** Malla fina,  $n = 5$ . **b)** Malla más gruesa,  $n = 4$ .

Al analizar la plastificación del material durante el doblado (Figura 6.7), se ve que se produce comenzando por las fibras más alejadas al eje neutro, como era esperado. Pero en el análisis teórico la plastificación llega hasta fibras más próximas al centro de la chapa. Esta diferencia con el método numérico se debe a que a medida que se reduce la distancia al eje neutro, empiezan a influir las tensiones de corte en el modelo, aspecto que no se tiene en cuenta en los cálculos teóricos. Esto es un factor importante cuando se analizan las diferencias entre los valores de recuperación elástica obtenidos en el análisis por elementos finitos con respecto a los cálculos teóricos.



**Figura 6.7.** Tensiones transversales y de corte durante el doblado.  
**a)** Tensiones transversales S22 **b)** Tensiones de corte S12.

Analizando el mapa de deformaciones plásticas luego de finalizar la etapa de Estabilización, se puede ver que la zona central de la chapa no sufrió plastificación y por lo tanto concentra tensiones residuales. Esto se puede apreciar en la Figura 6.8.



**Figura 6.8.** Tensiones y deformaciones finalizada la simulación de *springback*.  
a) Deformaciones plásticas b) Tensiones equivalentes de Mises.

Esta acumulación de tensiones residuales es la causante de la recuperación elástica del material al momento de retirarse el rodillo, como se explicó antes.

## 6.6 Conclusiones

- Mediante la variación en el número de elementos generados por la discretización del espesor de la chapa, se logró llegar a un balance entre el costo computacional y los valores obtenidos para aproximar el ángulo de recuperación elástica en el plegado 180°.
- La simulación con 5 elementos en el sub espesor fue la que se aproximó mejor a los datos experimentales obtenidos del ensayo.
- Teniendo en cuenta la dispersión en los resultados de los ensayos experimentales, se consideró que los valores obtenidos a partir de discretizaciones con 4 elementos en el sub espesor de la chapa, son tomados como aproximaciones aceptables.
- Los valores obtenidos mediante simulación numérica ajustaron mejor a los valores experimentales que las ecuaciones teóricas. A su vez, las ecuaciones teóricas que tienen en cuenta la ley de la potencia, también ajustan de manera satisfactoria los valores experimentales para relaciones altas de tensión de fluencia / espesor.
- Los resultados obtenidos con la ecuación SP3 tienen la precisión suficiente para predecir de manera correcta el fenómeno de recuperación elástica en el ensayo de plegado de 180° de chapas metálicas. Considerando la estructura simple y la facilidad de obtención de los datos de entrada para dicha ecuación, se puede tomar este modelo teórico como la herramienta más sencilla, económica y directa para la predicción del fenómeno de springback. La simulación numérica es una herramienta más completa y versátil, de la cual pueden obtenerse más datos, en comparación a las ecuaciones teóricas. Pero para este análisis en particular, su uso (que implica el ingreso de gran cantidad de información como datos de entrada y altos tiempos de procesamiento) puede ser justificable cuando se requiere un análisis más profundo o de desarrollo de materiales

# 7. Conclusiones y trabajos futuros

## 7.1 Conclusiones

- A partir de la información bibliográfica sobre el fenómeno y normas técnicas se construyó un equipo para el ensayo de springback. El equipo es lo suficientemente robusto para poder usarse en los principales productos consumidos por la industria automotriz (en calidades de acero y espesores). El ensayo propuesto provee una representación rápida y simple para estimar el cociente de springback.
- Se adoptó un método de ensayo de plegado semi guiado de 180° que consiste en la medición del ángulo de recuperación de una muestra de chapa rectangular después de doblarla 180° sobre un mandril de punta redondeada y luego liberarla.
- Los diferentes materiales estudiados abarcan los productos más comunes en la industria automotriz, tanto en calidades como en espesores. A pesar de agruparse en dos grupos de características diferentes (materiales alto-resistenciales y materiales embutibles), pudieron ser analizados en forma conjunta ya que no se observó una diferencia en el fenómeno de recuperación elástica según calidad del material, sino que todos siguieron un comportamiento lineal en función a la relación tensión de fluencia / espesor de chapa.
- Partiendo de la formulación general de flexión para vigas se llegó a tres ecuaciones para calcular la recuperación elástica de chapas sometidas a flexión pura usando como datos de entrada  $\sigma_Y$ ,  $E$ ,  $\nu$ ,  $K$  y  $n$ , espesor de chapa y radio de doblado. Una ecuación considera el comportamiento del material como elástico – perfectamente plástico mientras que las otras dos modelan la respuesta según la Ley de la potencia.
- Las ecuaciones que modelan el comportamiento de springback usando parámetros de la ley de la potencia, no presentaron variaciones significativas entre ellas. Estas ecuaciones aproximaron un 50% mejor los resultados experimentales que la ecuación teórica que considera un comportamiento de material elástico – completamente plástico.
- La ecuación nombrada en este trabajo como **SP3** resulta muy interesante ya que es una expresión simple que, usando datos típicos del ensayo de tracción de los

---

materiales, logra predecir el cociente de springback en el plegado de 180° de chapas de acero con un error aceptable (1.01% en promedio de los casos estudiados).

