

Grado Universitario en Ingeniería Mecánica  
2018-2019

*Trabajo Fin de Grado*

“El efecto de la anisotropía en la  
formación de inestabilidades en  
probetas de tracción sometidas a  
cargas de impacto”

---

Luis Corral Campos

Tutor

José Antonio Rodríguez-Martínez

Leganés, 4 de Julio de 2019



*[Incluir en el caso del interés de su publicación en el archivo abierto]*

Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial – Sin Obra Derivada**



## **RESUMEN**

En el presente trabajo se lleva a cabo un estudio del efecto de la anisotropía en la formación de inestabilidades en probetas de Al-7075 sometidas a cargas dinámicas. Este estudio se realiza mediante la simulación numérica de las condiciones de contorno de un ensayo de tracción dinámica para un amplio rango de velocidades de impacto que dan lugar a la localización del cuello que produce el fallo del material. Para ello se ha realizado una descripción del material utilizando el modelo constitutivo de Hill [5], que contempla las características correspondientes a un material cuya anisotropía es causada por orientaciones preferentes de los granos. Las simulaciones permiten realizar una comparativa entre nueve direcciones de carga distintas y un rango de velocidades de impacto de 5 m/s a 40 m/s. Los resultados obtenidos muestran los diferentes modos de inestabilidades formados, la dirección de formación de las bandas de estricción, la ubicación de la localización del cuello, el tiempo en localizar el cuello y la capacidad de absorción de energía ante un impacto para todos los casos estudiados.

Palabras clave: Ensayo de tracción dinámica; Método de elementos finitos; Anisotropía; Resistencia a impacto; Inestabilidad de cuello.

## **ABSTRACT**

In the present paper is carried out a study of the effect of anisotropy on the formation of instabilities in dynamically loaded specimens of Al-7075. This study is performed by a numerical simulation of the contour conditions of a dynamic tensile test for a wide range of impact velocities that give rise to the location of the neck that produces the material's failure. For this purpose, a definition of the material has been made using the Hill constituent model [5], which contemplates the characteristics corresponding to a material whose anisotropy is caused by preferential orientations. The simulations allow to compare nine different load directions and an impact velocity range of 5 m/s to 40 m/s. The results obtained show the different modes of instabilities formed, the direction of formation of the stricter bands, the position of the neck location, the time needed to located the neck and the capacity of energy absorption before an impact for all cases studied.

Keywords: Dynamic tensile test; Finite element method; Anisotropy; Impact resistance; Neck instability.



## AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar, agradecimientos a la Universidad Carlos III de Madrid por estos años de formación y en concreto a mi tutor del tfg, José Antonio Rodríguez-Martínez, por toda la ayuda de estos meses.*

*A mi primo David, por la ayuda gracias a la que pude elegir la carrera y universidad que quería.*

*A mis apoyos en Leganés, mi primo Dani, mis compañeros de piso y mis amigos de la universidad, que se han convertido en personas imprescindibles para mí.*

*A mis tíos, tías, abuelas y abuelos por siempre apoyarme y hacerme tan feliz. Por supuesto, a Julio y a mis primos, hermanos, amigos o como se les quiera llamar.*

*A mis amigos de Guadalajara, quienes son parte de mi familia.*

*A mi hermana, mi mejor amiga y la persona que más quiero en el mundo.*

*Por último, a las dos personas a las que agradeceré todo lo bueno que me pase en la vida, no cabría en estas líneas poner todo lo que hacéis por mí, simplemente sois los mayores ejemplos de superación y humildad que se puede tener, a mi madre y a mi padre.*



## ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. Motivación .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Metodología .....	3
1.4. Aportaciones originales .....	3
2. ESTADO DEL ARTE .....	5
2.1. Ensayos cuasi estáticos .....	5
2.2. Ensayos dinámicos .....	7
2.3. Ensayo de tracción dinámica .....	8
3. MATERIAL ESTUDIADO .....	11
3.1. Propiedades del aluminio .....	11
3.2. Aleaciones de aluminio .....	12
3.3. Aleación Al-7075 .....	14
4. MODELIZACIÓN CONSTITUTIVA .....	16
4.1. Precedentes: Criterio de plastificación de von Mises .....	16
4.2. Criterio de plastificación de Hill .....	16
4.3. Aplicación del criterio de plastificación de Hill en tensión plana .....	20
4.4. Experimentación de Korber y Hoff .....	23
4.5. Determinación del ángulo de localización en un material isótropo .....	24
4.6. Determinación del ángulo de localización en un material ortótropo .....	25
5. MODELO NUMÉRICO .....	28
5.1. Método de solución .....	29
5.2. Definición de la geometría .....	29
5.3. Definición del material .....	29
5.4. Definición del step .....	31
5.5. Definición de las condiciones de contorno .....	31
5.6. Definición del mallado .....	32
6. ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	34

6.1. Descripción del tipo de inestabilidad formado y correspondencia con el modelo constitutivo.....	35
6.2. Influencia de la dirección de carga en la localización de la deformación plástica .....	40
6.3. Influencia de la velocidad de impacto en la localización de la deformación plástica .....	46
7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS .....	53
7.1. Conclusiones.....	53
7.2. Trabajos futuros .....	54
8. MARCO REGULADOR.....	55
9. ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO .....	57
9.1. Presupuesto .....	57
9.2. Impacto socio-económico .....	58
10. REFERENCIAS .....	61



## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1. 1. Test de impacto frontal de automóvil.....	2
Fig.2. 1. Máquina de tracción simple .....	6
Fig.2. 2. Curva tensión-deformación obtenida y representación de probeta en los estados de deformación elástica, deformación plástica y rotura. ....	6
Fig.2. 3. Máquina de ensayo de tracción dinámica y sistema de sujeción. ....	9
Fig.3. 1. Evolución de la resistencia y dureza de una aleación de aluminio .....	13
Fig.4. 1. Estructura interna de materiales isótropos (a) y anisótropos (b). ....	17
Fig.4. 2. Representación del ángulo formado entre la dirección de laminación y el eje de la probeta y las dos posibles direcciones de banda de estricción .....	23
Fig.4. 3. Gráfica de los valores del ángulo $\theta$ en función de los valores del ángulo $\alpha$ ....	24
Fig.4. 4. Representación del sistema de coordenadas dada una dirección de laminación y del ángulo formado por la banda de estricción $\theta$ . ....	25
Fig.5. 1. Plano acotado de la probeta de tracción .....	29
Fig.5. 2. Comparativa de los resultados experimentales y teóricos de la tensión de tracción en régimen plástico. ....	30
Fig.5. 3. Condiciones de contorno aplicadas sobre la probeta .....	31
Fig.5. 4. Discretización en elementos finitos de la probeta.....	33
Fig.6. 1. Superficies de plastificación de criterio de Hill y von Mises.....	34
Fig.6. 2. Representación de la localización de la inestabilidad de cuello para una velocidad de impacto de $v=40$ m/s en todas las direcciones de carga estudiadas con una deformación plástica máxima de valor $\epsilon_p = 0.64$ .....	36
Fig.6. 3. Detalles de la formación de cuello en el ensayo realizado a $v=40$ m/s para las orientaciones $0, 11.25, 37.75, 67.75, 90^\circ$ .....	36
Fig.6. 4. Representación de la orientación de banda de estricción en función de la orientación de carga.....	39
Fig.6. 5. Representación de la localización de la inestabilidad de cuello para una velocidad de impacto de $v=20$ m/s en todas las direcciones de carga estudiadas con una deformación plástica máxima de valor $\epsilon_p = 0.64$ .....	41
Fig.6. 6. Detalles de la formación de cuello en el ensayo realizado a $v=20$ m/s para las orientaciones $0, 11.25, 37.75, 67.75$ y $90^\circ$ .....	41
Fig.6. 7. Curvas fuerza axial-desplazamiento para $v=30$ m/s y para las orientaciones $\alpha=0^\circ, \alpha=11.25^\circ, \alpha=22.5^\circ, \alpha=33.75^\circ, \alpha=45^\circ, \alpha=56.25^\circ, \alpha=67.5^\circ, \alpha=78.75^\circ, \alpha=90^\circ$ .....	43

Fig.6. 8. Curvas $X-\alpha$ que relacionan la ubicación en dirección de tracción de la formación de la inestabilidad frente a la orientación para $v=5\text{m/s}$ , $v=10\text{m/s}$ , $v=20\text{m/s}$ , $v=30\text{m/s}$ y $v=40\text{m/s}$ . .....	46
Fig.6. 9. Representación de la localización de la inestabilidad de cuello para una velocidad de impacto de $v=10\text{ m/s}$ en todas las direcciones de carga estudiadas con una deformación plástica máxima de valor $\epsilon_p = 0.64$ .....	47
Fig.6. 10. Detalles de la formación de cuello en el ensayo realizado a $v=10\text{ m/s}$ para las orientaciones $0,11.25,37.75,67.75$ y $90^\circ$ .....	47
Fig.6. 11. Curvas fuerza axial-desplazamiento en dirección de tracción para una orientación $\alpha= 0^\circ$ y velocidades de impacto $v=5\text{ m/s}$ y $v=10\text{ m/s}$ (a) y $v=20\text{ m/s}$ , $v=30\text{ m/s}$ y $v=40\text{ m/s}$ (b).....	49
Fig.6. 12. Curvas fuerza axial-desplazamiento en dirección de tracción para una orientación $\alpha= 67.5^\circ$ y velocidades de impacto $v=5\text{ m/s}$ y $v=10\text{ m/s}$ , $v=20\text{ m/s}$ , $v=30\text{ m/s}$ y $v=40\text{ m/s}$ .....	50
Fig.6. 13. Curvas $X-\alpha$ que relacionan la ubicación en dirección de tracción de la formación de la inestabilidad frente a la velocidad de impacto para valores $\alpha=33.75^\circ$ , $\alpha=45^\circ$ , $\alpha=78.75^\circ$ y $\alpha=90^\circ$ . .....	51



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1: Clasificación de los ensayos de caracterización.....	5
Tabla 3. 1. Composición química de la aleación Al-7075.....	14
Tabla 5. 1. Valor de los ratios de tensiones de plastificación.....	30
Tabla 9. 1. Desglose de horas empleadas en la realización del proyecto .....	57
Tabla 9. 2. Costes totales para la realización del proyecto.....	58
Tabla 9. 3. Resumen de las valoraciones del impacto socio-económico.....	60



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación

La industria ha avanzado desde el siglo XIX hacia modos de producción con tiempos reducidos, reflejándose en un aumento de la producción. Además, la velocidad en el avance tecnológico experimentado en el último siglo determina la subsistencia de una empresa en su sector. Es por ello, que la adaptación a las nuevas tecnologías facilita la simplificación, optimización y mejora de la calidad de los productos desarrollados.

La necesidad de conocer el comportamiento de una estructura solicitada externamente ha estado siempre presente en la fase de diseño de cualquier tipo de objeto. Si bien inicialmente se utilizaban métodos únicamente basados en la experiencia de pruebas y errores, el avance de los estudios de la mecánica de sólidos ha sentado las bases para el conocimiento de los parámetros que determinan el comportamiento de los materiales, como se desarrolla en [1].

Entre todas las metodologías desarrolladas por la mecánica de sólidos, cabe destacar en la elaboración del presente proyecto el método de los elementos finitos (MEF), cuya aplicación en software de ingeniería asistida por ordenador es frecuentemente utilizada para la asistencia al diseño y el análisis de modelos y prototipos.

El estudio de la respuesta de los materiales frente a fenómenos de impacto proporciona información de la capacidad de absorción de energía a baja y media velocidad o la protección ofrecida frente a impactos de alta velocidad. Los impactos sobre estructuras son definidos por Acosta [2] como “condiciones de carga agresivas”. Se trata de sollicitaciones dinámicas de corta duración y alta intensidad que dan lugar a la formación de inestabilidades que producen el fallo del material. La simulación de un ensayo de tracción dinámica permitirá realizar una caracterización del comportamiento del material teniendo en cuenta el efecto de la anisotropía y la sensibilidad ante las distintas condiciones de carga. El impacto socio-económico de este estudio se refleja en el capítulo 9.

La caracterización del material es imprescindible para establecer unas premisas de diseño en estructuras. En concreto, las estructuras fabricadas con aleaciones ligeras requieren habitualmente de estos estudios, por lo que son frecuentes en industrias como la automovilística, ferroviaria, civil, aeroespacial etc. Sin embargo, se trata de ensayos por lo general muy costosos de realizar en máquinas especializadas, de ahí deriva la gran ventaja tanto económica como temporal de realizar simulaciones numéricas en probetas que cumplan las dimensiones especificadas en las normativas expuestas en el capítulo 8.

Los escenarios en los que se hace necesario un análisis de sollicitaciones de impacto en estructuras son muy variados, algunos de los más destacados son explicados por Goicolea [3].

En la industria del automóvil, las estrictas directivas que rigen el lanzamiento de nuevos modelos hacen estas pruebas esenciales. Los conocidos como *crash test* o ensayos de impacto, como el mostrado en la Fig.1.1, tienen como finalidad garantizar la seguridad de los ocupantes del vehículo ante cualquier tipo de impacto. Estas pruebas están destinadas a diseñar estructuras con una capacidad suficiente de disipación de energía en el caso de impacto, manteniendo la rigidez necesaria para reducir las posibilidades de daño de los ocupantes.

En cuanto a los elementos de seguridad vial, que tienen por objetivo reducir los daños en caso de una salida de la vía, siguen las mismas premisas, permitiendo la suficiente deformación de la estructura para disipar parte de la energía del impacto.

En la industria aeroespacial se presenta la necesidad de diseñar estructuras ligeras y resistentes a grandes velocidades de impacto. Los impactos de pájaros o de pequeñas piezas de basura espacial son habitualmente ensayados sobre estas estructuras.



Fig.1. 1. Test de impacto frontal de automóvil realizado por Euro Ncap [4].

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo de Fin de Grado es el estudio, mediante simulaciones numéricas, del efecto de la anisotropía en la formación de inestabilidades a partir de las cuales se produce la fractura en una probeta de la aleación de aluminio Al-7075. Para alcanzar este objetivo se deben alcanzar otros objetivos secundarios que contemplan la descripción del material utilizando el modelo constitutivo de Hill [5], la simulación de las condiciones de contorno de un ensayo de tracción dinámica y la comparación de resultados para nueve direcciones de carga distintas y un rango de velocidades de impacto de 5 m/s a 40 m/s.

### 1.3. Metodología

La metodología seguida para la realización del estudio ha sido resumida en los siguientes puntos:

- Creación y desarrollo de un modelo numérico para la simulación del ensayo de tracción dinámica sobre probetas anisótropas en el código comercial ABAQUS/*Explicit*.
- Interpretación de los resultados en base al modelo constitutivo desarrollado por Hill [5] mediante la determinación del tiempo de localización, modos de inestabilidad presentes y direcciones de las bandas de estricción.
- Análisis de sensibilidad de comportamiento frente a la dirección de carga aplicada que comprende los valores de  $\alpha$  igual a  $0^\circ$ ,  $11.25^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $33.75^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $56.25^\circ$ ,  $67.5^\circ$ ,  $78.75^\circ$  y  $90^\circ$ . Las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas para velocidad de impacto constante y dirección de carga variable son utilizadas para comparar la energía absorbida para cada valor de dirección de carga. Además, para este análisis se obtienen las curvas de la ubicación de la inestabilidad para un valor  $v = cte$  y las distintas direcciones de carga.
- Análisis de sensibilidad de comportamiento frente a distintas velocidades de impacto que comprenden  $v = 5 \text{ m/s}$ ,  $v = 10 \text{ m/s}$ ,  $v = 20 \text{ m/s}$ ,  $v = 30 \text{ m/s}$  y  $v = 40 \text{ m/s}$ . Para ello se obtendrán, en primer lugar, las curvas fuerza-desplazamiento para direcciones de carga constante y velocidad de impacto variable, que permitirá realizar una comparativa de la capacidad de energía absorbida en el impacto. En segundo lugar, las curvas que relacionan la ubicación de la inestabilidad frente a las distintas velocidades de impacto.

### 1.4. Aportaciones originales

El presente Trabajo de Fin de Grado se ha realizado en base a estudios previos como N`souglo et al. [6], sin embargo, presenta una serie de aportaciones originales que amplían el conocimiento de los estudios sobre el comportamiento de materiales bajo cargas dinámicas:

- Estudio del comportamiento de la aleación ligera Al-7075 cuya anisotropía es descrita por el criterio de plastificación de Hill [5].
- Estudio de la influencia de las direcciones de carga respecto a las direcciones de banda de estricción formadas y las propiedades mecánicas del material.

- Determinación de las condiciones de diseño y de ensayo más favorables para una lámina delgada de Al-7075.
- Se ha establecido la relación existente entre el tiempo de localización del cuello de estricción y la capacidad de absorción de energía frente a un impacto.
- Determinación de la velocidad crítica de impacto para probetas normalizadas de Al-7075.
- Explicación del efecto de la velocidad de impacto en las fuerzas de inercia inducidas en la probeta.
- Efecto de la velocidad de impacto en la ubicación de la inestabilidad.

## 2. ESTADO DEL ARTE

Los ensayos de caracterización están destinados a obtener experimentalmente los valores de los parámetros que determinan las propiedades y el comportamiento mecánico de un material, así como la relación entre los mismos ante sollicitaciones externas. La variedad de ensayos existentes se puede clasificar en función de la velocidad de deformación a la que se somete el material de ensayo o por la duración de este:

**TABLA 2. 1: CLASIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN ESTABLECIDA EN [7].**

<b>Tipo de ensayo</b>	<b>Rango de velocidades de deformación <math>\dot{\epsilon} \sim 1/s</math></b>	<b>Duración del ensayo <math>t \sim s</math></b>
<b>Ensayo de fluencia o de relajación</b>	$10^{-8} < \dot{\epsilon} < 10^{-4}$	$10^2 < t < 10^6$
<b>Ensayos cuasi-estáticos</b>	$10^{-4} < \dot{\epsilon} < 10^{-2}$	$10^0 < t < 10^2$
<b>Ensayos a velocidades intermedias</b>	$10^{-2} < \dot{\epsilon} < 10^{-1}$	$10^{-2} < t < 10^0$
<b>Ensayos a velocidades altas</b>	$10^2 < \dot{\epsilon} < 10^4$	$10^{-6} < t < 10^{-2}$
<b>Ensayos a velocidades muy altas</b>	$10^4 < \dot{\epsilon}$	$t < 10^{-6}$

### 2.1. Ensayos cuasi estáticos

Por lo general se trata de ensayos que se realizan con aparatos universales que trabajan a velocidad de deformación constante y están dotados de sistemas de medición y toma de datos.

Para conocer el ensayo de tracción dinámica simulado en el presente trabajo es necesario conocer previamente la base de este, es decir, el ensayo de tracción y compresión simple. Este es el tipo de ensayo mecánico más fundamental que se realiza en los materiales, es sencillo y económico.

Como explica Sánchez Soto [8], el ensayo de tracción y compresión simple consiste en la aplicación externa de una carga de tracción o compresión sobre una probeta con dimensiones normalizadas hasta llegar a la rotura. Se lleva a cabo en una máquina de tracción como la representada esquemáticamente en la Fig.2.1, sujetando la probeta por ambos extremos mediante mordazas. Se comienza a aplicar una carga a velocidad baja y constante sobre uno de los extremos mientras que el otro permanece fijo.

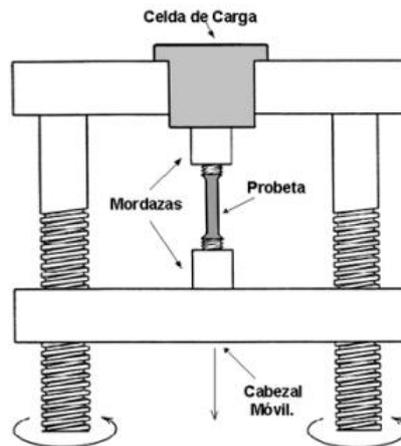


Fig.2. 1. Esquema de una máquina de tracción simple [9].

Es un ensayo destructivo, en el cual se va aplicando cada vez más carga sobre la probeta hasta que en un primer momento pasa al régimen elasto-plástico que se aprecia como una variación en las dimensiones de la sección y longitud del espécimen para finalmente alcanzar la fractura.

La adquisición de datos de la carga aplicada en cada instante y de la variación de las dimensiones de la probeta proporcionan información referente al módulo de elasticidad o de Young, límite elástico, resistencia a rotura, curva tensión-deformación (ver Fig. 2.2) y comparativa del comportamiento del material a tracción y compresión.