- Todas las ecuaciones teóricas planteadas aproximaron mejor el comportamiento de springback para relaciones altas de tensión de fluencia / espesor de chapa.
- Se logró simular el ensayo de springback por plegado de 180° mediante un modelo de elementos finitos bidimensional, con mallado diferencial de la chapa según criticidad de las zonas, y método de análisis por formulación explícita.
- A partir de la variación en el número de elementos generados por la discretización del espesor de la chapa, se logró llegar a un balance entre el costo computacional y los valores obtenidos para aproximar el ángulo de recuperación elástica en el plegado 180°. La simulación con 5 elementos en el sub espesor fue la que se aproximó mejor a los datos experimentales obtenidos del ensayo, pero los valores obtenidos a partir de discretizaciones con 4 elementos en el sub espesor de la chapa son aproximaciones aceptables teniendo en cuenta la dispersión en los resultados de los ensayos experimentales.
- Los valores obtenidos mediante simulación numérica ajustaron mejor a los valores experimentales que las ecuaciones teóricas. A su vez, las ecuaciones teóricas que tienen en cuenta la ley de la potencia, también ajustaron de manera satisfactoria los valores experimentales para relaciones altas de tensión de fluencia / espesor.
- Los resultados obtenidos con la ecuación **SP3** tienen la precisión suficiente para predecir de manera correcta el fenómeno de recuperación elástica en el ensayo de plegado de 180° de chapas metálicas. Considerando la estructura simple y la facilidad de obtención de los datos de entrada para dicha ecuación, se puede tomar este modelo teórico como la herramienta más sencilla, económica y directa para la predicción del fenómeno de springback. La simulación numérica es una herramienta más completa y versátil, de la cual pueden obtenerse más datos, en comparación a las ecuaciones teóricas. Pero para este análisis en particular, su uso (que implica el ingreso de gran cantidad de información como datos de entrada y altos tiempos de procesamiento) puede ser justificable cuando se requiere un análisis más profundo o de desarrollo de materiales.

## 7.2 Recomendaciones y trabajos futuros

Este estudio se planteó como primer paso para evaluar la posibilidad de ofrecer información sobre el *springback* en las especificaciones técnicas de los productos de Ternium Siderar. Conociendo los factores que tienen incidencia en el fenómeno de recuperación elástica, se propone que el valor de *springback* reportado en los informes de ensayos hechos con este equipo y método de ensayo sea el “**ángulo de recuperación elástica posterior a un plegado semi-guiado de 180 grados,  $\theta_{180}$** ”. En una especificación técnica de materiales deberían informarse para cada calidad los valores máximos admisibles según el espesor de la chapa.

Como una posible modificación del equipo, se sugiere incorporar una parte que permita variar el ángulo máximo de plegado. Un tope para la palanca formadora (que podría ser un cilindro recubierto con goma, ajustable mediante un tornillo) guiado sobre una canaleta semicircular pasante en la planchuela base podría posicionarse y fijarse en el ángulo de plegado deseado para el ensayo, indicado por escala angular sobre la planchuela.

Con este equipo modificado se podrían llevar a cabo otros análisis, como por ejemplo el estudio de la influencia del ángulo de plegado en la recuperación elástica de chapas de un mismo material y espesor.

Para mejorar el funcionamiento del modelo de elementos finitos en trabajos futuros, se propone cambiar el modelo de endurecimiento isotrópico del material en la definición de sus propiedades por uno complejo como el modelo de endurecimiento cinemático de Yoshida-Uemori [17]. Este cambio posibilitaría describir mejor el comportamiento de elasto-plasticidad en la simulación de *springback*, contemplando el efecto Bauschinger del material por la acción de cargas cíclicas.



## 8. Bibliografía

1. Abaqus; Manuales de Usuario, (2005)
2. Appold, H; "Tecnología de los metales: para profesiones técnico-mecánicas", 1985
3. Burchitz, I.A. "Improvement of Springback Prediction in Sheet Metal Forming" (2008)
4. Chapetti, M. D.; "Mecánica de materiales", Ediciones Al Margen (2005)
5. Elkins K.L; Sturges R.H; "Springback analysis and control in small radius air bending", J. of manufacturing Science and Engineering (1999)
6. Elkins K.L; Sturges R.H; "Springback análisis and control in small radius air bending", J. of manufacturing Science and Engineering (1999)
7. Feodosiev, V. I; "Resistencia de materiales". Mir. 3era edición (1988)
8. Gabrielle di Caprio; "Los aceros inoxidables" 2ª edición (1997). Grupinox (Agrupación de empresas para la comercialización y servicio de aceros inoxidables)
9. Gere, James M.; "Mecánica de materiales", International Thomson Editors (1998)
10. Huang Y.M.; Leu D.K ; "Effects of process variables on V-die bending process of steel sheet", Int. J. of Mechanical Science (1998)
11. International Iron & Steel Institute; "Advanced High Strength Steel (AHSS). Application guidelines", Committe on automotive applications (2006)
12. Iurman, L.; "Apuntes del curso sobre conformado de chapas metálicas", Instituto Argentino de Siderurgia (2007)
13. James F.Shackelford- Alfredo Güemes; "Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros". Prentice Hall (1998)
14. Kalpakjian S.; "Manufacturing Processes for Engineering Materials", Addison-Wesley Publishing Company, Inc (1992)
15. Machain, R.; "Conformado de chapas laminadas en frío", (2003)

16. Martínez M.A.; "Consideraciones sobre el cizallado y el plegado en frío de chapa metálica", Deformación Metálica (1993)
17. Mikell P. Groover; "Fundamentals of modern manufacturing. Materials, processes and systems", Ed Prentice Hall (1996)
18. Placidi, F.; "An efficient approach to springback compensation for Ultra High Strength Steel structural components for the automotive field", Centro Sviluppo Materiali S.p.A.
19. Theis, H. E.; "Handbook of Metalforming Processes"
20. Timoshenko, S.; "Resistencia de materiales", Espasa-Calpe (1945)
21. William D. Callister, Jr.; "Ciencia e ingeniería de los materiales" Department of Materials Science and Engineering. The University of Utah. Reverté (1995)
22. [www.steeluniversity.org](http://www.steeluniversity.org)
23. [www.worldautosteel.org](http://www.worldautosteel.org)

## 9. Trabajos citados

- [1] H. Appold, Tecnología de los metales: para profesiones técnico-mecánicas, 1985.
- [2] M. A. Farsi y B. Arezoo, «Bending force and spring-back in v-die-bending of perforated sheet-metal components.,» vol. 33, nº 1, 2011.
- [3] A. Lucaioli, Apuntes del curso sobre conformado de chapas metálicas. Instituto Argentino de Siderurgia., 2010.
- [4] S. Kalpakjian, Manufacturing Engineering and Technology. 3ra edición., Addison Wesley Publishing Company., 2006.
- [5] F. J. Gardiner, «The Springback of Metals, Transactions of the ASME.,» vol. 79, nº 1, 1957.
- [6] ASTM, *ASTM E290 - Standard Test Methods for Bend Testing of Material for Ductility*, 2014.
- [7] C. E. d. Normalisation, *BS EN 10 202 - Specification for Cold reduced electrolytic chromium / chromium oxide coated steel.*, 1990.
- [8] [En línea]. Available: <http://www.ciri.org.nz/bendworks/bending.pdf>.
- [9] R. d. A. C.A. Queener, «Elastic springback and residual stresses in sheet metal formed by bending.,» 1968.
- [10] ASTM, *ASTM E112 - Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*, 2013.
- [11] U. d. Valencia, «<http://www.uv.es/jbosch/PDF/CalculoDeErrores.pdf>,» Cálculo de errores y presentación de resultados experimentales, 2012.
- [12] J. D. S. H. Z. Marciniak, *Mechanics of sheet metal forming*, Londres: Butterworth-Heinemann, 2002.
- [13] Abaqus, *Abaqus 6.10 PDF Documentation. Getting Started with Abaqus: Interactive Edition*, 2005.
- [14] Abaqus, *Abaqus PDF Documentation. Abaqus Example Problems Manual, vol1*,

2005.

- [15] ASTM, *ASTM E8/E8M - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, 2009.
- [16] Abaqus, *Abaqus PDF Documentation. ABAQUS/Explicit: Advanced Topics*, 2005.
- [17] F. U. T. Yoshida, «A model of large-strain cyclic plasticity and its application to springback simulation.,» *International Journal of Mechanical Sciences*, nº 45, p. 1687–1702, 2003.
- [18] R. Machain, *Conformado de chapas laminadas en frío.*, 2003.
- [19] ASTM, *ASTM E2492 - Standard Test Method for Evaluating Springback of Sheet Metal Using the Demeri Split Ring Test*, 2012.