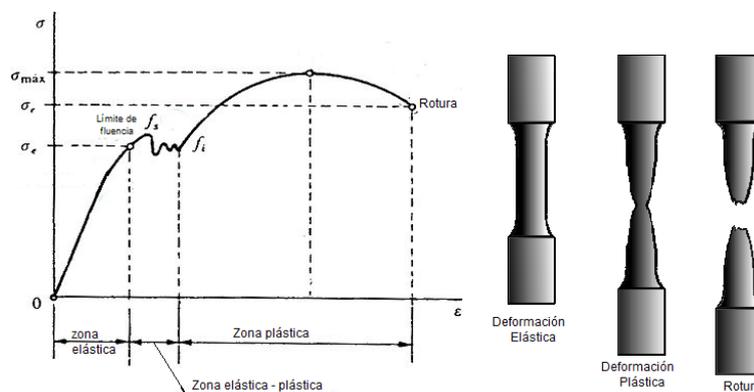


Fig.2. 2. Curva tensión-deformación obtenida en un ensayo de tracción y representación de probeta en los estados de deformación elástica, deformación plástica y rotura [10].

Otras alternativas de ensayos cuasi estáticos son el ensayo de compresión diametral o tracción indirecta y el ensayo de flexión en tres puntos.

- El ensayo de compresión diametral consiste en la aplicación de una carga de compresión de manera uniforme a lo largo de dos generatrices opuestas de un espécimen cilíndrico generando una tensión de tracción uniforme en todo el diámetro del plano de carga vertical que dará lugar a la rotura [11].

- En ensayo de flexión en tres puntos se basa en la aplicación de una carga en el centro de la probeta de ensayo, que se encuentra apoyada en sus extremos, generando tensiones de tracción y compresión a lo largo del espesor de esta.

## 2.2. Ensayos dinámicos

Los ensayos dinámicos son explicados en [8] como aquellos empleados en la evaluación de la capacidad de un material para soportar cargas aplicadas a gran velocidad. Además de tener por objetivo el conocimiento del comportamiento del material a altas velocidades de impacto, estos ensayos también estudian la resistencia a impacto, entendiendo esta como “la energía por unidad de superficie que es necesaria para inducir al fallo de un material” [8]. La resistencia a impacto, estudiada por Acosta [2], está determinada principalmente por la tenacidad del material y no se trata de una propiedad elemental del material, es decir, va a depender de factores geométricos, de la velocidad de impacto y del criterio de plastificación entre otras contribuciones que pueden alterar su valor.

Los dispositivos utilizados para realizar este tipo de ensayos son más complejos que los utilizados en ensayos cuasi estáticos. En la actualidad cuentan con instrumentación para el registro de la señal fuerza-tiempo que permite medir la deformación y tensión en cada instante y la tensión de rotura para obtener los valores de resistencia a impacto.

Otras dificultades nombradas por Sánchez Soto [8] en los ensayos dinámicos son, además de la variabilidad de la resistencia de impacto y la complejidad de los dispositivos, la necesidad de tener en cuenta los efectos inerciales que pueden dificultar la interpretación de datos entre la fuerza registrada y la que realmente actúa ya que provocan oscilaciones en las curvas fuerza-tiempo, mayores niveles de ruido en la realización de los ensayos y la ausencia de una normativa universal como ocurre generalmente en los ensayos cuasi estáticos.

Además del ensayo en máquina de tracción dinámica, utilizado en las simulaciones realizadas y desarrollado en el siguiente epígrafe, también son utilizados para la caracterización frente a cargas de impacto otros como los ensayos de Charpy e Izod, la torre de caída de peso, la barra de Hopkinson y el cañón de gas.

- El método Charpy, objeto de estudio en [12], consiste en dejar caer un péndulo sobre el centro de una probeta entallada y ensayada a flexión en tres puntos. La medición de la energía potencial del punto inicial y final del péndulo permite conocer la energía absorbida en el impacto. El método Izod es un ensayo idéntico al descrito de Charpy, pero en este se sujeta media probeta y la mitad libre es la que recibe el impacto siendo sometida a un ensayo de flexión simple.

- El ensayo de torre de caída de peso consiste en dejar caer una carga que se acelera por la acción de la gravedad sobre una probeta sujeta por la configuración de Charpy o Izod y sometida a un ensayo de flexión. Los aparatos de medición incluidos permiten conocer el desplazamiento por integración de la fuerza de contacto [8].
- El ensayo de cañón de gas se realiza mediante el impacto de un proyectil sobre la probeta de ensayo [13]. Para la adquisición de datos cuenta con medidores de velocidad y cámaras de alta velocidad.
- El ensayo mediante la barra Hopkinson, detallado en [14], se basa en la medición de la amplitud de ondas transmitidas y reflejadas por una probeta debido a deformación generada por el impacto. La amplitud de la onda reflejada es directamente proporcional a la deformación de la probeta mientras que la amplitud de la onda transmitida es directamente proporcional a la tensión experimentada, pudiendo así definir la curva tensión deformación en estas condiciones.

### **2.3. Ensayo de tracción dinámica**

En 1937, Mann [15] presenta su estudio fundamental del diseño de ensayos de impacto sobre probetas, convencido de que la caracterización mediante un ensayo de tracción cuasi estático no proporcionaba información sobre el comportamiento de un material frente a cargas dinámicas. El efecto de la inercia de la carga o la capacidad de absorción de energía frente a sollicitaciones a alta velocidad no son estudiados en los ensayos estáticos. Mann sentaría las bases para que autores como Clark [16] y Parker et al. [17], ya en la década de los 40, llevarán a cabo investigaciones sobre el efecto de la velocidad de deformación en aleaciones utilizadas en la industria aeronáutica.

El creciente desarrollo de la aeronáutica con nuevos diseños y uso de materiales más ligeros implicaba un mayor conocimiento del comportamiento de los materiales frente a cargas de impacto, lo que hizo que la industria aeronáutica impulsara este tipo de estudios. En el mismo periodo temporal, los ensayos experimentales realizados en el Instituto Tecnológico de California permitieron que se llevarán a cabo estudios sobre estos como el realizado por Beardsley et al. [18].

A finales de la década de 1940, la línea de desarrollo se centró en establecer unos principios teóricos de lo estudiado a partir de los experimentos realizados, entre los que destaca la investigación de Clark et al. [19]. Se determinó como principal problema para caracterizar los materiales mediante ensayos dinámicos la variación espacio-temporal de la velocidad de deformación a lo largo de la probeta. Además, se observó que este problema se acentuaba con el aumento de la velocidad de ensayo. Esta idea sería reforzada décadas más tardes por los estudios de Lubliner [20], quien definió como carácter esencial

del ensayo de tracción dinámica la falta de uniformidad de las variables de estado del material respecto del tiempo y del espacio.

En las décadas de 1950 y 1960, las investigaciones estaban enfocadas en la búsqueda de una solución para reducir los efectos de la inercia que alteraban los resultados obtenidos experimentalmente. La solución alcanzada por distintos autores como Simons et al. [21] fue el uso de probetas cortas, de modo que se pudieran despreciar los fenómenos de propagación de la deformación.

Desde finales de la década de 1960 comienza el desarrollo del análisis numérico del ensayo de impacto mediante el uso de ordenadores. Aplicando el método de elementos finitos se podía conocer las propiedades dinámicas del material. Este desarrollo sigue vigente hasta la actualidad, entre los muchos estudios realizados se puede citar el realizado por Glema et al. [22].

En los últimos años son muchas las investigaciones realizadas sobre estos ensayos como es el caso del estudio realizado por Rusinek et al. [23] en el que se analizan los efectos de la inercia sobre distintas geometrías de probeta. Klepaczko [24] presenta un estudio de la velocidad crítica de impacto. La influencia de la velocidad y la longitud del fuste de la probeta es estudiada por N`souglo et al. [6].

El estudio desarrollado en este trabajo tiene como objetivo continuar la investigación sobre caracterización de materiales sometidos a ensayos de tracción dinámica.

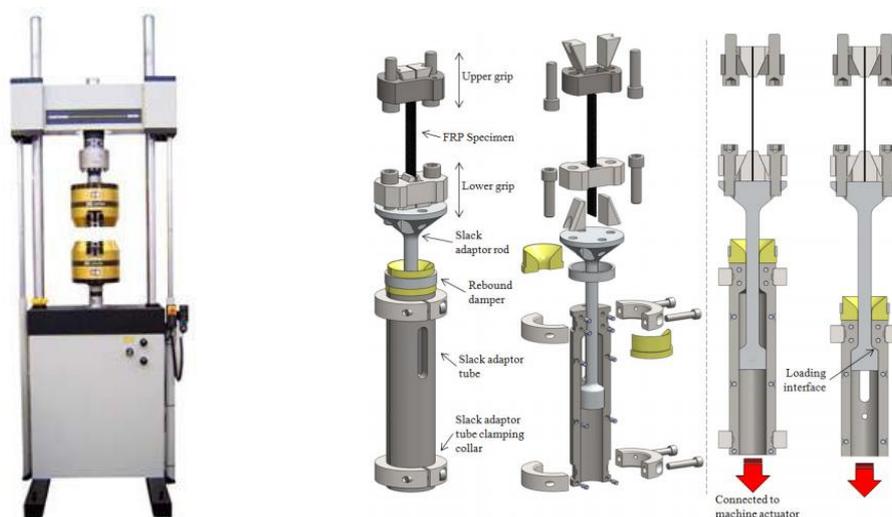


Fig.2. 3. Máquina de ensayo de tracción dinámica y sistema de sujeción de la probeta cuyo funcionamiento es explicado por Battams [25].

Este ensayo se realiza de la misma forma que el ensayo de tracción simple. Un extremo de la probeta está sujeto mediante pinzas o mordazas mientras que sobre el otro se aplica una carga de impacto. En tracción simple se aplican velocidades de deformación bajas de forma que es considerado un ensayo cuasi estático, por el contrario, en el caso del ensayo dinámico el pistón o pistones que accionan el mecanismo de prueba se aceleran hasta 10-

15 m/s. La complejidad de las máquinas de ensayo como la mostrada en la Fig. 2.3. hace de estos un ensayo complicado en cuanto a la interpretación de los resultados y limitado en cuanto al rango de velocidades alcanzado. Es por ello, que la simulación numérica de este tipo de ensayos es usual en diversos campos de la industria para la realización de este tipo de estudios.

### 3. MATERIAL ESTUDIADO

En las simulaciones realizadas se han utilizado probetas de aleación de aluminio Al-7075 por lo que resulta importante para el estudio realizado conocer el comportamiento del aluminio y sus aleaciones.

#### 3.1. Propiedades del aluminio

El aluminio es uno de los principales componentes que se encuentran en la corteza terrestre. Su versatilidad y propiedades químicas y mecánicas tanto en estado puro como en sus aleaciones hacen de este un material con gran variedad de usos y aplicaciones en todos los sectores de la industria.

El aluminio, después del acero, es el material más utilizado para la fabricación de elementos estructurales. Como es definido por Maffia [26], se trata de un metal brillante, con estructura cristalina en red cubica centrada en las caras (FCC), cuya densidad es  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , lo que hace que su peso sea prácticamente  $1/3$  del peso del acero. Además, presenta una muy buena relación resistencia mecánica/peso en aleaciones, haciendo de este un material recurrido para la fabricación de estructuras ligeras y resistentes de construcciones aeronáuticas o vehículos terrestres entre una multitud de aplicaciones.

La alta conductividad tanto eléctrica como térmica presentada por el aluminio es otra de las características diferenciadoras de este material, siendo la conductividad eléctrica cercana al 60% de la del cobre y aproximadamente 3,5 veces la del acero, lo que lo hace imprescindible en industrias como la destinada a intercambiadores de calor industriales. No obstante, se han desarrollado aleaciones de aluminio con alta resistividad eléctrica para aquellos usos que lo requieran como son, por ejemplo, componentes de motores eléctricos.

La corrosión progresiva es uno de los principales problemas que se encuentra en el uso de aceros, sin embargo, el aluminio presenta una alta resistencia a la corrosión. Las superficies expuestas al oxígeno se recubren de una capa del orden de la centésima de micra de óxido de aluminio que protege al resto del material de la oxidación. Esta capa no se desprende, como ocurre en el acero y si es dañada se crea inmediatamente una nueva capa de óxido y, al tratarse de una capa incolora no afecta al aspecto superficial del material. Esta propiedad hace del aluminio y sus aleaciones altamente resistentes al vapor de agua, ácido nítrico y a muchos otros compuestos químicos.

Se trata de un material no ferromagnético por lo que es frecuente su uso en las industrias tanto eléctrica como electrónica. También su condición de material no inflamable favorece su uso en aplicaciones extremas o que requieran de este tipo de materiales.

El punto de fusión tiene un valor cercano a 933 K, esto, junto a su gran maleabilidad y ductilidad favorecen la fácil fabricación de estos materiales mediante procesos de moldeo y conformado.

Los principales inconvenientes que puede presentar son la falta de un límite a fatiga bien definido que puede ser en muchos casos bajo, y el bajo punto de fusión, que hace que no se comporte bien a altas temperaturas disminuyendo la dureza, la resistencia a tracción y el límite elástico y aumentando la ductilidad.

La escasa dureza, que puede facilitar el desgaste abrasivo de estos materiales, tiene unos valores de dureza Brinell comprendidos entre  $HB = 15$  para aluminio blando puro hasta  $HB = 110$  en aleaciones como es el caso del Al-7075.

Por lo general, los métodos de endurecimiento realizados sobre las aleaciones aumentan la resistencia del material a tracción del aluminio puro. Además, este aumento de la resistencia se traduce también en un aumento del límite elástico y una reducción de la ductilidad del material. La resistencia a compresión es igual al límite elástico a tracción y la resistencia a cizallamiento se encuentra entre un 55 y 80% de la resistencia a tracción.

### **3.2. Aleaciones de aluminio**

Se trata de aleaciones ligeras cuyo principal componente es el aluminio. Los metales de adición más empleados son el cobre, silicio, magnesio, zinc, titanio, manganeso, estaño... Estos pueden aparecer como único material aleante o combinados, por lo general, sin superar el 15% de la aleación.

La clasificación de las aleaciones de aluminio, desarrollada en los artículos referenciados [27] y [28], se hace en base a los componentes de la aleación y si se trata de aleaciones para forja o para fundición. Se diferencia, además, entre aquellas aleaciones que son tratables térmicamente y, por lo tanto, endurecidas por precipitación y aquellas que no son tratables térmicamente y solo pueden ser endurecidas por deformación en frío.

Entre las aleaciones de aluminio para fundición cabe destacar las aleaciones de aluminio-silicio correspondientes a la serie 4xxx. Estas son las más frecuentemente utilizadas junto con las de aluminio-cobre y presentan una proporción de silicio que varía desde el 5 al 20% de la composición total de la aleación.

El diagrama de fases de esta aleación, a partir del cual se desarrolla la explicación dada por Maffia [26], muestra un punto eutéctico con un 11.6% de Si y una temperatura de 850 K. El silicio endurece la aleación además de mejorar la fluidez en colada y la resistencia ante agentes externos. Además, son aleaciones dúctiles, que presentan buena resistencia al impacto, elevada conductividad tanto térmica como eléctrica y bajo coeficiente de dilatación. Por lo general, son aleaciones difíciles de mecanizar por la naturaleza abrasiva del silicio. En algunos casos, se incluye como material de la aleación una cantidad cercana al 0,1% de sodio, que modifica el punto eutéctico a un 13% de Si y una temperatura

eutéctica de 843 K. Esto favorece la formación de una estructura compuesta por granos extremadamente finos que mejorarán notablemente las propiedades mecánicas de la aleación.

Las aleaciones de la serie 1xxx, 3xxx y 5xxx son aleaciones para forja no tratables térmicamente.

La serie 1xxx comprende aleaciones compuestas por aluminio al 99% o mayor pureza e impurezas de hierro y de silicio principalmente. También puede contener hasta un 0.12% de cobre para mejorar su resistencia mecánica. Se trata de aleaciones con gran resistencia a la corrosión que tienen una buena conductividad térmica y eléctrica, y presentan una buena ductilidad debido, en parte, a que sus propiedades mecánicas son bajas. Se puede mejorar su resistencia con métodos de endurecimiento por deformación en frío. Estas propiedades determinan su uso en industrias como la eléctrica y la química.

La serie 3xxx está formada por aleaciones de aluminio cuyo principal elemento aleante es el manganeso, en una proporción inferior al 1,5%. Se trata de aleaciones que presentan mejores propiedades mecánicas que las de la serie 1xxx. El manganeso aumenta la dureza, la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión de las aleaciones de aluminio.

La serie 5xxx está formada por aleaciones en las que el principal elemento aleante es el magnesio. La cantidad de magnesio en la aleación se encuentra en torno al 5%. En comparación con la serie 3xxx, el magnesio endurece más el aluminio que el manganeso (aproximadamente el 0.8% de Mg endurece lo mismo que un 1.25% de Mn). Están caracterizadas por una dureza media-alta obtenida por deformación en frío, buena soldabilidad, buena resistencia a la corrosión y baja capacidad de trabajo en frío.

Las aleaciones para forja tratables térmicamente son las correspondientes a las series 2xxx, 6xxx y 7xxx. El tratamiento de envejecimiento térmico o también conocido como endurecimiento por precipitación consiste, en palabras de Baile Puig [29] en “la formación de fases metaestables que dificulten el movimiento de dislocaciones mejorando la dureza y resistencia”. El efecto de este tipo de endurecimiento viene representado en la Fig. 3.1.

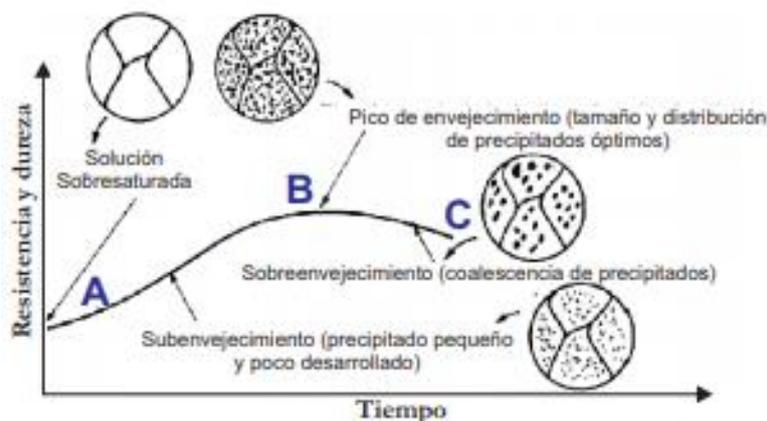


Fig.3. 1. Evolución esquemática de la resistencia y dureza de una aleación de aluminio [29].

El principal elemento de aleación de la serie 2xxx es el cobre, no obstante, puede incluir otros elementos en menor proporción entre los que destaca el magnesio. Se realiza con frecuencia un tratamiento térmico de solución lo que mejora las propiedades mecánicas aumentando la tensión de fluencia. También se puede realizar tratamiento térmico por precipitación (envejecimiento) lo que favorece la mejora de la resistencia y dureza del material. Estas aleaciones presentan un mal comportamiento frente a agentes atmosféricos, en muchos casos, afectadas por la corrosión intergranular. Este problema es frecuentemente solucionado con revestimientos de otras aleaciones de la serie 6xxx o que contienen zinc y actúan como protectores corrosivos. Su buena relación resistencia/peso hace que estos materiales tengan una gran relevancia en la construcción de estructuras y piezas que requieran de una buena resistencia con un bajo peso.

Las aleaciones de la serie 6xxx tienen como materiales aleantes el silicio y magnesio en las proporciones necesarias para la formación de siliciuro de magnesio ( $Mg_2Si$ ). Además de estos aleantes, pueden incluirse otros en menor proporción para formar compuestos como el  $FeCrAlSi$  que endurecen notablemente la aleación. Están caracterizadas por una buena soldabilidad, maquinabilidad y una buena resistencia a la corrosión. Sin embargo, atendiendo a la resistencia presentan peores características que las serie 2xxx y 7xxx. Pueden ser tratadas térmicamente por envejecimiento.

En las aleaciones de aluminio de la serie 7xxx el principal elemento aleante es el zinc, que puede encontrarse en proporciones del 1 al 8% de la composición total. Además, también es frecuente el uso de magnesio que, combinándose con el zinc forma el compuesto  $MgZn_2$  que es el principal elemento endurecedor de estas aleaciones. La alta solubilidad del Zn y Mg en el aluminio permite una alta densidad de formación de precipitados y, por lo tanto, de endurecimiento. También se pueden añadir otros aleantes como Cu o Cr en menores proporciones. El tratamiento térmico se suele aplicar levemente debido a la baja resistencia a la corrosión que presentan estas aleaciones. La aleación Al-7075 es la más utilizada de esta serie.

### 3.3. Aleación Al-7075

En el presente proyecto se ha utilizado como material para las probetas de tracción la aleación Al-7075. Esta aleación, introducida en 1943 por la empresa Alcoa, como se refleja en el estudio de Singh [30] tiene como principal material aleante el zinc y su composición viene detallada en la tabla 3.1:

**TABLA 3. 1. COMPOSICIÓN QUÍMICA (%) DE LA ALEACIÓN AL-7075 [30]**

Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Ti	Zn	Al
0.18-0.28	1.2-2.0	0.50	2.1-2.9	0.30	0.40	0.20	5.1-6.1	Balance

Esta aleación de la serie 7xxx, tratable térmicamente por solución y envejecimiento, es utilizada en aplicaciones que requieren de alta resistencia, ductilidad, dureza y resistencia a la fatiga con una baja densidad. Tiene una baja resistencia a la corrosión en comparación con otras aleaciones de aluminio. Su uso destaca en las industrias automovilística y aeronáutica.

También conocidas bajo el nombre comercial de Zircal, Ergal o Fortal Constructal, muy frecuentemente son procesadas en forma de láminas para su posterior comercialización. El comportamiento del material en condiciones dinámicas variará en función de las direcciones de carga y de la velocidad de impacto, por lo que para su caracterización mecánica se hacen imprescindibles los ensayos de tracción y compresión simple y tracción dinámica explicados en el capítulo 2.

## 4. MODELIZACIÓN CONSTITUTIVA

El modelo utilizado para describir la anisotropía del material es el desarrollado por Hill [5]. Este modelo sugiere una descripción de la plastificación y flujo plástico de un material anisótropo a escala macroscópica.

### 4.1. Precedentes: Criterio de plastificación de von Mises

El estudio realizado toma como base la teoría desarrollada por von Mises [31], por medio de la cual se establecen relaciones entre el tensor de tensiones y el tensor incremento de deformaciones en materiales isótropos. Esta teoría introdujo el concepto de potencial plástico como una función de los componentes del tensor de tensiones. Suponiendo un criterio de plastificación de la siguiente forma:

$$f(\sigma_{ij}) = cte \quad (1)$$

La relación existente entre tensor de tensiones y deformaciones viene dada por la expresión:

$$d\varepsilon = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda \quad (2)$$

Donde  $\lambda$  es un factor de proporcionalidad escalar cuyo valor es siempre positivo. En el caso de tratarse de un material isótropo,  $f$  no depende de la elección de los ejes y la ecuación es una relación tensorial.

Además, von Mises desarrolló una teoría para determinar el límite elástico en aquellos materiales cuyas propiedades no varían con la dirección y que están sometidos a una combinación de tensiones. Esta teoría fue confirmada por estudios realizados en las siguientes décadas. Aplicando el concepto de potencial plástico al criterio de plastificación se obtiene la siguiente expresión:

$$2f(\sigma_{ij}) = (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) = 2Y^2 \quad (3)$$

Donde  $Y$  es el límite elástico de una probeta sometida a tracción uniaxial.

### 4.2. Criterio de plastificación de Hill

Los estudios precedentes sobre materiales isótropos suponían una buena aproximación para algunos propósitos, pero no tenían en cuenta muchos de los fenómenos que causan la alteración de la estructura atómica y molecular regular de sólidos cristalinos. Esta alteración, conocida como anisotropía, puede ser producida por inclusiones laminares, cavidades, tensiones residuales o internas u orientaciones preferentes entre otros

fenómenos. Hill centró su estudio en la anisotropía producida por orientaciones preferentes.

La anisotropía por orientaciones preferentes de los cristales, como apunta Hill [5] en la elaboración del modelo constitutivo, no es un fenómeno de rara ocurrencia. Ante una alteración externa, los cristales individuales se alargan en la dirección de la tensión de tracción más severa (ver Fig.4.1) haciendo que un material inicialmente isótropo pase a ser anisótropo respecto a muchas propiedades físicas. Por ejemplo, a nivel industrial, procesos como la laminación, estirado y extrusión producen características distintas a las que inicialmente tenía el material. Esta anisotropía puede reducirse mediante tratamientos térmicos para obtener unas propiedades cercanas a las deseadas.

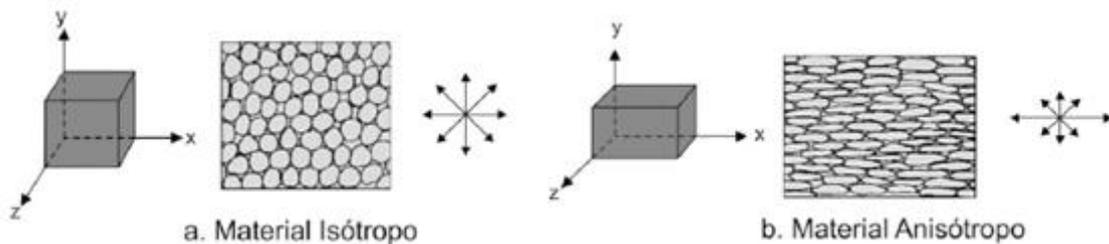


Fig.4. 1. Estructura interna de materiales isótropos (a) y anisótropos (b). Figura obtenida de [32].

En el desarrollo de este criterio hay que, en primer lugar, determinar los planos de simetría ortogonales a las tres direcciones conocidas como ejes de anisotropía. Estos ejes variarán a medida que avanza la deformación del elemento al que corresponden.

En segundo lugar, en concordancia con lo dicho anteriormente por von Mises, se selecciona una función de segundo orden compuesta por las tensiones para representar el potencial plástico. Que esta función sea de segundo orden, a efectos del criterio de plastificación, implica que el comportamiento en cualquier dirección es igual a tracción que a compresión, sin embargo, procesos como la laminación en frío produce una orientación de los granos que componen la estructura del elemento, lo que da lugar al efecto Bauschinger. Este efecto consiste en el comportamiento presente en determinados metales para los cuales el límite elástico a tracción es distinto al límite elástico a compresión, como apunta M. Lorenzo et al. [33]. Sin embargo, los tratamientos térmicos como el recocido reducen el efecto Bauschinger. Esto implica la independencia del criterio de plastificación desarrollado por Hill respecto del tercer invariante genérico del tensor de tensiones desviadoras, como se explica en [34], pudiéndose expresar de la siguiente forma:

$$f(J_2) = 0 \tag{4}$$

Por lo tanto, considerando la ortotropía del material, la ausencia del efecto Bauschinger y el criterio de plastificación de von Mises, el criterio de plastificación en estos materiales queda de la forma expresada en la Ec. (5):

$$2f = F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{zx}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 = 1 \quad (5)$$

Donde  $F, G, H, L, M, N$  son constantes que caracterizan el estado de anisotropía del material.

La Ec. (5) tiene la forma presentada cuando los ejes de anisotropía son tomados como ejes de referencia. En este caso se puede establecer la relación entre tensiones de plastificación en las direcciones de los ejes de anisotropía y los parámetros  $F, G, H$  :

$$\begin{aligned} \frac{1}{X^2} &= G + H; & 2F &= \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \\ \frac{1}{Y^2} &= H + F; & 2G &= \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2} - \frac{1}{Y^2} \\ \frac{1}{Z^2} &= F + G; & 2H &= \frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Estas relaciones muestran cómo solo una de las constantes de anisotropía  $F, G, H$  puede ser negativa y para ello debe haber grandes diferencias en las distintas tensiones de plastificación  $X, Y, Z$ . También se pueden establecer relaciones entre las tensiones tangenciales de plastificación  $R, S, T$  con las constantes de anisotropía  $L, M, N$ :

$$2L = \frac{1}{R^2}; \quad 2M = \frac{1}{S^2}; \quad 2N = \frac{1}{T^2} \quad (7)$$

En el caso de haber simetría rotacional sobre el eje  $z$ :

$$F = G; \quad N = G + 2H \quad (8)$$

En el caso de isotropía, es decir, simetría esférica completa se cumple:

$$F = G = H; \quad M = N = 3F \quad (9)$$

Quedando la ecuación de plastificación de Hill de manera idéntica al criterio de materiales isotrópicos desarrollado por von Mises.

Una vez desarrollado el criterio de plastificación de Hill, estaría definido el potencial plástico de estos materiales siempre que se conozcan las seis tensiones de plastificación

independientes  $X, Y, Z, R, S, T$ . Aplicando la relación entre tensores de tensión y deformación desarrollada por von Mises para este potencial plástico se obtiene:

$$\begin{aligned}
 d\varepsilon_{xx} &= d\lambda[H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy}) + G(\sigma_{xx} - \sigma_{zz})]; & d\varepsilon_{yz} &= d\lambda L\sigma_{yz} \\
 d\varepsilon_{yy} &= d\lambda[F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz}) + H(\sigma_{yy} - \sigma_{xx})]; & d\varepsilon_{zx} &= d\lambda M\sigma_{zx} \\
 d\varepsilon_{zz} &= d\lambda[H(\sigma_{zz} - \sigma_{xx}) + G(\sigma_{zz} - \sigma_{yy})]; & d\varepsilon_{xy} &= d\lambda N\sigma_{xy}
 \end{aligned} \tag{10}$$

Estas expresiones tienen la forma de la Ec. (10) cuando tensiones e incremento de deformación corresponden con los ejes principales de anisotropía.

Se comprueba que si se realiza el sumatorio de las deformaciones en las direcciones de los ejes de anisotropía siempre serán cero independientemente del sistema de tensión al que estén sometidos. Esto va en concordancia con la hipótesis que afirma que “la plastificación es independiente de la componente hidrostática de la tensión” [34]. La componente hidrostática no produce plastificación ya que no induce movimiento de dislocaciones ni plastificación por maclado, además, no produce un cambio de volumen permanente. Esta comprobación demuestra que el criterio de plastificación es independiente de la tensión hidrostática y dependerá únicamente del segundo invariante del tensor de tensiones desviadoras como se ha indicado en la Ec. (4).

Las relaciones establecidas en las Ecs. (6), (7) y (10) permiten el desarrollo de experimentos para conocer las relaciones proporcionales entre tensiones de plastificación en las direcciones de los ejes de anisotropía ( $X, Y, Z$ ) y entre las tensiones de plastificación tangenciales ( $R, S, T$ ).

Por último, para definir completamente el modelo constitutivo utilizado se ha incluido la función de plastificación del material en la Ec. (11).

$$g = \bar{\sigma}_e - \sigma_t = 0 \tag{11}$$

Donde  $\bar{\sigma}_e$  es la tensión equivalente dada por la expresión:

$$\bar{\sigma}_e = \sqrt{\frac{3}{2} \left[ \frac{F(\sigma_y - \sigma_z)^2 + G(\sigma_z - \sigma_x)^2 + H(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{xz}^2 + 2N\sigma_{xy}^2}{F + G + H} \right]} \tag{12}$$

Y  $\sigma_t$  corresponde a la tensión de tracción dada por la Ley de Voce, cuya expresión es:

$$\sigma_t = \sigma^o + \sigma_k e^{b-\bar{\varepsilon}_p} \quad (13)$$

donde  $\sigma^o = 226.3 \text{ MPa}$  corresponde al límite elástico inicial,  $\sigma_k = 131.9 \text{ MPa}$  es el módulo de plasticidad,  $b = -32.23$  es una constante del material y  $\bar{\varepsilon}_p$  es la deformación plástica equivalente, dada por la Ec. (14):

$$\bar{\varepsilon}_p = \sqrt{\frac{2}{3}(F + G + H) \left[ \frac{1}{FG + GH + HF} (F\varepsilon_x^2 + G\varepsilon_y^2 + H\varepsilon_z^2) + \left( \frac{2\varepsilon_{yz}^p}{2L} + \frac{2\varepsilon_{zx}^p}{2M} + \frac{2\varepsilon_{xy}^p}{2N} \right)^2 \right]} \quad (14)$$

### 4.3. Aplicación del criterio de plastificación de Hill en tensión plana.

Los conocimientos alcanzados sobre el criterio de plastificación para metales anisótropos desarrollado por Hill y la relación existente entre tensiones y deformaciones se pueden aplicar a dos casos muy frecuentes en la mecánica de sólidos como son el caso de deformación plana y de tensión plana. Esta aplicación permite establecer relaciones entre las constantes que definen el estado de anisotropía de forma que se puedan establecer unas pautas para conocer las direcciones principales de tensiones y deformaciones respecto a los ejes de anisotropía y las direcciones cuya tensión de plastificación es máxima o mínima. Estos aspectos son imprescindibles en la teoría de Hill para la determinación de las direcciones de las bandas de estricción más adelante.

En el caso del presente proyecto, las simulaciones numéricas se realizan sobre probetas correspondientes a una lámina delgada cuyo espesor corresponde a la dirección  $z$  (dirección perpendicular al plano), es decir, se trata de un caso de tensión plana. La dimensión en la dirección  $z$  es mucho menor a las direcciones  $x, y$ , en estos casos, no se tienen en consideración las tensiones en el plano  $z$ , quedando los tensores de tensiones y deformaciones de la siguiente forma:

$$[T] = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad [D] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{\gamma_{xy}}{2} & 0 \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} & \varepsilon_y & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad (15)$$

Conociendo esto y aplicándolo sobre el criterio de plastificación de Hill de la Ec. (5) se obtiene este para el caso descrito:

$$(G + H)\sigma_{xx}^2 - 2H\sigma_{xx}\sigma_{yy} + (H + F)\sigma_{yy}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 = 1 \quad (16)$$

El estado de tensión, aplicando una tracción uniaxial en dirección del eje de la probeta que forma un ángulo  $\alpha$  con el eje  $x$  (eje  $x$  en dirección de rodadura y eje  $y$  perpendicular a esta) es:

$$\sigma_{xx} = \sigma \cos^2 \alpha, \quad \sigma_{yy} = \sigma \sin^2 \alpha, \quad \sigma_{xy} = \sigma \sin \alpha \cos \alpha \quad (17)$$

Mediante la relación entre tensiones en los ejes de ortotropía se determina que los máximos y mínimos de la tensión de plastificación se encuentran en las direcciones de los ejes ortótropos y en la dirección que forma un ángulo  $\alpha$  con respecto al eje  $x$ . El valor de  $\alpha$  viene dado por la expresión:

$$\frac{\sigma_{yy}}{\sigma_{xx}} = \frac{\sigma \sin^2 \alpha}{\sigma \cos^2 \alpha} = \tan^2 \alpha = \frac{N - G - 2H}{N - F - 2H} \quad (18)$$

La relación entre las constantes de anisotropía de estas ecuaciones proporciona la siguiente información:

- Sí  $N > F + 2H; G + 2H$  la tensión de plastificación tendrá un valor máximo desigual en los ejes  $x, y$  y un valor mínimo en la dirección que forma un ángulo  $\alpha$  con el eje  $x$ . En este caso los ejes principales de tensión y deformación coinciden cuando los ejes principales de tensión están a lo largo de los ejes anisótropos y cuando  $\alpha$  tiene el valor dado por la Ec. (18).
- Sí  $N < F + 2H; G + 2H$  la tensión de plastificación tendrá un valor mínimo igual en los ejes  $x, y$  y un valor máximo en la dirección que forma un ángulo  $\alpha$  con el eje  $x$ . En este caso los ejes principales de tensión y deformación coinciden cuando los ejes principales de tensión están a lo largo de los ejes anisótropos y cuando  $\alpha$  tiene el valor dado por la Ec. (18).
- Sí  $N$  es un valor intermedio entre  $F + 2H$  y  $G + 2H$  no hay valor de  $\alpha$  que satisfaga la Ec. (18). La tensión de plastificación tiene un máximo en  $x$  y un mínimo en  $y$  si  $F > G$  y lo contrario si la desigualdad es al revés. En este caso los ejes principales de tensión y deformación coinciden cuando los ejes principales de tensión coinciden con los ejes de anisotropía.

Es frecuente, cuando se trata de placas laminadas de metal, conocer a partir de la experimentación sobre la probeta las relaciones entre las deformaciones transversales y normales en determinadas direcciones para el instante inicial de la plastificación, en lugar de conocer las tensiones de plastificación. Es por ello que se hace necesario, para el uso del criterio de plastificación anisótropo de Hill en estos casos, establecer relaciones entre las constantes de anisotropía y las deformaciones.

Asumiendo la hipótesis de tensión plana y dados los ejes  $x, y, z$  en las direcciones descritas se realiza un ensayo de tracción uniaxial en dirección  $x$ . Mediante la medición de las deformaciones se definen los coeficientes de Lankford, descritos por Martínez-Donaire [35] como la relación entre la deformación transversal ( $\varepsilon_w$ ) y la normal ( $\varepsilon_t$ ) en una determinada dirección.

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (19)$$

Los coeficientes de Lankford en las direcciones de 0°, 45° y 90° están a su vez relacionados con los ratios de tensiones de plastificación según las siguientes ecuaciones para el caso de tensión estudiado:

$$R_{22} = \sqrt{\frac{r_{90^\circ}(r_{0^\circ} + 1)}{r_{0^\circ}(r_{90^\circ} + 1)}}; \quad R_{33} = \sqrt{\frac{r_{90^\circ}(r_{0^\circ} + 1)}{r_{0^\circ} + r_{90^\circ}}}; \quad R_{12} = \sqrt{\frac{3r_{90^\circ}(r_{0^\circ} + 1)}{(r_{0^\circ} + r_{90^\circ})(2r_{45^\circ} + 1)}}$$

$$R_{11} = R_{13} = R_{23} = 1 \quad (20)$$

A partir de aquí se pueden determinar las constantes de anisotropía definiendo la Ecs. (6) y (7) en función de los ratios de tensión de la siguiente forma:

$$F = \frac{1}{2(\sigma^o)^2} \left( \frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right)$$

$$G = \frac{1}{2(\sigma^o)^2} \left( \frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right)$$

$$H = \frac{1}{2(\sigma^o)^2} \left( \frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right)$$

$$L = \frac{3}{2\tau^{o2}R_{23}^2}$$

$$M = \frac{3}{2\tau^{o2}R_{13}^2}$$

$$N = \frac{3}{2\tau^{o2}R_{12}^2} \quad (21)$$

Donde  $\sigma^o$  es la tensión de plastificación de referencia,  $\tau^o = \sigma^o / \sqrt{3}$  es la tensión de plastificación tangencial de referencia y  $R_{ij}$  son los ratios de tensión de plastificación anisótropos.

Además, Hill concluye este estudio determinando que las direcciones características de la estricción son direcciones de extensión cero en el plano XY de la probeta. Por lo tanto,

realizando el sumatorio de las deformaciones en direcciones  $x$  e  $y$  se obtiene la siguiente expresión:

$$[(G + H)\sigma_{xx} - H\sigma_{yy}]dx^2 + 2N\sigma_{xy}dxdy + [(F + H)\sigma_{yy} - H\sigma_{xx}]dy^2 = 0 \quad (22)$$

#### 4.4. Experimentación de Korber y Hoff

La teoría desarrollada en este capítulo es aplicada a los experimentos realizados en 1928 por Korber y Hoff [36], quienes llevaron a cabo pruebas de tracción uniaxial sobre probetas aplicando distintas direcciones de carga, mostrando la existencia de dos direcciones de banda de estricción igualmente posibles que dependerán del ángulo formado entre la dirección de carga y la dirección de laminación. De estos ensayos obtuvieron dos conclusiones genéricas:

- En una probeta delgada de material isótropo las bandas de estricción forman un ángulo aproximado de  $55^\circ$  con respecto a la dirección de carga (eje de la probeta).
- La segunda conclusión de sus observaciones corresponde a las probetas laminadas con una dirección de fibras determinada con respecto a la dirección de carga (ángulo  $\alpha$ ) como viene indicado en la Fig. 4.2. En estas se formaban dos direcciones de banda de estricción, correspondientes a las secciones amarillas de la Fig.4.2. con un ángulo respecto al eje de la probeta cuyo valor no podía ser determinado con los conocimientos que se tenían hasta el momento.

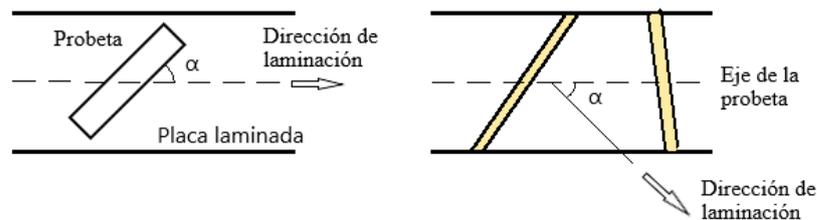


Fig.4. 2. Representación del ángulo formado entre la dirección de laminación y el eje de la probeta y las dos posibles direcciones de banda de estricción.

Sobre estas observaciones Korber y Hoff representaron una gráfica que muestra el ángulo formado entre la dirección de carga y la dirección de laminación en el eje de abscisas (ángulo  $\alpha$ ) y el ángulo agudo existente entre la dirección de carga y la dirección de las bandas de estricción en el eje de ordenadas (ángulo  $\theta$ ). Para ello, se realizaron ensayos de tracción para todos los valores de  $\alpha$  comprendidos entre  $0$  y  $\pi/2$  tomando los valores del ángulo formado por las direcciones de banda de estricción con el eje de la probeta en cada caso, quedando la gráfica de la siguiente forma:

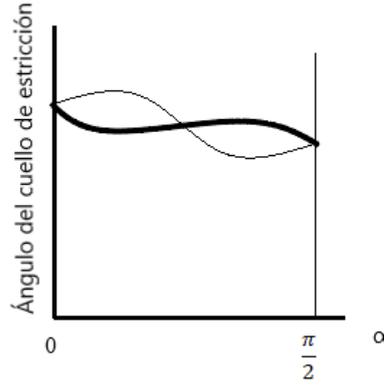


Fig.4. 3. Gráfica de los valores del ángulo  $\theta$  en función de los valores del ángulo  $\alpha$ .

La experimentación sobre probetas anisótropas determinó que el ángulo formado por las bandas de estricción no seguía ninguna regla general, no obstante, si se observó como una de las direcciones de banda crecía en una dirección parecida a la de laminación mientras que la otra crecía en una dirección cercana a la perpendicular con esta. Sobre la gráfica, ha sido representada la línea de menor espesor (correspondiente a la banda en dirección similar a la de laminación) y la línea gruesa (correspondiente a la banda en dirección similar a la perpendicular a la laminación), las cuales coinciden en tres puntos.

Esta coincidencia corresponde a aquellos valores de  $\alpha$  para los cuales las direcciones de banda de estricción respecto al eje de la probeta forman el mismo ángulo y, por lo tanto, crecerán a igual velocidad en la formación de la estricción. Dos de estos puntos se dan en los valores  $\alpha = 0$  y  $\alpha = \pi/2$ , algo que es lógico recordando la condición de simetría aplicada en el criterio de plastificación de materiales anisótropos, ya que los ejes principales de ortotropía para estos dos ángulos en concreto van en direcciones paralela y perpendicular al eje de la probeta. El tercer punto de coincidencia será dado por la aplicación teórica del criterio de Hill sobre los resultados experimentales de Korber y Hoff.

#### 4.5. Determinación del ángulo de localización en un material isótropo

Suponiendo una probeta isótropa de pequeño espesor en la que se puede considerar la hipótesis de tensión plana, se conocen los valores de las constantes de anisotropía (caso isótropo), que son  $F = G = H = \frac{1}{3}N$ . Aplicando estas consideraciones sobre la Ec. (22) desarrollada para casos de tensión plana basándose en el criterio de extensión cero en las direcciones de banda de estricción, se tiene:

$$\frac{2}{3}N\sigma_{xx}dx^2 - \frac{1}{3}N\sigma_{xx}dy^2 = 0 \quad (23)$$

Despejando esta expresión se obtiene el valor de la tangente del ángulo  $\theta$  :

$$\frac{dy}{dx} = \tan \theta = \sqrt{2} \quad (24)$$

Por lo tanto, queda demostrada la primera conclusión alcanzada por Korber y Hoff. El ángulo formado por las bandas de estricción en una placa isotrópica tiene un valor  $\theta \approx 55^\circ$  respecto a la dirección del eje de la probeta.

#### 4.6. Determinación del ángulo de localización en un material ortótropo

La aplicación de la teoría desarrollada por Hill sobre probetas en ensayos de tracción concluye con la determinación de los valores de direcciones de carga para las cuales los ángulos formados por las bandas de estricción son los mismos y con la determinación de los valores de estos para cualquier dirección de carga.

Dado el caso de la Fig. 4.4. en el que se aplica una tensión en la dirección positiva del eje de la probeta y la dirección de laminación forma un ángulo  $\alpha$  con la dirección de aplicación de la carga, se forma una banda de estricción con un ángulo  $\theta$  respecto al eje de la probeta de ensayo. Se toman por ejes de anisotropía el eje  $x$  en la dirección de laminación, el eje  $y$  en dirección perpendicular a la laminación y el eje  $z$  normal al plano de la probeta.

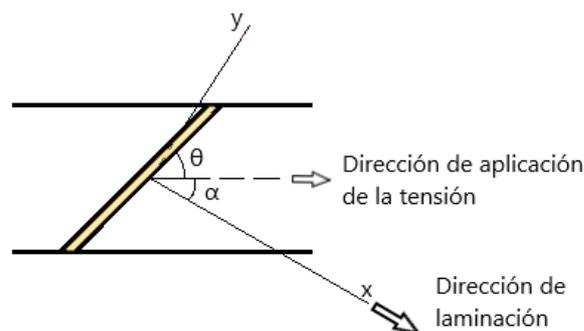


Fig.4. 4. Representación del sistema de coordenadas dada una dirección de laminación y del ángulo formado por la banda de estricción  $\theta$ .

Conocido el estado de anisotropía descrito por las constantes  $F, G, H, L, M, N$  definidas anteriormente en el desarrollo de esta teoría y la tensión  $\sigma$  aplicada a tracción sobre la probeta, se puede caracterizar este ensayo para conocer las direcciones de las bandas de estricción formadas.

Dadas las condiciones del ensayo, las tensiones en los ejes principales de anisotropía son las expresadas en la Ec. (17). Además, por la geometría descrita en la Fig. 4.4, se sabe que:

$$\frac{dy}{dx} = \tan(\theta + \alpha) \quad (25)$$

Introduciendo esto en la Ec. (22) y operando, se obtiene la siguiente ecuación que permite conocer el valor de  $\theta$  dada una dirección de carga y unos constantes anisótropas determinadas:

$$a \tan^2 \theta + b \tan \theta - c = 0 \quad (26)$$

Donde,

$$a = H + \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha [(N - F - 2H) + (N - G - 2H)]$$

$$b = 2 \sin \alpha \cos \alpha [(N - F - 2H) \sin^2 \alpha - (N - G - 2H) \cos^2 \alpha]$$

$$c = F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha + H + \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha [(N - F - 2H) + (N - G - 2H)]$$

Operando en el criterio de plastificación de Hill se muestra que el parámetro  $c = 1/\sigma^2$ , por lo tanto, su valor siempre es positivo independientemente del valor de  $\alpha$ .  $a$  es positivo si  $2N > F + G$ . Que el valor de  $a$  sea negativo es muy poco probable puesto que, en el caso de materiales isótropos, por tener un ejemplo en el que se conozcan las relaciones entre constantes anisótropas,  $N = 3F = 3G$ . Por último, el valor de  $b$  puede ser positivo, negativo o nulo. En los casos en los que los ángulos de las dos bandas de estricción formadas en la probeta sean iguales se cumple que  $b = 0$ . Estos puntos donde  $b$  es nulo, como se ha comentado anteriormente en vista de los experimentos de Korber y Hoff, corresponden a los ángulos  $\alpha = 0$ ,  $\alpha = 1/2\pi$  y a un valor intermedio ( $\bar{\alpha}$ ) que se puede obtener despejando de la igualdad  $b = 0$ .

$$\tan^2 \bar{\alpha} = \frac{N - G - 2H}{N - F - 2H} \quad (27)$$

Para estos tres valores de  $\alpha$  los ejes principales de tensión y deformación coinciden con los ejes de ortotropía.

En base al conocimiento de los tres puntos coincidentes de la gráfica basada en el estudio experimental (Fig. 4.3), falta determinar las relaciones que implican la forma y la tendencia de esta.

La forma de las curvas viene determinada por los puntos de corte, que ya han sido definidos, y por la relación entre los parámetros  $a$  y  $b$ . Evidentemente, el valor de  $\tan^2 \bar{\alpha}$  debe ser positivo y para ello existen dos opciones:

- Si  $(N - F - 2H)$  y  $(N - G - 2H)$  son positivos, el coeficiente  $b$  será negativo cuando  $\alpha < \bar{\alpha}$ , al despejar de la Ec. (26) la relación  $(-b/a)$  será positiva y, por lo tanto, el ángulo de la banda de estricción que crece en dirección cercana a la perpendicular con la fibra será numéricamente mayor que la que crece en dirección cercana a la de la fibra. Igualmente, cuando  $\alpha > \bar{\alpha}$ , la relación  $(-b/a)$  es negativa y el ángulo de la banda de estricción que crece en dirección de la fibra es mayor numéricamente al que crece a través de ella.
- Si  $(N - F - 2H)$  y  $(N - G - 2H)$  son negativos, la posición de las curvas para valores superiores e inferiores a  $\bar{\alpha}$  se intercambia respecto al caso anterior.

Para determinar la tendencia de la curva es necesario definir los valores del ángulo de banda de estricción para las direcciones de carga correspondientes a  $\alpha = 0, \pi/2$ :

$$\tan^2 \theta_1 = \frac{G}{H} + 1; \quad \tan^2 \theta_2 = \frac{F}{H} + 1 \quad (28)$$

La relación entre parámetros anisótropos establecidas por estas fórmulas determina la relación entre tensiones de plastificación en ejes de ortotropía. Esta permite conocer el rango de valores donde se encuentran los ángulos de las bandas de estricción formados con el eje de la probeta:

- Si  $Z > X, Y$  entonces tanto  $\theta_1$  como  $\theta_2$  son menores que  $55^\circ$
- Si  $Y > Z > X$  entonces  $\theta_1 > 55^\circ > \theta_2$
- Si  $X > Z > Y$  entonces  $\theta_1 < 55^\circ < \theta_2$
- Si  $X, Y > Z$  entonces tanto  $\theta_1$  como  $\theta_2$  son mayores que  $55^\circ$

## 5. MODELO NUMÉRICO

Como se ha indicado anteriormente, para el desarrollo del presente proyecto se lleva a cabo la implementación de un modelo numérico en *ABAQUS/Explicit*, con el objetivo de realizar una simulación del comportamiento de una probeta sometida a un ensayo de tracción dinámica. La comprensión del funcionamiento del software utilizado para las simulaciones realizadas implica conocer el funcionamiento del método de elementos finitos (MEF).

Este método se basa, como se explica en [37], en la discretización del sólido dividiendo la geometría en distintos elementos, cada uno de estos son los conocidos como elementos finitos y están caracterizados por una serie de nodos. Cada uno de los elementos que componen el sólido tiene una matriz de rigidez local diferente, esta se constituye a través de la integración de su volumen. Después se ensamblan las matrices de rigidez local para formar la matriz de rigidez ampliada de la estructura. Imponiendo las condiciones de contorno a esta se obtiene la matriz de rigidez reducida e invirtiéndola y operando con el vector de cargas nodales reducido se obtienen los desplazamientos nodales. A partir del conocimiento de los desplazamientos ya pueden ser calculadas las deformaciones y tensiones.

En este capítulo se desarrollará los aspectos necesarios para la simulación del ensayo. No obstante, se hace imprescindible para el desarrollo de las pruebas la correcta interpretación de los datos, la comprensión de los errores en la definición, problemas de convergencia y la capacidad computacional para la realización de una simulación cercana a la realidad.

En [38] se explican las distintas etapas que se pueden diferenciar en una simulación de elementos finitos: el pre-proceso, el procesamiento o resolución y el post-proceso.

En la primera etapa, el pre-proceso, se lleva a cabo una descripción completa del ensayo del que se va a realizar la simulación. Esta comprende la definición de la geometría de la probeta, la discretización o mallado de la estructura en un cierto número de elementos finitos con una geometría determinada, la definición de características del material o materiales utilizados y de las condiciones de contorno del problema.

La segunda etapa, el procesamiento, comprende la resolución de todas las ecuaciones planteadas en el pre-proceso, que consiste en la formación de la matriz de rigidez del conjunto y su inversión y resolución junto al vector de cargas.

La etapa final es el post-proceso y esta se basa en la visualización de los resultados del problema. Todos los resultados que se quieren obtener en esta etapa han sido definidos previamente en el pre-proceso.

### 5.1. Método de solución

El método explícito de solución incluido en ABAQUS/*Explicit* es utilizado para la resolución de problemas dinámicos en los que existen grandes gradientes de las variables estudiadas.

El estudio del efecto de la anisotropía en la formación de inestabilidades se ha realizado mediante simulaciones que comprenden un amplio rango de velocidades entre  $v = 5 \text{ m/s}$  y  $v = 40 \text{ m/s}$ . Además, para cada una de estas velocidades se han establecido nueve valores distintos del ángulo  $\alpha$  formado entre la dirección de laminación y la dirección de carga, que varían de  $\alpha = 0^\circ$  a  $\alpha = 90^\circ$ .

### 5.2. Definición de la geometría

La geometría de la probeta se ha definido como un sólido tridimensional deformable de  $1 \text{ mm}$  de espesor cuyas dimensiones en  $\text{mm}$  vienen detalladas en la Fig. 5.1:

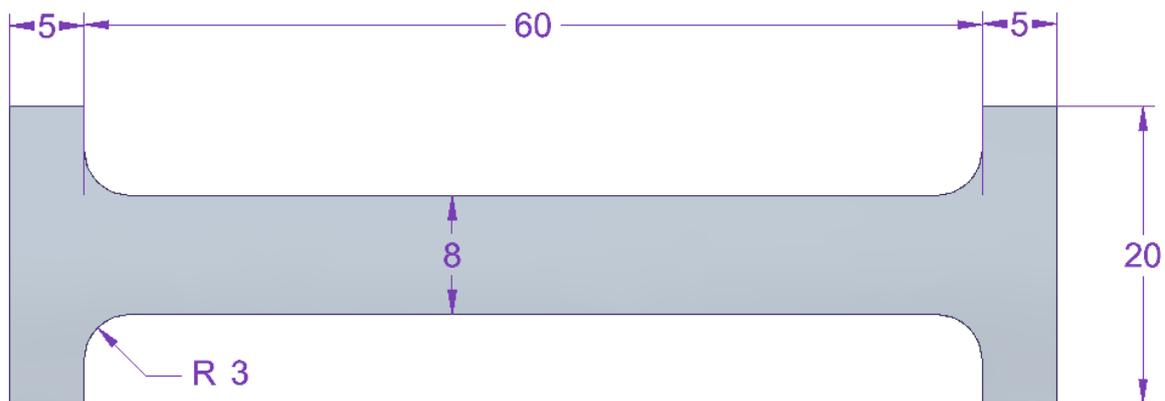


Fig.5. 1. Plano acotado de la probeta de tracción utilizada en la simulaciones.

### 5.3. Definición del material

El módulo property contiene la definición del material utilizado, la asignación del material a cada una de la secciones y la determinación de la dirección de laminación de la probeta. Para la implementación del modelo constitutivo de Hill [5] en el software utilizado es necesario definir una probeta cuyas propiedades varían en las distintas direcciones.

Para la definición de la aleación Al-7075 se ha considerado un material con comportamiento elasto-plástico con un endurecimiento isótropo independiente de la velocidad de deformación cuya densidad es  $2720 \text{ Kg/m}^3$ .

El comportamiento elástico es isótropo y sigue la Ley de Hooke, caracterizada por el módulo de Young cuyo valor para la aleación utilizada es  $E = 66.7e9 \text{ Pa}$  y por el coeficiente de Poisson  $\nu = 0.33$ .

El régimen plástico del material viene dado por la curva de endurecimiento obtenida a partir de la Ley de Voce. Esta, en palabras de Rubiales Duplas [39], “es la que más se ajusta a las evoluciones temporales de deformaciones, desplazamientos y fuerzas de los ensayos experimentales” realizados por Martínez Donaire [35] y viene dada por la expresión representada en la Ec. (13).

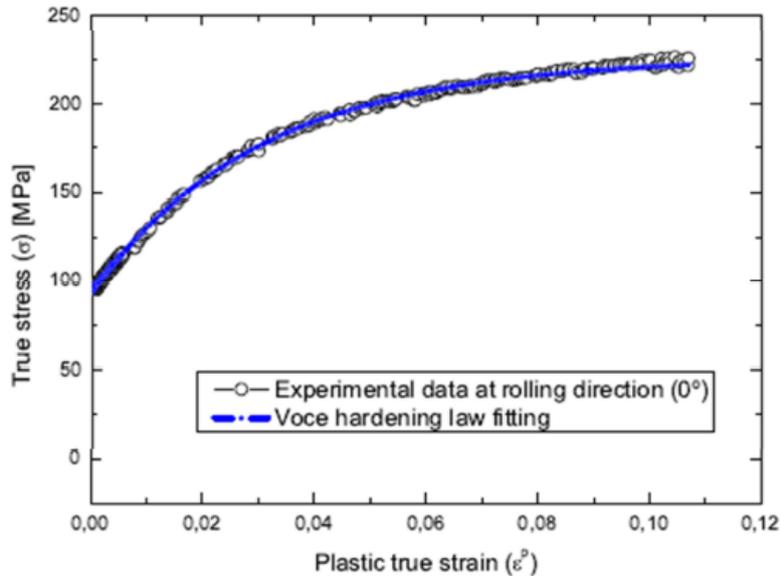


Fig.5. 2. Comparativa de los resultados obtenidos experimentalmente por Martínez Donaire [35] y los calculados teóricamente mediante la Ley de Voce.

El tipo de sección creada es sólida y homogénea de material Al-7075 aplicada sobre todo el volumen de la probeta. La determinación de la dirección de laminación de la probeta se realiza mediante la rotación de un ángulo  $\alpha$  del eje z perpendicular al plano.

Es necesario describir el comportamiento anisótropo en la zona plástica de la curva tensión-deformación del material para la implementación del modelo constitutivo utilizado. Esto se realiza a partir de los valores de los potenciales o ratios de tensiones de plastificación anisótropos, que como ha sido explicado en el capítulo 4, están relacionados con las constantes  $F, G, H, L, M, N$  que definen el estado de anisotropía en el criterio de plastificación de Hill. Los valores de los ratios obtenidos experimentalmente por Martínez Donaire [35] considerando la simplificación de tensión plana y ensayo de tracción uniaxial en la dirección x vienen dados en la tabla 5.1.

**TABLA 5. 1. VALOR DE LOS RATIOS DE TENSIONES DE PLASTIFICACIÓN OBTENIDOS EXPERIMENTALMENTE POR MARTÍNEZ DONAIRE EN [35]**

$R_{11}$	$R_{12}$	$R_{13}$	$R_{22}$	$R_{23}$	$R_{33}$
1	0.9422	1	1.1262	1	1.0587

#### 5.4. Definición del step

En el módulo step se define el tipo de problema que se va a realizar, en este caso se trata de un problema dinámico resuelto de forma explícita en el cual se han incluido los efectos no lineales debido a las grandes deformaciones, desplazamientos y rotaciones que experimenta la probeta. También se determinan que variables se quiere estudiar y la frecuencia de adquisición de datos de las mismas.

#### 5.5. Definición de las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno del problema son definidas en el módulo load. En el instante inicial, la probeta está sin velocidad aplicada en ninguno de sus extremos, presentando un estado sin deformaciones ni tensiones.

$$V_i(x, y, z, 0) = 0$$

$$\sigma(x, y, z, 0) = 0 ; \varepsilon(x, y, z, 0) = 0$$

Donde  $V_i$  corresponde a los valores de la velocidad en los ejes  $x, y, z$  en el instante inicial.

Para realizar la simulación del ensayo en máquina de tracción dinámica se restringen los movimientos en todas las direcciones de uno de los extremos de la probeta mientras que el otro extremo queda libre para la aplicación de la carga de impacto, de modo que las condiciones de contorno vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$V_x(x = 70, y, z, t) = V ; U_i(0, y, z, t) = 0$$

Donde  $U_i$  corresponde a los desplazamientos en los ejes  $x, y, z$  en el lado fijo.



Fig.5. 3. Representación de las condiciones de contorno aplicadas sobre la probeta en las simulaciones.

## 5.6. Definición del mallado

El mallado realizado para la geometría del estudio consta de 62345 elementos entre los cuales se pueden encontrar elementos lineales hexaédricos y cuadráticos tetraédricos. Para realizar el mallado se ha dividido inicialmente la probeta en cinco particiones distinguiendo entre el fuste, las dos zonas de sujeción de las mordazas y las dos zonas intermedias entre ambas donde se presenta la curvatura. Para la determinación del mallado correspondiente a cada zona se ha seguido las pautas tomadas en N`souglo et al. [6].

El fuste es la parte de la probeta donde va a haber los mayores gradientes de tensiones y deformaciones, por lo tanto, se hace necesario para un estudio preciso del ensayo tener una alta densidad de elementos en esta zona. En notación de ABAQUS, los elementos hexaédricos utilizados en esta partición son conocidos como C3D8R y se trata de elementos lineales de 8 nodos de integración reducida. Este tipo de integración utiliza un número de puntos de integración inferior al necesario para alcanzar la solución exacta de la integral que permite conocer la matriz de rigidez del elemento [40]. Las principales ventajas son la reducción de los problemas de bloqueo, un problema común en los elementos en los que la integración es completa presentando un aumento de rigidez en los mismos y una reducción del tiempo computacional. Por el contrario, se puede perder precisión en la integración de la matriz de rigidez y pueden aparecer problemas de “Hourglass”. Este tipo de problema consiste en la aparición de modos de energía de deformación nula que den lugar a resultados erróneos. En cuanto a las dimensiones de los elementos, se han puesto cuatro elementos a lo largo del espesor y se busca que todos los elementos del fuste tengan unas proporciones  $\frac{1}{2} : 1 : 1$ , por lo que el volumen de cada uno será  $(0.125 \times 0.25 \times 0.25) \text{mm}^3$ . El sentido de estas proporciones, iguales que las utilizadas en [6], es tener elementos inicialmente más cortos en la dirección de aplicación de las cargas para que las proporciones sean cercanas a 1:1:1 una vez se ha producido la localización de la deformación plástica, y favorecer así la aproximación de los resultados a la realidad en la zona donde mayores gradientes de tensiones y deformaciones hay.

En la zona de unión entre el fuste y las zonas de sujeción a las mordazas de la máquina de ensayo se han utilizado elementos tetraédricos, C3D10M en notación de ABAQUS.

En las particiones de los extremos el tipo de mallado es C3D8R con las mismas ventajas y desventajas que anteriormente se ha comentado para la zona del fuste. La principal diferencia con esa zona es la reducción de la densidad de malla ya que en las zonas de los extremos de la probeta no existen grandes gradientes de tensiones y deformaciones y reducir el número de elementos supone una reducción del tiempo computacional importante. La importancia de estos elementos radica en la toma de datos referente a las fuerzas de acción y reacción en los extremos de la probeta, para lo cual se ha creado un set de nodos en las dos superficies contenidas en el plano Y-Z.

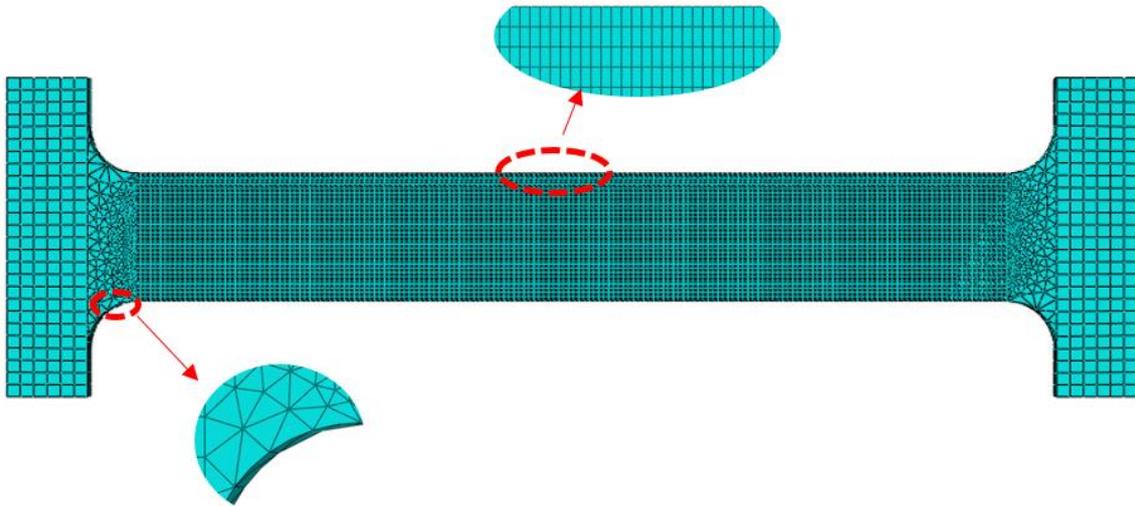


Fig.5. 4. Discretización en elementos finitos de la probeta que contiene los detalles de la zona del fuste y de la zona de la curvatura.

## 6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas para todas las velocidades de impacto y direcciones de carga comprendidas en el desarrollo del trabajo. A partir de estos resultados se realiza un estudio que se estructurará en tres partes: la primera corresponde a la descripción de las inestabilidades que dan lugar a la fractura de las probetas, además de un estudio de correspondencia con el modelo constitutivo, en la segunda parte se analiza la influencia de la dirección de carga en los resultados obtenidos y, por último, en la tercera parte se lleva a cabo un análisis de la influencia de la velocidad de carga aplicada en el comportamiento del material.

Antes de comenzar el análisis de los resultados, resulta interesante para la correcta comprensión de estos la representación de las superficies de plastificación de von Mises (criterio de plastificación utilizado para materiales isótropos) y de Hill (criterio de plastificación utilizado para materiales anisótropos como el estudiado).

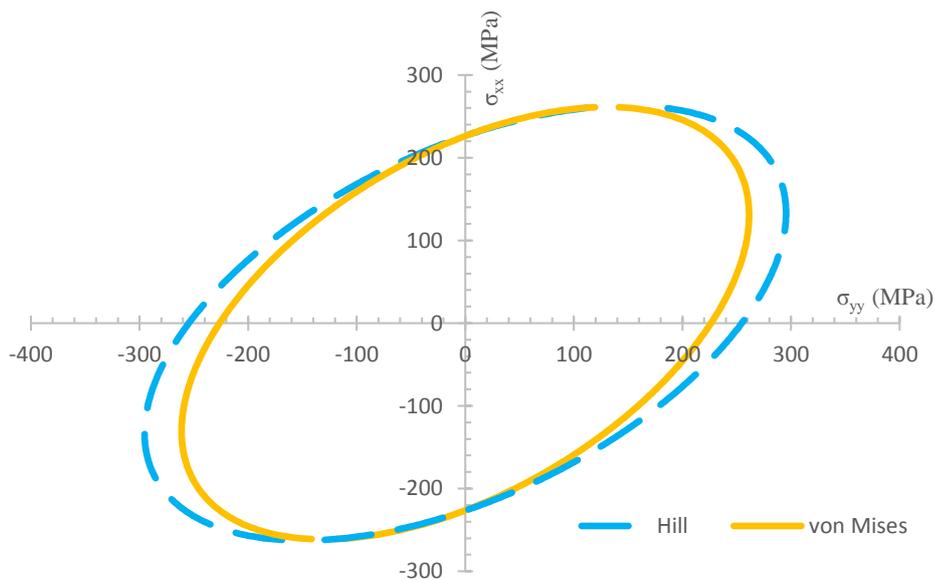


Fig.6. 1. Representación de las superficies de plastificación de criterio de Hill y von Mises.

### 6.1. Descripción del tipo de inestabilidad formado y correspondencia con el modelo constitutivo

En primer lugar, se va a realizar un análisis en base a los diferentes modos de inestabilidad formados en las probetas sujetas a estudio. También se describirá la localización de las posibles inestabilidades presentes, el tiempo que transcurre hasta la localización del cuello y el ángulo formado por la dirección de banda de estricción que crece a mayor velocidad respecto a la dirección de carga.

Las Figs. 6.2 y 6.3 muestran las probetas deformadas para una velocidad de  $v = 40 \text{ m/s}$ . Se han incluido nueve valores de  $\alpha$  distintos formados entre la dirección de laminación y la dirección de carga que varían desde  $\alpha = 0^\circ$  hasta  $\alpha = 90^\circ$  y cuya máxima deformación plástica se ha limitado a  $\bar{\epsilon}_p = 0.64$ .

Se observa, en la Fig. 6.2., como las bandas de estricción en una probeta de material anisótropo se producen formando distintos ángulos respecto a la dirección de tracción. Este hecho es contrario a lo que ocurre en una probeta de material isótropo, en el que las bandas de estricción se formarían en direcciones iguales para todas las direcciones de carga, como se había visto en los experimentos de Korber y Hoff [36] y había demostrado Hill [5] en lo descrito en la Ec.(24).

Por otro lado, en vista de las inestabilidades formadas se puede afirmar que estas son simétricas respecto de la dirección de laminación y la perpendicular a esta para todos los valores de  $\alpha$ , es decir, son simétricas respecto a unos ejes de ortotropía,

En la Fig. 6.2. las probetas están representadas en función de una escala de colores que varía desde un valor de  $\bar{\epsilon}_p = 0$  (correspondiente al color azul) hasta  $\bar{\epsilon}_p = 0.64$  (correspondiente al color rojo). La variación brusca de colores corresponde a las zonas donde mayor gradiente de deformación hay. La escala utilizada es común para todos los ensayos realizados y se ha determinado el valor de la deformación plástica máxima como el primer valor de deformación para el que la localización de la inestabilidad es apreciable en todos los casos. Además, este hecho de ser el primer valor de deformación favorece la visibilidad de la localización de formaciones de cuello secundarias que en presencia de mayores gradientes serían inapreciables.

En la representación se ha incluido el tiempo requerido para alcanzar la localización de la inestabilidad. Además, se ha añadido una semicircunferencia que marca la mitad del fuste de la probeta que permite hacer una comparativa de la ubicación de localización en los distintos casos.

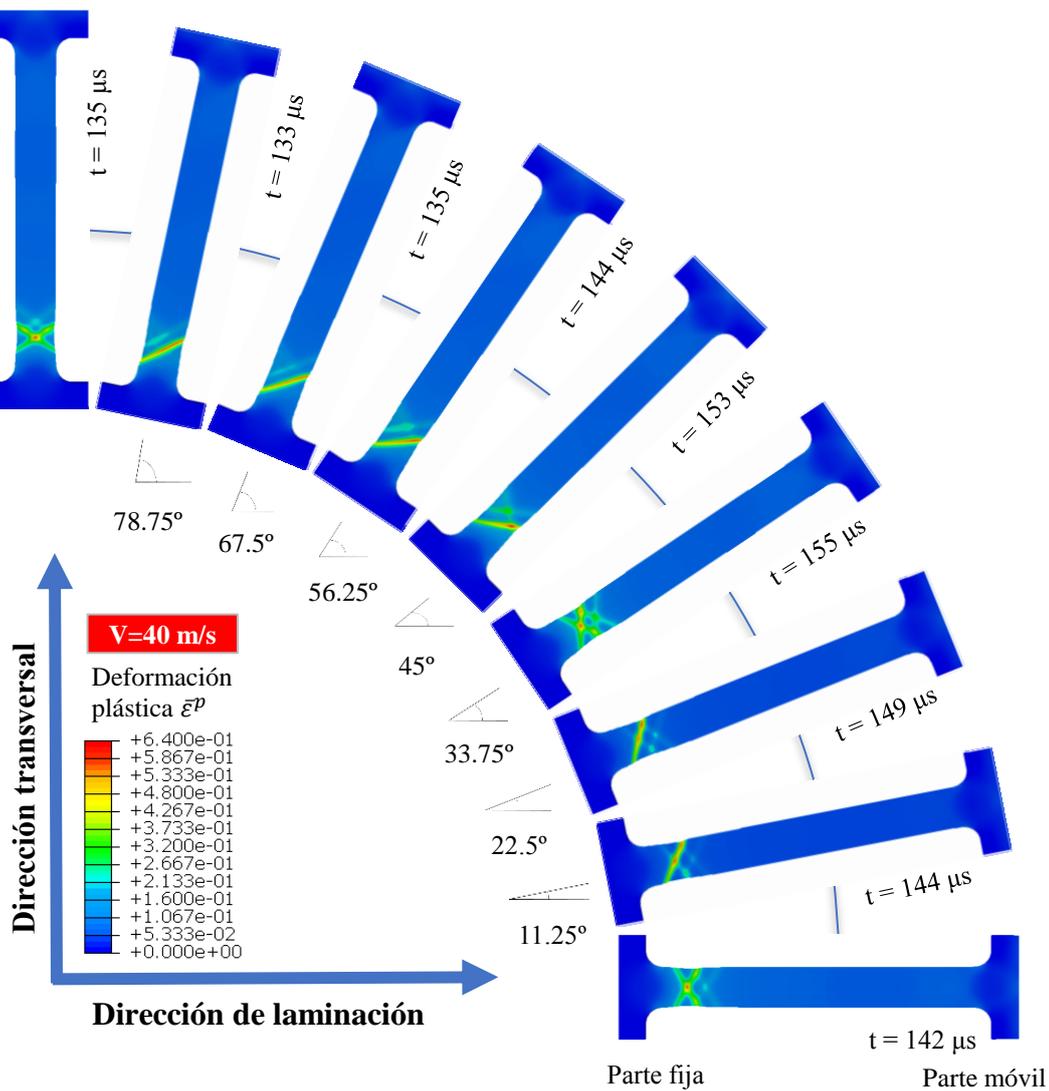


Fig.6. 2. Representación de la localización de la inestabilidad de cuello para una velocidad de impacto de  $v=40$  m/s en todas las direcciones de carga estudiadas con una deformación plástica máxima de valor  $\bar{\epsilon}_p = 0.64$ . Se recomienda para la correcta interpretación de los resultados mostrados ver la figura en formato original.

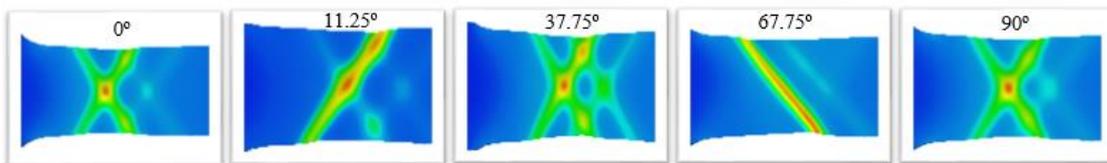


Fig.6. 3. Detalles de la formación de cuello en el ensayo realizado a  $v=40$  m/s para las orientaciones 0,11.25,37.75,67.75, 90°.

En todos los ensayos realizados mediante simulación numérica se pueden observar dos modos de inestabilidades en las probetas. El primer modo corresponde a la zona de formación del cuello en el plano X-Y que conlleva una reducción de la anchura del fuste

(dimensión  $y$ ). El segundo modo de inestabilidad viene dado por las bandas de estricción (ver Figs. 6.2 y 6.3), que implican una reducción del espesor de la probeta en esas regiones (dimensión  $z$ ).

Por otro lado, como ya se ha comentado, aparecen distintas direcciones de banda de estricción. Para realizar una comparativa entre estas se medirá el ángulo agudo formado entre las bandas de estricción existentes y la dirección de tracción (ángulo  $\theta$ ) tomando como convenio de signos  $\theta > 0$  cuando el ángulo agudo es en sentido contrario a las agujas del reloj y  $\theta < 0$  cuando sea en el sentido de las agujas del reloj.

A continuación, se va a realizar una descripción de las distintas probetas representadas en la Fig.6.2 en función de lo explicado en este epígrafe. No obstante, se observa, para todas estas probetas, que la ubicación del segundo modo de inestabilidad se da en la zona más cercana a la parte fija de la probeta. En común también está la formación de una segunda localización de cuello próxima al cuello principal. Este cuello secundario se forma a partir de direcciones de banda de estricción similares al principal y los menores gradientes de deformación hacen ver que crecerá más tarde y a velocidades menores que el principal.

- Probeta con orientación  $\alpha = 0^\circ$ : El tiempo transcurrido hasta la formación de la inestabilidad sin superar el valor de  $\bar{\epsilon}_p$  máximo determinado es de  $t = 142\mu s$ . La formación del segundo modo de inestabilidad se da a partir de dos bandas de estricción cuyos ángulos respecto a la dirección de tracción son  $\theta = 59,1^\circ$  y  $\theta = -59,1^\circ$ , respectivamente. Que el valor numérico de estos sea igual implica que ambas bandas de estricción tienen los mismos gradientes de deformación y por lo tanto crecerán a igual velocidad. Es uno de los tres valores de  $\alpha$  en los que coinciden los ángulos formados por las bandas de estricción con la dirección de tracción, como ha sido descrito en la Fig. 4.3. del modelo constitutivo.
- Probeta con orientación  $\alpha = 11.25^\circ$ : La figura escalada corresponde a un tiempo  $t = 144\mu s$ , mayor que en el caso de  $\alpha = 0^\circ$ . Para esta dirección de carga, la formación del segundo modo de inestabilidad se aprecia a partir de dos bandas de estricción donde una de ellas está mucho más desarrollada que la otra, existen mayores gradientes de deformación y será la que dé lugar al crecimiento del cuello como se puede observar en el detalle incluido en la Fig. 6.3. El ángulo formado por esta banda de estricción es menor que el formado en el anterior caso y su valor es  $\theta = 55,5^\circ$ .
- Probeta con orientación  $\alpha = 22.5^\circ$ : La figura escalada corresponde a un tiempo  $t = 149\mu s$ . Para esta orientación, el tiempo requerido para alcanzar la localización sin superar el valor de  $\bar{\epsilon}_p = 0.64$  es mayor que en los casos de  $\alpha = 0^\circ$  y  $\alpha = 11.25^\circ$ , lo que significa que para una  $v = 40 m/s$  la orientación de  $\alpha = 22.5^\circ$  es menos propensa a la localización del fallo. Igual que ocurre en el caso de  $\alpha = 11.25^\circ$ , en la formación de la segunda inestabilidad se observan dos

bandas de las cuales una tiene una mayor velocidad de crecimiento. Esta dirección de banda de estricción forma un ángulo  $\theta = 55^\circ$  respecto a la dirección de tracción, menor que para las orientaciones anteriores.

- Probeta con orientación  $\alpha = 33.75^\circ$ : El tiempo requerido para alcanzar la localización mostrada es  $t = 155\mu s$ . Esta es la orientación que más tiempo tarda en presentar la localización entre todas las estudiadas y en la que más tarde se produce el fallo. En la formación de la segunda inestabilidad se observan dos bandas que forman con la dirección de tracción un ángulo  $\theta = 58^\circ$  y  $\theta = -58^\circ$  respectivamente. No obstante, en el detalle incluido para esta orientación en la Fig.6.3. se observa como para la banda que crece con ángulo  $\theta = 58^\circ$  presenta mayores gradientes que la otra, lo que indica que este valor de  $\alpha$  es muy cercano al valor  $\alpha$  intermedio para el cual ambos ángulos formados por las bandas de estricción con la dirección de tracción son iguales y ambas bandas crecen con igual velocidad.
- Probeta con orientación  $\alpha = 45^\circ$ : El tiempo requerido para alcanzar la localización mostrada es  $t = 153\mu s$  siendo el segundo valor de  $\alpha$  para el que más tiempo se necesita. La formación de la segunda inestabilidad se aprecia como una sola banda de estricción, no siendo visible la otra banda para los gradientes de deformación alcanzados. El ángulo existente entre la banda de estricción y la dirección de tracción cambia de signo respecto a los casos de  $11.25^\circ$  y  $22.5^\circ$ , y su valor es  $\theta = -54.1^\circ$ .
- Probeta con orientación  $\alpha = 56.25^\circ$ : La localización mostrada se alcanza para un tiempo  $t = 144\mu s$  igual que para el valor de  $\alpha = 11.25^\circ$ . Continúa la tendencia que aparece para  $\alpha = 45^\circ$ , formándose una banda de estricción que crece a mayor velocidad que la otra, la cual es inapreciable. El ángulo formado por la banda respecto a la dirección de tracción es  $\theta = -52.5^\circ$ , reduciéndose respecto al caso anterior.
- Probeta con orientación  $\alpha = 67.5^\circ$ : La localización mostrada se alcanza para un tiempo  $t = 135\mu s$ . Este valor es, después del que posteriormente se comentará para  $\alpha = 78.75^\circ$ , el menor tiempo transcurrido lo que indica que esta orientación presentará mayor facilidad para la aparición del fallo que todas las anteriores estudiadas. En comparación con  $\alpha = 56.25^\circ$  los gradientes de deformación son mayores. La segunda inestabilidad está formada, en vista de la Fig.6.2., por una banda de estricción que forma un ángulo  $\theta = -52.5^\circ$  con la dirección de tracción.
- Probeta con orientación  $\alpha = 78.75^\circ$ : De todas las orientaciones estudiadas para una velocidad  $v = 40 m/s$  esta es la que menos tiempo requiere para la formación de la inestabilidad sin superar el límite de deformación plástica impuesto. El tiempo empleado es  $t = 133\mu s$ , siendo, por lo tanto, la orientación

que con más rapidez desarrolla el fallo. El ángulo formado por la banda de estricción que crece a mayor velocidad es  $\theta = -51.5^\circ$ , muy cercana a la formada en el caso de  $\alpha = 67.5^\circ$ , lo que permite afirmar que la diferencia de tiempo entre una y otra se dará en gran parte por la existencia de mayores gradientes de deformación para el valor  $\alpha = 78.75^\circ$ .

- Probeta con orientación  $\alpha = 90^\circ$ : El tiempo correspondiente a la localización es  $t = 135\mu s$ , igual al transcurrido en la probeta con  $\alpha = 67.5^\circ$ . Esta dirección de carga, como ha sido indicado en el modelo constitutivo, corresponde con el tercer valor de  $\alpha$  para el cual los ángulos formados por las dos bandas que generan la segunda inestabilidad tienen el mismo valor absoluto. El valor de estos ángulos es  $\theta = 56^\circ$  y  $\theta = -56^\circ$  para la banda que forma un ángulo agudo en sentido contrario a las agujas del reloj y la banda que lo forma en sentido de las agujas del reloj, respectivamente.

A partir de los resultados mostrados para la velocidad  $v = 40m/s$  se puede realizar una interpretación de los mismos en base al modelo constitutivo de Hill [5]. Para ello se han representado las curvas de la Fig. 6.4, siendo el eje de abscisas correspondiente al ángulo entre la dirección de laminación y la dirección de carga (ángulo  $\alpha$ ), y el eje de ordenadas correspondiente al ángulo formado por la banda de estricción respecto a la dirección de carga (ángulo  $\theta$ ), tanto para los resultados obtenidos mediante las simulaciones como para los resultados teóricos aplicando las ecuaciones del criterio de plastificación.

Conocidos los ratios de plastificación anisótropos se han calculado los parámetros de anisotropía mediante las Ec. (21). Con estos, se han calculado todos los valores de  $\theta$  para cada una de las orientaciones estudiadas en base al concepto de extensión cero desarrollado en la Ec.(26).

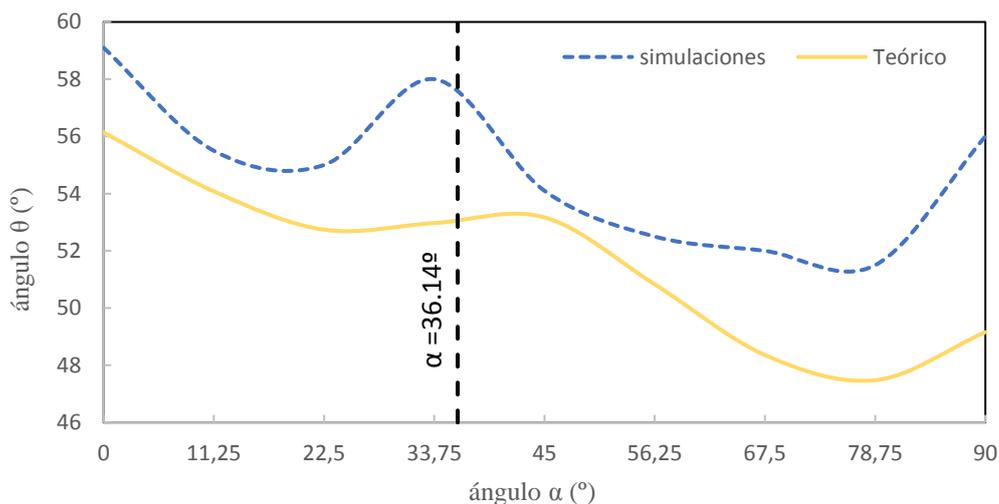


Fig.6. 4. Representación de la orientación de banda de estricción en función de la orientación de carga.

La gráfica de la Fig. 6.4 muestra cómo, además de que los resultados obtenidos son próximos, la tendencia seguida por la curva es igual en ambos casos. Los valores de los ángulos  $\theta$  mostrados corresponden a la banda de estricción que más rápido se desarrolla en la formación de la inestabilidad a excepción de los tres puntos donde se desarrollan ambas bandas a la misma velocidad. A partir de aquí se han alcanzado las siguientes conclusiones:

En primer lugar, como ha sido comentado durante la explicación de las distintas orientaciones, el tercer valor de  $\alpha$  para el cual coincide el valor  $\theta$  para las dos bandas de estricción formadas correspondía a un ángulo próximo a  $33.75^\circ$ . Este valor del ángulo  $\alpha$  calculado teóricamente mediante la Ec. (27) es  $36.14^\circ$ .

En segundo lugar, en vista de los resultados de la simulación se observa como para los valores  $0^\circ < \alpha < 33.75^\circ$  el ángulo  $\theta$  formado entre la dirección de banda de estricción que crece a mayor velocidad y el eje de la probeta es positivo según el convenio de signos tomado. Por otro lado, para los valores  $33.75^\circ < \alpha < 90^\circ$  el ángulo  $\theta$  es negativo en el caso de la banda de estricción que crece a mayor velocidad. Esto implica, siguiendo lo explicado en el modelo constitutivo, que los ángulos de  $\theta > 0$  corresponden a bandas de estricción que crecen en direcciones cercanas a la perpendicular con la de laminación, lo que ocurre para valores de  $\alpha$  comprendidos entre  $0^\circ < \alpha < 33.75^\circ$ . Sin embargo, para el intervalo  $33.75^\circ < \alpha < 90^\circ$  el ángulo  $\theta < 0$ , por lo que las bandas de estricción crecen en dirección parecida a la de laminación.

## **6.2. Influencia de la dirección de carga en la localización de la deformación plástica**

En base a la descripción de las inestabilidades desarrolladas en el epígrafe 6.1 y los gráficos que relacionan la fuerza generada por la carga frente al desplazamiento a una velocidad constante, y la ubicación normalizada de la inestabilidad frente a los distintos valores de  $\alpha$ , se va a realizar un estudio de cómo afectan las diferentes direcciones de carga en los resultados obtenidos de la simulación del ensayo de tracción dinámica realizado.

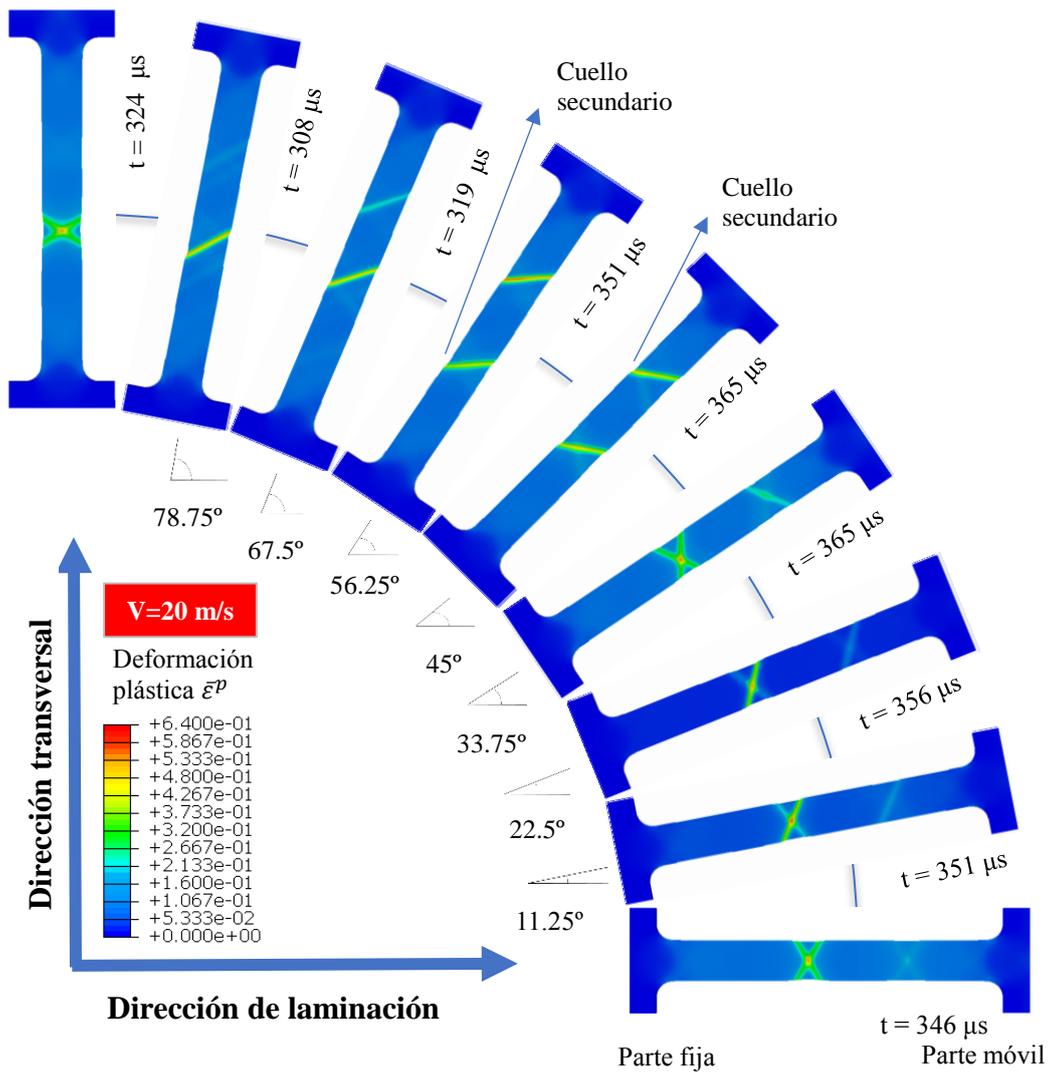


Fig.6. 5. Representación de la localización de la inestabilidad de cuello para una velocidad de impacto de  $v=20$  m/s en todas las direcciones de carga estudiadas con una deformación plástica máxima de valor  $\bar{\epsilon}_p = 0.64$ . Se recomienda para la correcta interpretación de los resultados mostrados ver la figura en formato original.

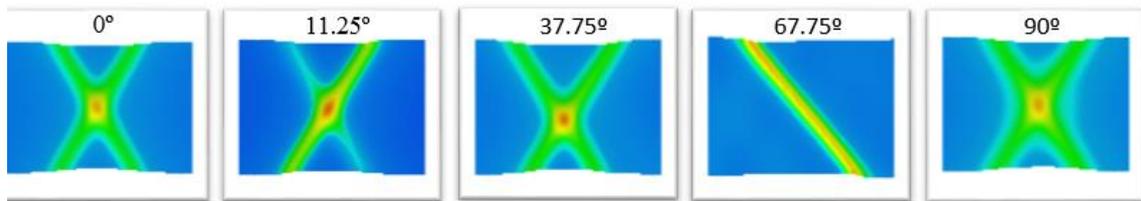


Fig.6. 6. Detalles de la formación de cuello en el ensayo realizado a  $v=20$  m/s para las orientaciones  $0, 11.25, 37.75, 67.75$  y  $90^\circ$ .

En primer lugar, se va a realizar un análisis de lo observado en los resultados contenidos en las Figs. 6.2 y 6.5. En ambos casos, tanto para  $v = 40\text{m/s}$  como  $v = 20\text{m/s}$ , las

variaciones de la dirección de las bandas de estricción, es decir, de las direcciones de cero extensión siguen una misma tendencia. Para los valores de  $\alpha$  correspondientes a  $\alpha = 11.25^\circ$  y  $\alpha = 22.5^\circ$  la dirección de la banda de estricción que crece a mayor velocidad forma un ángulo con la dirección de tracción de valor  $\theta > 0^\circ$ , para valores  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\alpha = 56.25^\circ$  y  $\alpha = 78.75^\circ$  se observa un cambio en esta dirección siendo  $\theta < 0^\circ$  y, finalmente para  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 33.75^\circ$  y  $\alpha = 90^\circ$  se forman dos direcciones de cero extensión que aparentemente crecen a velocidades similares. Por lo tanto, se puede afirmar que las direcciones de bandas de estricción dependen de la orientación de la probeta.

En segundo lugar, en virtud de los tiempos mostrados para ambas velocidades se aprecia como para las direcciones de carga en las que primero se alcanza la localización de la inestabilidad con una deformación plástica máxima  $\bar{\epsilon}_p = 0.64$  son, en ambos casos para  $\alpha = 67.5^\circ$ ,  $\alpha = 78.75^\circ$  y  $\alpha = 90^\circ$  mientras que los tiempos necesarios para la localización en los casos  $\alpha = 22.5^\circ$ ,  $\alpha = 33.75^\circ$  y  $\alpha = 45^\circ$  son los mayores. Esto permite llegar a la conclusión de que el tiempo de localización variará en virtud de la dirección de carga.

La dependencia del tiempo de localización frente a la dirección de carga puede ser complementada a partir de la representación de las curvas que relacionan la fuerza generada por la carga en dirección axial (eje de ordenadas) frente al desplazamiento experimentado por la probeta (eje de abscisas). Para ello se han representado en la Fig.6.7 todas las curvas correspondientes a las distintas orientaciones estudiadas para una velocidad de impacto constante  $v = 30 \text{ m/s}$ .

La razón de representar las curvas F-d del caso  $v = 30 \text{ m/s}$  para realizar un estudio de la influencia de la orientación sobre el comportamiento del material radica en las mayores diferencias que presentan estas curvas entre las distintas orientaciones. No obstante, las tendencias que siguen las curvas de las distintas direcciones de carga se mantienen para el resto de las velocidades estudiadas. Además, resulta importante remarcar que para el caso de  $v = 30 \text{ m/s}$  la localización de la formación de cuello se produce en una ubicación similar en todas las orientaciones por lo que ante unas mismas dimensiones de probeta, misma velocidad de impacto y misma ubicación de la inestabilidad las variaciones que puedan existir serán debidas principalmente a la variación de la dirección de carga.

En común, para los nueve valores de  $\alpha$  estudiados, se puede observar que las curvas F-d presentan una zona inicial hasta un valor  $U1 \approx 0.8 \text{ mm}$  en el que las variaciones de fuerza son más destacadas, esto se debe al tiempo inicial que tarda la onda de impacto generada por la carga en llegar al lado fijo de la probeta. Después de la zona inicial de variación de fuerzas por la onda de impacto, la siguiente parte corresponde a una curva ligeramente cóncava hacia abajo en la que se alcanzará la localización del cuello hasta alcanzar la zona final donde cae la fuerza hasta cero. En la zona cóncava, una vez se produce la localización de cuello sigue aumentando la deformación plástica. La poca inclinación de esta zona cóncava explica el comportamiento dúctil de la probeta.

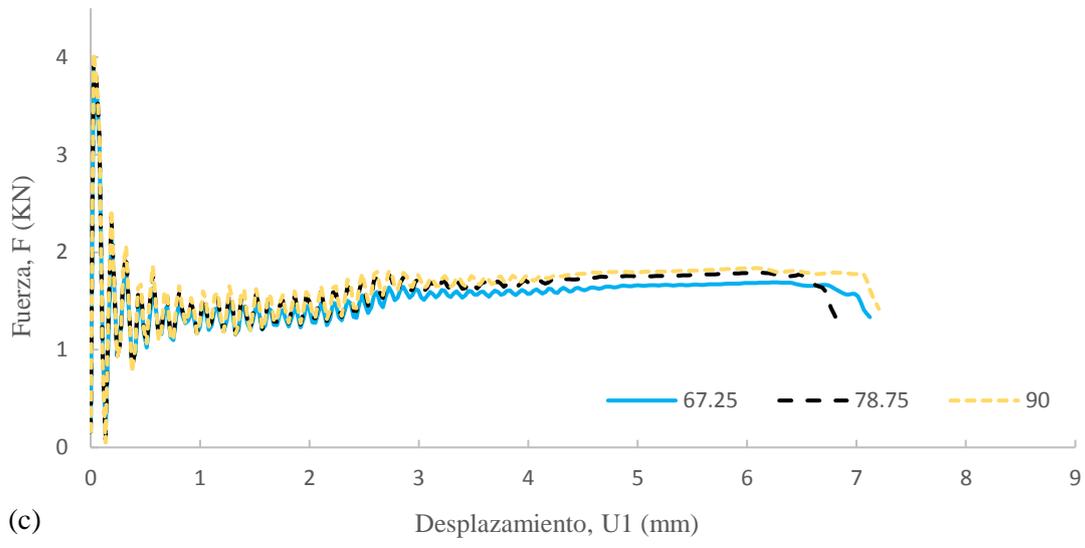
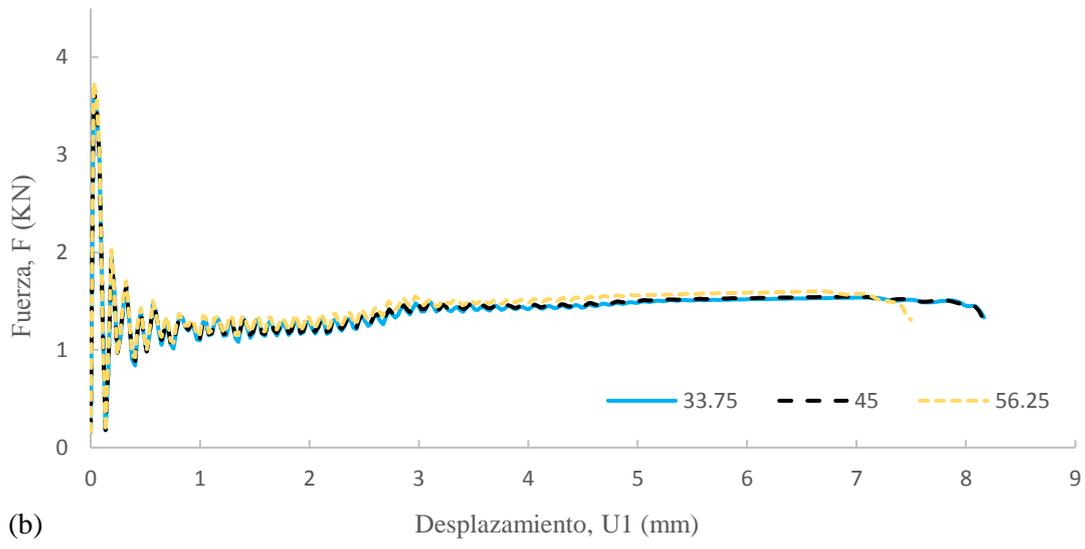
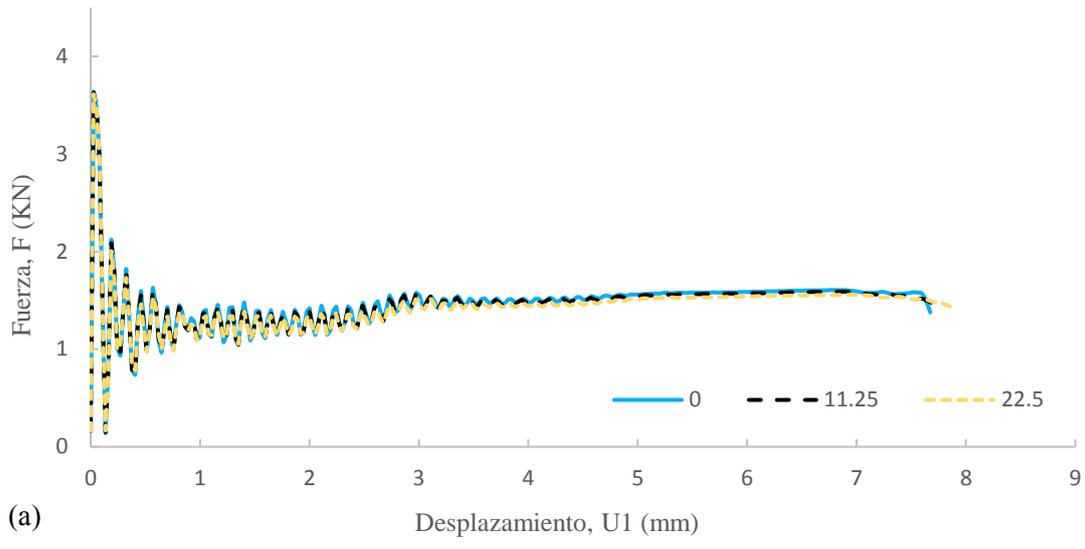


Fig.6. 7. Curvas fuerza axial-desplazamiento para una velocidad constante  $v=30\text{m/s}$  y para las orientaciones  $\alpha=0^\circ$ ,  $\alpha=11.25^\circ$ ,  $\alpha=22.5^\circ$ ,  $\alpha=33.75^\circ$ ,  $\alpha=45^\circ$ ,  $\alpha=56.25^\circ$ ,  $\alpha=67.5^\circ$ ,  $\alpha=78.75^\circ$ ,  $\alpha=90^\circ$ .

La Fig.6.7 (a) corresponde a las orientaciones  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 11.25^\circ$ ,  $\alpha = 22.5^\circ$ . Para los desplazamientos correspondientes a la zona en la que los efectos de la onda de impacto son más significativos se ha comprobado numéricamente que se alcanzan mayores variaciones de fuerza para la orientación  $\alpha = 0^\circ$  seguida de la orientación  $\alpha = 11.25^\circ$  y, la que tiene valores más bajos,  $\alpha = 22.5^\circ$ . En la zona de formación de la inestabilidad las posiciones se mantienen existiendo ligeras diferencias entre unas curvas y otras. Finalmente, el punto en el que caen las fuerzas a cero se alcanza primero para la orientación  $\alpha = 0^\circ$  que ha sufrido las mayores fuerzas durante el instante inicial del impacto y el desarrollo de la deformación plástica, prácticamente igual es el comportamiento para  $\alpha = 11.25^\circ$  mientras que la orientación  $\alpha = 22.5^\circ$  presenta un comportamiento más dúctil de la probeta.

El desplazamiento máximo alcanzado antes de que caigan los valores de la fuerza a cero es  $U1 = 7.5 \text{ mm}$  para las orientaciones  $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 11.25^\circ$  y  $U1 = 7.7 \text{ mm}$  en el caso de  $\alpha = 22.5^\circ$ .

En la Fig. 6.7 (b) se muestra la relación entre la fuerza generada por la carga y el desplazamiento en dirección de tracción experimentado por la probeta para las orientaciones  $\alpha = 33.75^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$  y  $\alpha = 56.25^\circ$ . Se comprueba numéricamente que los valores de fuerza alcanzados para pequeños desplazamientos son superiores para  $\alpha = 56.25^\circ$  seguida de  $\alpha = 45^\circ$  y  $\alpha = 33.75^\circ$ , respectivamente. Para desplazamientos mayores las posiciones de las curvas se mantienen para finalmente producirse la caída de la fuerza primero para la orientación que mayores fuerzas ha soportado, es decir,  $\alpha = 56.25^\circ$ , seguida de  $\alpha = 33.75^\circ$  y  $\alpha = 45^\circ$  que presentan un comportamiento prácticamente igual.

Resulta interesante para este caso dar el valor de la fuerza generada por la carga siendo este  $F = 3.739 \text{ KN}$  para  $\alpha = 56.25^\circ$ ,  $F = 3.652 \text{ KN}$  para  $\alpha = 45^\circ$  y  $F = 3.613 \text{ KN}$  para  $\alpha = 33.75^\circ$ . Los valores de desplazamiento en el instante previo a la caída de las fuerzas son  $U1 = 7.2 \text{ mm}$  para  $\alpha = 56.25^\circ$  y  $U1 = 7.8 \text{ mm}$  para  $\alpha = 45^\circ$  y  $\alpha = 33.75^\circ$ . Estos valores indican que las curvas correspondientes a  $\alpha = 45^\circ$  y  $\alpha = 33.75^\circ$  inicialmente no eran coincidentes, siendo mayores las fuerzas en el caso  $\alpha = 45^\circ$ , para finalmente acabar intersectando, lo que se puede atribuir al efecto de propagación de ondas en la probeta.

Por último, la Fig. 6.7 (c) corresponde a las curvas fuerza-desplazamiento para las orientaciones  $\alpha = 67.25^\circ$ ,  $\alpha = 78.75^\circ$  y  $\alpha = 90^\circ$ . Para tiempos de carga cortos (pequeños desplazamientos) se observa, conociendo los datos numéricos, que la curva correspondiente a  $\alpha = 90^\circ$  está por encima de  $\alpha = 78.75^\circ$  y  $\alpha = 67.25^\circ$ , respectivamente. Además, las diferencias entre las curvas para estas orientaciones son más significativas que en el resto de los casos. Durante el desarrollo de la zona cóncava de la curva las posiciones se mantienen, observándose en este caso como la pendiente de la curva negra correspondiente a  $\alpha = 78.75^\circ$  es superior a las otras dos curvas, lo que favorece que alcance antes su máximo en esta zona y se produzca la caída de las fuerzas primero. Es seguida, en orden de desplazamiento máximo alcanzado, por la orientación

$\alpha = 67.25^\circ$  que pese a experimentar fuerzas menores que  $\alpha = 90^\circ$  tiene un comportamiento menos dúctil.

Los valores de desplazamiento máximo obtenidos  $U1 = 7,01 \text{ mm}$  para  $\alpha = 90^\circ$ ,  $U1 = 6.39 \text{ mm}$  para  $\alpha = 78.75^\circ$  y  $U1 = 6.70 \text{ mm}$  para  $\alpha = 67.5^\circ$ .

En vista de la descripción de las curvas y los valores mostrados se puede concluir que las probetas con valores  $\alpha = 33.75^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$  y  $\alpha = 22.5^\circ$  presentan una mayor ductilidad, en concordancia con lo comentado anteriormente para los ensayos de  $v = 20 \text{ m/s}$  y  $v = 40 \text{ m/s}$  donde estas orientaciones correspondían a las que más tiempo requerían para alcanzar la localización de la inestabilidad. Por el contrario, las orientaciones  $\alpha = 78.75^\circ$ ,  $\alpha = 67.5^\circ$  y  $\alpha = 90^\circ$  son en las más propensas a la localización coincidiendo con las que requerían menos tiempo para localizar el fallo en los ensayos de  $v = 20 \text{ m/s}$  y  $v = 40 \text{ m/s}$ . En cuanto a la fuerza máxima generada por la carga se observa que los mayores valores se alcanzan para las orientaciones en las que la probeta presenta un comportamiento menos dúctil. Las orientaciones en las que las probetas presentan mayor ductilidad son aquellas que el área calculado a partir de la integración de la curva F-d es mayor, es decir, estas orientaciones tienen mayor capacidad de absorción de energía frente a una carga de impacto. Lo contrario ocurre para las orientaciones en las que las probetas presentan menor ductilidad.

La siguiente parte del análisis de la influencia de la dirección de carga en un ensayo de tracción dinámica se ha realizado en base a la Fig.6.8. En esta se grafica la relación existente entre la distancia normalizada hasta la localización  $\bar{X}$  frente a las nueve direcciones de carga estudiadas para cada una de las velocidades de impacto.

La ubicación de la segunda inestabilidad se compara a partir de la normalización de la coordenada  $x$  donde se encuentra esta. Para este estudio es importante saber que el valor normalizado  $\bar{X} = 0$  corresponde a la zona del fuste más cercana a la parte fija mientras que el valor  $\bar{X} = 1$  corresponde a la zona más cercana a la parte móvil. Los valores de  $\bar{X}$  han sido calculados como en el artículo N`souglo et al. [6], para ello se ha utilizado la siguiente ecuación:

$$\bar{X} = \frac{2x - 2L_1 - L_2 + L_0}{2L_0} \quad (29)$$

Donde  $x$  corresponde a la coordenada en dirección de tracción de la localización del cuello en la probeta sin deformar;  $L_1$  es la longitud de la zona de sujeción a las mordazas en dirección de tracción,  $L_2$  la longitud del fuste más los dos radios de la curvatura y  $L_0$  la longitud del fuste.

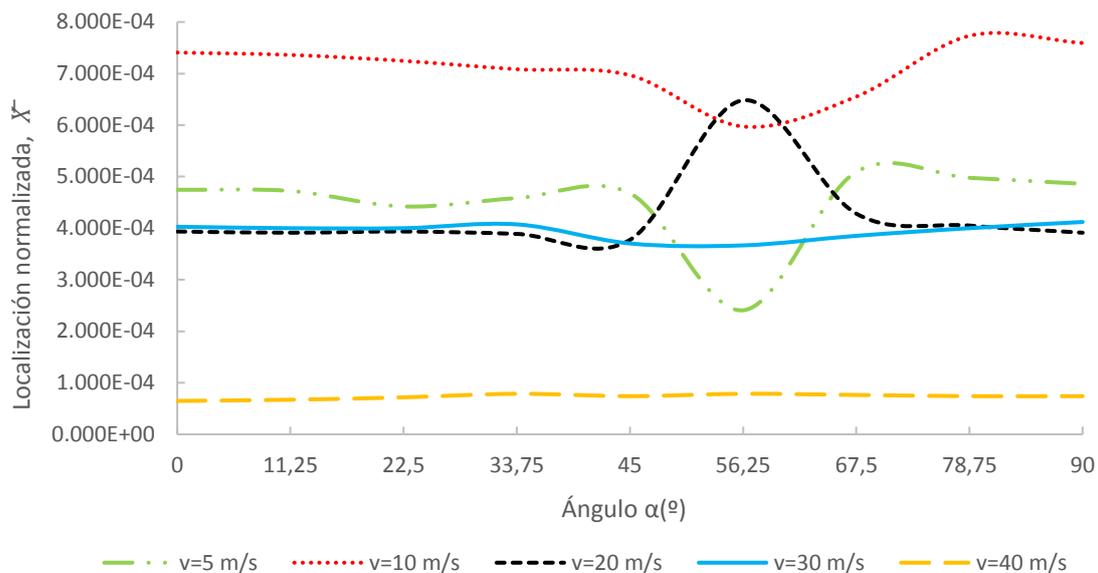


Fig.6. 8. Curvas  $\bar{X}-\alpha$  que relacionan la ubicación en dirección de tracción de la formación de la inestabilidad frente a la orientación para  $v=5\text{m/s}$ ,  $v=10\text{m/s}$ ,  $v=20\text{m/s}$ ,  $v=30\text{m/s}$  y  $v=40\text{m/s}$ .

Los resultados mostrados en la Fig.6.8 para los ensayos realizados a  $v = 30\text{m/s}$  y  $v = 40\text{m/s}$  permiten determinar que el comportamiento del material es similar a un material isótropo, es decir, no se produce variación en la ubicación de la inestabilidad independientemente de la dirección de carga aplicada. Sin embargo, en los ensayos  $v = 5\text{m/s}$ ,  $v = 10\text{m/s}$  y  $v = 20\text{m/s}$  se produce la localización para un valor cercano para todas las orientaciones a excepción de  $\alpha = 56.25^\circ$ . Esta variación se puede atribuir a que para esta orientación el material de ensayo es más propenso a localizar una segunda zona de cuello, como se observa en la Fig.6.5 para  $v = 20\text{m/s}$ , que puede alterar los valores de  $x$  correspondiente al cuello principal. Esta segunda formación de cuello se puede ver también como una mayor sensibilidad de esta orientación frente a los efectos de la inercia.

### 6.3. Influencia de la velocidades de impacto en la localización de la deformación plástica

Para analizar la influencia de las distintas velocidades de impacto simuladas sobre el comportamiento de la probeta de Al-7075 se van a estudiar los tiempos de localización, fuerzas, desplazamientos, ubicación de la localización para  $\alpha = cte$  y velocidades de impacto  $v = 5\text{m/s}$ ,  $v = 10\text{m/s}$ ,  $v = 20\text{m/s}$ ,  $v = 30\text{m/s}$  y  $v = 40\text{m/s}$ .

En primer lugar, la Fig. 6.9 representa las probetas escaladas en función de la deformación plástica equivalente para una velocidad  $v = 10\text{ m/s}$  y los nueve valores de  $\alpha$  estudiados. A partir de esta se compararán los tiempos empleados en alcanzar la localización con los casos de  $v = 20\text{ m/s}$  y  $v = 40\text{ m/s}$  ya conocidos.

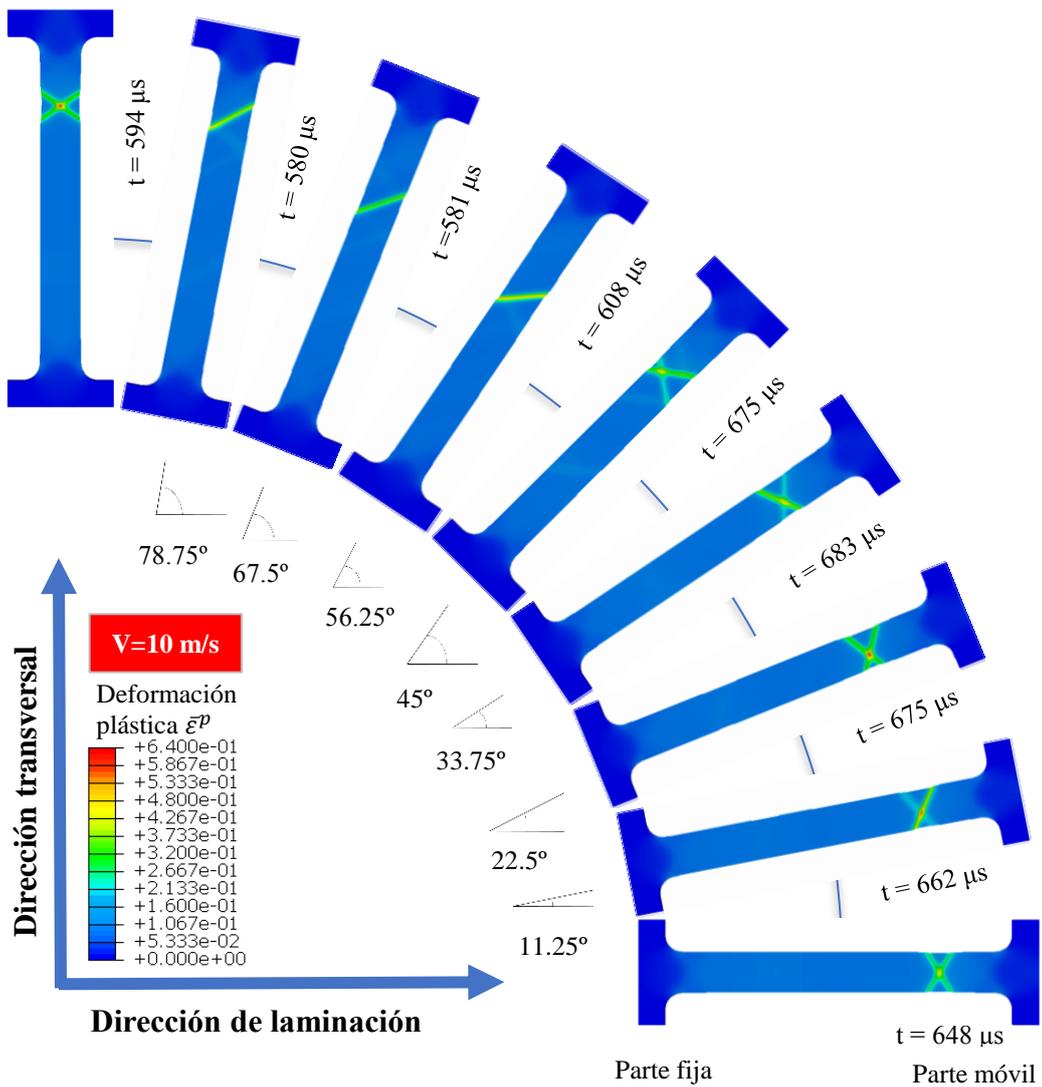


Fig.6. 9. Representación de la localización de la inestabilidad de cuello para una velocidad de impacto de  $v=10$  m/s en todas las direcciones de carga estudiadas con una deformación plástica máxima de valor  $\bar{\epsilon}_p = 0.64$ . Se recomienda para la correcta interpretación de los resultados mostrados ver la figura en formato original.

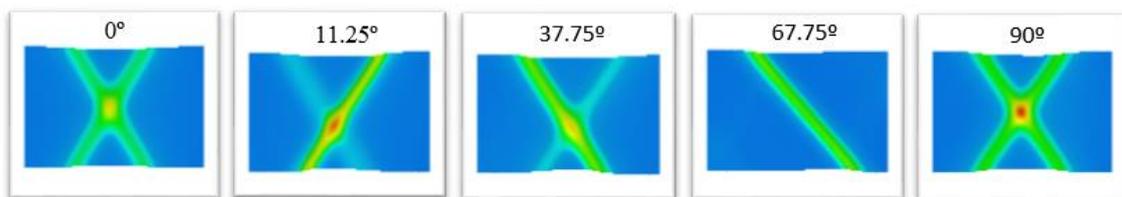


Fig.6. 10. Detalles de la formación de cuello en el ensayo realizado a  $v=10$  m/s para las orientaciones 0,11.25,37.75,67.75 y 90°.

Es comprobado, que el tiempo empleado en localizar las bandas de estricción es menor para el caso de  $v = 40$  m/s, encontrándose sus valores entre  $t = 130$  y  $t = 160$   $\mu$ s,

seguido de  $v = 20 \text{ m/s}$  con valores de  $t$  entre  $300$  y  $370 \mu\text{s}$  y finalmente la velocidad más baja mostrada,  $v=10 \text{ m/s}$  que alcanza la localización pasado entre  $580$  y  $680 \mu\text{s}$  después de la aplicación de la carga.

En segundo lugar, se han representado las curvas que muestran la relación entre la fuerza generada por la carga frente al desplazamiento experimentado por la parte móvil de la probeta en la dirección de tracción. Para el análisis comprendido en este epígrafe se han estudiado las curvas correspondientes a todas las velocidades simuladas para las orientaciones  $\alpha = 0^\circ$  y  $\alpha = 67.5^\circ$  representadas en las Figs. 6.11 y 6.12, respectivamente.

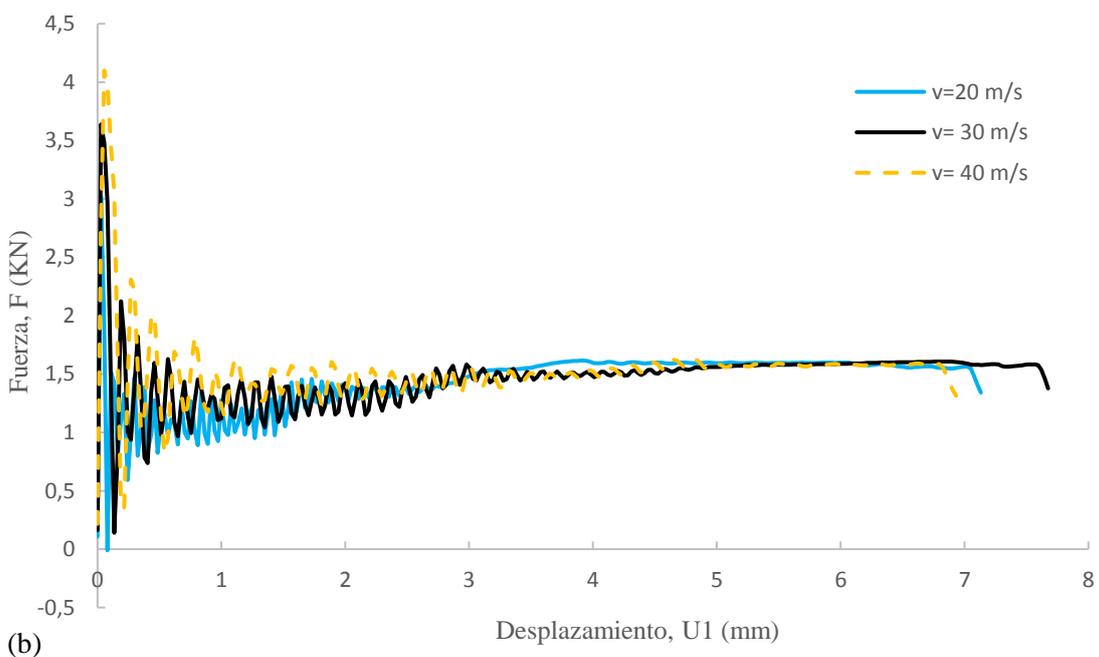
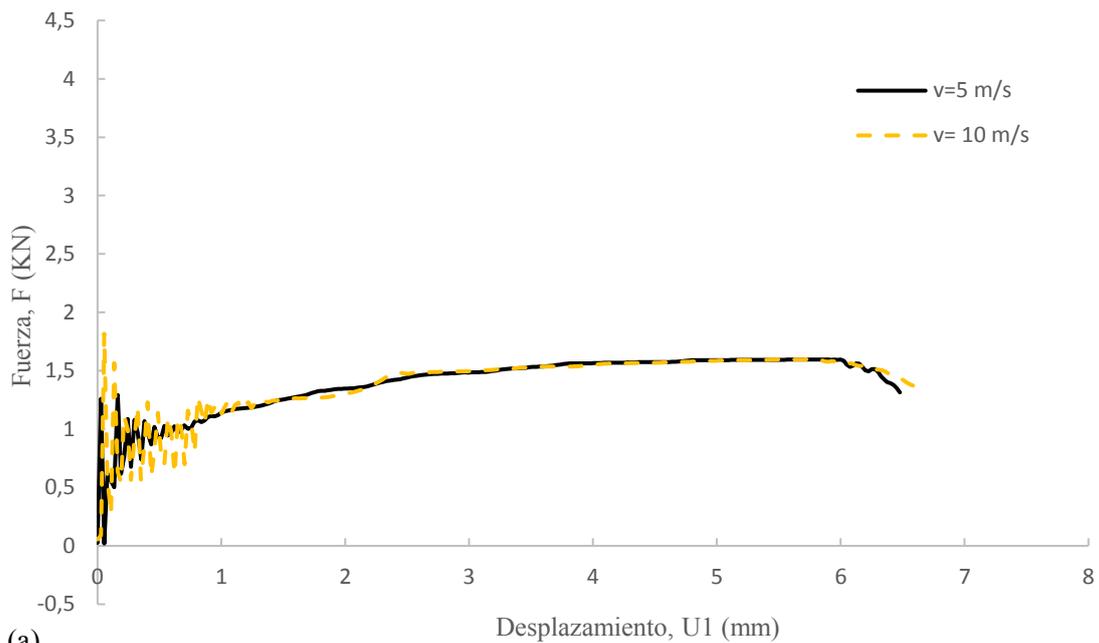


Fig.6. 11. Curvas fuerza axial-desplazamiento en dirección de tracción para una orientación  $\alpha = 0^\circ$  y velocidades de impacto  $v=5$  m/s y  $v=10$  m/s (a) y  $v=20$  m/s,  $v=30$  m/s y  $v=40$  m/s (b). Se recomienda para la correcta interpretación de los resultados ver la figura en formato original.

Las curvas F-d en los ensayos de tracción dinámica simulados numéricamente presentan, como se ha descrito anteriormente, tres partes diferenciadas. Una primera parte correspondiente a la onda del impacto de la carga en el que se produce una mayor variación de las fuerzas, una segunda zona donde se produce la localización del fallo y se desarrolla la deformación plástica y la zona final donde las fuerzas caen hasta cero.

La Fig. 6.11 (a) muestra las curvas F-d correspondientes a  $v = 5$  m/s y  $v = 10$  m/s. Se aprecia como para la parte inicial, las fuerzas generadas por la carga son mayores para la curva de  $v = 10$  m/s y, además, estas variaciones de fuerza duran hasta valores de desplazamiento mayores que en los ensayos realizados a una velocidad  $v = 5$  m/s. A partir de un desplazamiento  $U1 \approx 2.5$  mm, las variaciones de fuerza no son apreciables en ninguna de las dos curvas y ambas presentan comportamientos similares hasta la caída de la fuerza, la cual se produce en ambos casos para un desplazamiento  $U1 = 5.9$  mm.

La Fig. 6.11 (b) permite realizar una comparación entre las curvas F-d para velocidades de impacto  $v = 20$  m/s,  $v = 30$  m/s,  $v = 40$  m/s y una orientación  $\alpha = 0^\circ$ . En la zona dominada por la onda de impacto se observa como la curva correspondiente a  $v = 40$  m/s tiene valores superiores de fuerza por encima de  $v = 30$  m/s y  $v = 20$  m/s, llegándose a generar pequeñas fuerzas de compresión para el caso de  $v = 20$  m/s. Para una deformación  $U1 = 3$  mm las tres curvas intersecan y se aprecia en esta zona correspondiente a la localización y desarrollo de la deformación plástica como la curva  $v = 20$  m/s está por encima de las otras dos, que presentan un comportamiento similar hasta  $U1 = 5.5$  mm donde vuelven a cruzarse las curvas. Finalmente, la caída de las fuerzas se produce de una forma diferenciada primero para la curva  $v = 40$  m/s seguida de  $v = 20$  m/s y  $v = 30$  m/s que es para la velocidad de impacto que la probeta presenta un comportamiento más dúctil.

Los valores de desplazamiento en el instante previo a la caída de las fuerzas son  $U1 = 6.7$  mm para  $v = 40$  m/s,  $U1 = 7$  mm para  $v = 20$  m/s y  $U1 = 7.5$  mm para  $v = 30$  m/s.

En la Fig. 6.12 se han representado las curvas F-d para una orientación  $\alpha = 67.5^\circ$ . En este caso se han incluido todas las velocidades de impacto en una misma gráfica.

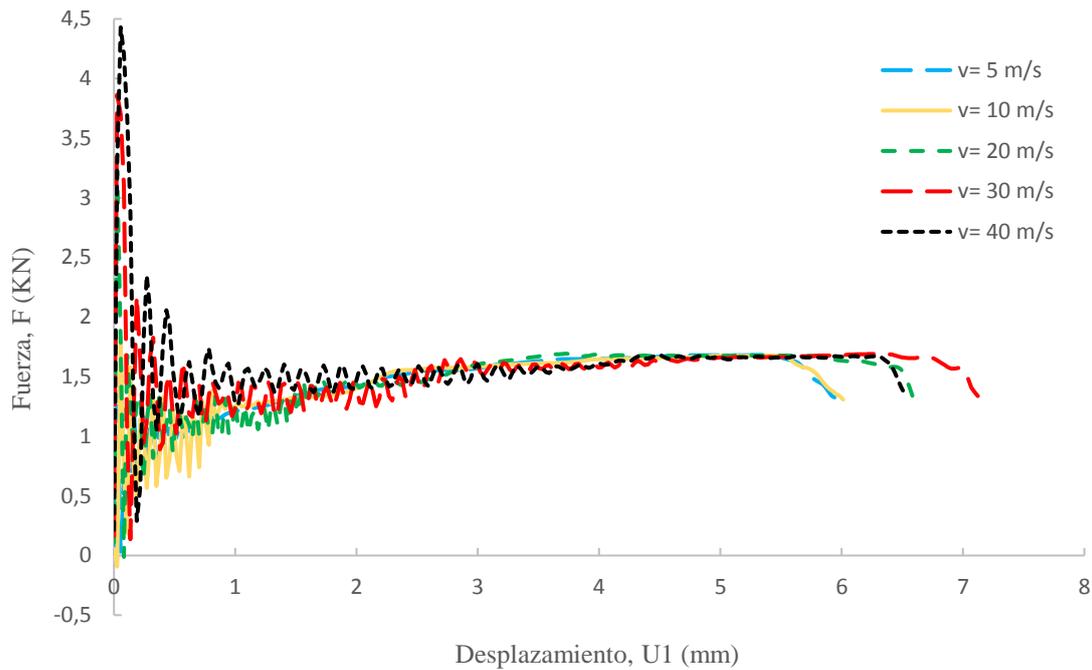


Fig.6. 12. Curvas fuerza axial-desplazamiento en dirección de tracción para una orientación  $\alpha= 67.5^\circ$  y velocidades de carga  $v=5$  m/s y  $v=10$  m/s,  $v=20$  m/s,  $v=30$  m/s y  $v=40$  m/s . Se recomienda para la correcta interpretación de los resultados ver la figura en formato original.

En vista de los resultados para todas las velocidades estudiadas se pueden extrapolar las siguientes conclusiones de las curvas F-d: en primer lugar, como era previsible, las mayores fuerzas son generadas para la velocidad de impacto más alta, reduciéndose con la misma. En segundo lugar, en cuanto a los desplazamientos máximos alcanzados antes de la caída de las fuerzas se puede afirmar que la ductilidad de la probeta crece desde  $v = 5$  m/s hasta una velocidad de  $v = 30$  m/s reduciéndose a partir de esta velocidad, como se observa para  $v = 40$  m/s. Este hecho se ha comprobado para velocidades no incluidas en el estudio realizado correspondientes a  $v = 60$  m/s y  $v = 70$  m/s . Esto se puede explicar por el efecto de propagación de ondas de la probeta.

Para las Figs. 6.11 y 6.12 se observa en todas las curvas dibujadas que aquellas probetas que tienen menos ductilidad corresponden a las que el área existente por debajo de la curva es menor, lo contrario ocurre para las más dúctiles. Esto se debe a un mayor o menor valor de la energía absorbida en el impacto para las distintas velocidades estudiadas.

Continuando el análisis de sensibilidad frente a la velocidad de impacto, se va a realizar un estudio de la variación de la ubicación de la localización de la inestabilidad frente a diversas velocidades de impacto. Para ello se ha representado en la Fig. 6.13 las curvas que contienen la distancia normalizada hasta la localización  $\bar{X}$  en el eje de ordenadas y todas las velocidades estudiadas en el eje de abscisas. Los valores de  $\bar{X}$  han sido obtenidos con la Ec. (29). Las curvas representadas corresponden a  $\alpha = 33.75^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\alpha = 78.75^\circ$  y  $\alpha = 90^\circ$ , además, en cada una de las gráficas se ha representado una línea horizontal correspondiente al valor  $\bar{X}=0.5$  de mitad del fuste, recordando que  $\bar{X}=0$  corresponde a la zona más cercana al lado fijo y  $\bar{X}=1$  a la zona de impacto. Se han

seleccionado estos valores de  $\alpha$  ya que, como se ha comentado anteriormente, el efecto de la orientación en la ubicación de la localización en estos casos es mínimo, por lo que las variaciones presentes se deberán únicamente a la velocidad de impacto.

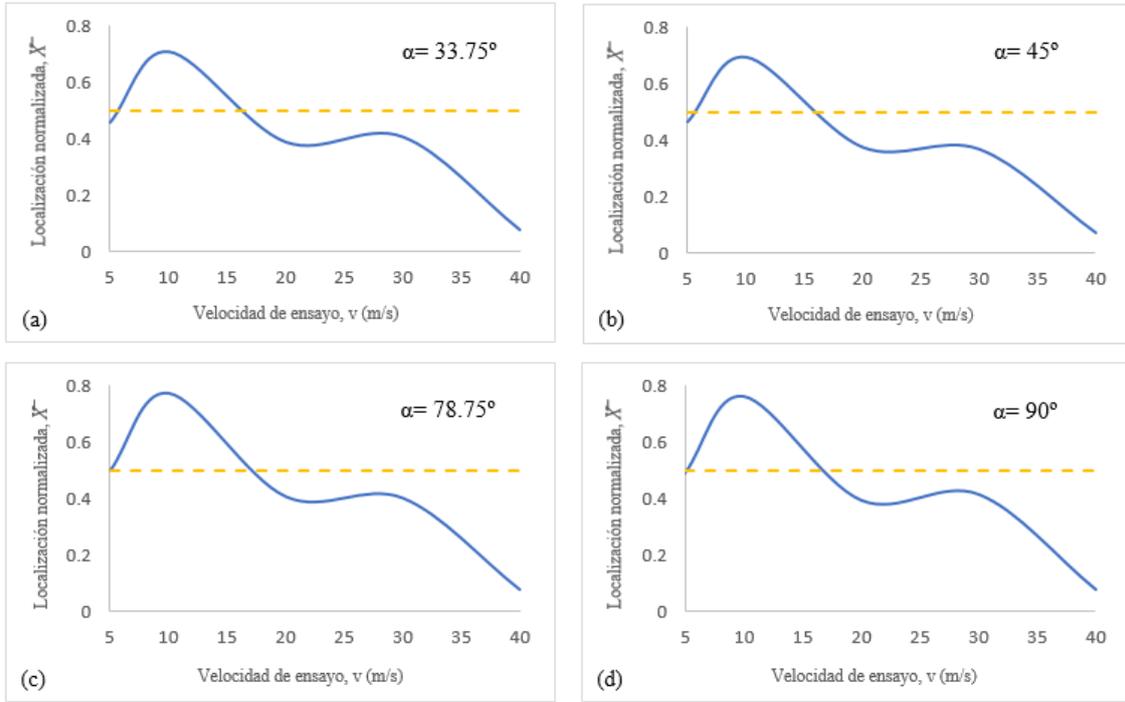


Fig.6. 13. Curvas  $\bar{X}$ - $\alpha$  que relacionan la ubicación en dirección de tracción de la formación de la inestabilidad frente a la velocidad de impacto para valores  $\alpha=33.75^\circ$ ,  $\alpha=45^\circ$ ,  $\alpha=78.75^\circ$  y  $\alpha=90^\circ$ .

En las gráficas representadas se observa como para una velocidad  $v = 5 \text{ m/s}$  el valor de  $\bar{X} \approx 0.5$ , es decir, se encuentra en la parte central del fuste. El aumento de la velocidad a  $v = 10 \text{ m/s}$  desplaza la localización a valores  $\bar{X} \approx 0.8$  situándose esta en la zona más cercana al lado móvil. Para las velocidades  $v = 20 \text{ m/s}$  y  $v = 30 \text{ m/s}$  los valores de la ubicación  $\bar{X} \approx 0.4$ , acercándose al centro del fuste más en el caso de  $30 \text{ m/s}$ . Estos valores descienden para  $v = 40 \text{ m/s}$  donde la inestabilidad se localiza en la parte más cercana al lado fijo con valores  $\bar{X} \approx 0.07$ .

Existe una velocidad de impacto, llamada velocidad crítica, por encima de la cual se producirá la localización cerca del extremo de la probeta impactado, y el resto de la probeta estará esencialmente libre de deformación plástica, así describe el artículo escrito por Clark [42] el concepto de velocidad crítica. Más adelante, Klepaczko [24] estudió este concepto llegando a la conclusión de que a partir de este valor de velocidad crítica la prueba de tensión dinámica para determinar las propiedades del material proporciona unos valores degenerados de las curvas tensión-deformación. Este concepto ha sido utilizado recientemente por N'souglo et al. [6] para explicar la ubicación de la localización de cuello para distintas direcciones de carga. En el caso del presente proyecto, como se ha observado en las curvas de la Fig. 6.13 los valores de  $\bar{X}$  para la

velocidad más alta de impacto (40 m/s) no indica que se haya alcanzado la velocidad crítica, en base a lo estudiado por Klepaczko [24]. Para comprobar que este concepto se cumple, se han realizado pruebas sobre las probetas a velocidades de impacto  $v = 60 \text{ m/s}$  y  $v = 70 \text{ m/s}$  en las que la localización se produce en la zona más cercana a la parte impactada y, por lo tanto, se observa cómo se ha alcanzado la velocidad crítica.

Por último, las Figs. 6.2, 6.5 y 6.9 muestran como las predicciones de Hill (ver Fig. 4.3), en las que afirmaba la existencia de tres valores de  $\alpha$  para los cuales el ángulo formado por las dos bandas de estricción respecto al eje de la probeta tenía el mismo valor, son apreciables solo para  $v \geq 20 \text{ m/s}$ . Sin embargo, en los casos estudiados de velocidad de impacto  $v = 5 \text{ m/s}$  y  $v = 10 \text{ m/s}$  ocurre igual que en los ensayos experimentales sobre probetas, no se aprecian estos tres valores  $\alpha$ . En el caso de ensayos experimentales se debe a las heterogeneidades microestructurales de los materiales, que alterarán la simetría del ensayo. En el caso de la simulaciones a baja velocidad se debe a una menor presencia de los efectos inerciales.

## 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La investigación desarrollada en este Trabajo de Fin de Grado ha permitido realizar un estudio del comportamiento de una probeta de Al-7075, cuya anisotropía es descrita por el modelo constitutivo de Hill [5], bajo condiciones de tracción dinámica. Esta se ha llevado a cabo empleando el método de cálculo de elementos finitos realizado con ABAQUS/*Explicit* y se ha simulado el ensayo de tracción dinámica para distintas direcciones de carga y velocidades de impacto. El análisis de los resultados obtenidos permite alcanzar seis conclusiones generales y establecer la línea de futuros trabajos que se desarrollarán en este capítulo.

### 7.1. Conclusiones

Las conclusiones alcanzadas son las siguientes:

- La localización de la deformación plástica bajo condiciones de tracción dinámica ocurre en forma de dos modos de inestabilidad. El primer modo corresponde al cuello formado en el plano XY de la probeta y da lugar a una reducción de la anchura del fuste. El segundo modo de inestabilidad se da mediante las bandas de estricción formadas que dan lugar en una disminución del espesor del fuste de la probeta. Los planos que contienen el primer y el segundo modo de inestabilidad son perpendiculares entre sí. Además, estos modos de inestabilidad pueden formarse repetidas veces a lo largo de la probeta como localizaciones de cuello secundarias.
- El segundo modo de inestabilidad se forma a partir de dos bandas de estricción cuya velocidad de crecimiento viene determinada por el efecto de la dirección de carga. Hay tres valores de  $\alpha$  para los cuales ambas bandas crecen a igual velocidad, mientras que para el resto de los valores  $\alpha$  crece a mayor velocidad la banda de estricción que forma un menor ángulo  $\theta$  con la dirección de tracción. El valor del ángulo  $\theta$  dependerá también de la orientación de la probeta.
- El tiempo transcurrido para la localización de la inestabilidad, dada una deformación plástica máxima  $\bar{\epsilon}_p = 0.64$ , depende del ángulo  $\alpha$  formado por la dirección de laminación respecto a la dirección de carga y de la velocidad de impacto. Los valores de  $\alpha$  en los que antes se localiza la inestabilidad son  $\alpha = 67.5^\circ$ ,  $\alpha = 78.75^\circ$  y  $\alpha = 90^\circ$  mientras que los casos que más tiempo requieren son  $\alpha = 22.5^\circ$ ,  $\alpha = 33.75^\circ$  y  $\alpha = 45^\circ$ .
- La capacidad de absorción de energía frente a un impacto de tracción viene determinada por la dirección de carga y por la velocidad de impacto. En cuanto al

efecto de la dirección de carga, se observa como para aquellos valores de  $\alpha$  para los que mayor es el tiempo de localización tienen una mayor capacidad de absorción de energía que las orientaciones para las cuales el tiempo de localización es menor. Las orientaciones que mayor capacidad de absorber energía tienen son aquellas en las que la probeta presenta un comportamiento más dúctil. Respecto a la velocidad de impacto, la capacidad de absorción de energía aumenta con la misma hasta  $v = 30 \text{ m/s}$ , valor a partir del cual esta capacidad disminuye debido al efecto de propagación de las ondas.

- La ubicación normalizada de la localización depende principalmente de la velocidad de impacto, sin seguir una tendencia que permita establecer una relación entre la velocidad de impacto y la ubicación. Solo se puede afirmar que para velocidades superiores a 40 m/s se alcanza la velocidad crítica y esta ubicación de la localización se produce en la zona del fuste más cercana a la zona impactada.
- La velocidad de impacto está relacionada con la intensidad de las fuerzas de inercia. Cuanto mayores son las velocidades de impacto mayores son los efectos de la inercia y en la localización de la inestabilidad se observa claramente los valores de  $\alpha$  para los que  $\theta$  tiene el mismo valor. Lo contrario ocurre para velocidades de impacto bajas, en las que los efectos inerciales son menores.

## 7.2. Trabajos futuros

El estudio realizado ha permitido alcanzar un amplio conocimiento sobre el efecto de la anisotropía y de la velocidad de impacto sobre una probeta de aleación Al-7075. Sin embargo, este conocimiento debe ser complementado con más investigaciones. La importancia de esta aleación en el diseño de estructuras en la industria automovilística marca la línea de trabajos futuros:

- Realización de ensayos experimentales bajo las mismas condiciones simuladas para corroborar la validez de los resultados obtenidos.
- Ampliación del estudio realizado teniendo en cuenta los efectos de la temperatura sobre el comportamiento de la probeta.
- Realización del estudio completo en base a una descripción de la anisotropía del material dada por otros modelos de plastificación anisótropa como el utilizado en N`souglo et al. [6].
- Análisis de estados tensionales más complejos, utilizados frecuentemente en la industria automovilística, que permitan desarrollar la curva límite de formabilidad de la aleación Al-7075.

## 8. MARCO REGULADOR

El estudio desarrollado a lo largo del presente proyecto permite conocer el comportamiento de la aleación de aluminio Al-7075 en condiciones de tracción dinámica uniaxial. Estas condiciones se han realizado a partir de una simulación de estas, no obstante, es común la realización de los ensayos de forma experimental. El correcto cumplimiento de las normas vigentes en la realización de cualquier ensayo experimental de caracterización de materiales garantiza la validez de los resultados.

En el caso concreto del ensayo de tracción en materiales metálicos se pueden diferenciar las normas ISO 6892-1 [43] y ASTM E8/E8M [44] desarrolladas por los organismos internacional ISO y americano ASTM, respectivamente.

Tanto la norma ISO 6892-1: “Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente”, como la norma ASTM E8/E8M: “Métodos de pruebas estándar para las pruebas de tracción de materiales metálicos” comprenden el alcance de conocimiento de estos ensayos, la metodología para alcanzar los resultados deseados, el significado y uso del cumplimiento de la norma, las especificaciones de la máquina utilizada, los elementos de medición necesarios, los distintos dispositivos y especificaciones de sujeción de la probeta, los tipos y dimensiones de la probeta y el modo de definición de los parámetros que determinan el ensayo de tracción.

Ambas normas hacen alusión a los ensayos de tracción realizados a temperatura ambiente, comprendida entre 10°C y 38°C, y están destinadas a regular la determinación del límite de elasticidad, la elongación límite elástica, la resistencia a la tracción, la elongación a rotura y la reducción de área. Garantiza la correcta obtención de resultados para fines comerciales, sin embargo, considera que puede no corresponder a la realidad si el comportamiento en servicio no se da en el rango de temperaturas considerado o por condiciones estructurales.

En el caso de la norma desarrollada por el organismo ASTM, se establece que la máquina utilizada viene regida por la norma ASTM E4, que define el rango de fuerzas que deben ser utilizados para la determinación de la resistencia a tracción y límite elástico para distintas condiciones de ensayo.

Describen los dispositivos de sujeción utilizados para los distintos tipos de probetas que pueden ser ensayadas, entre ellos se pueden citar dispositivos de cuña, dispositivos por rosca y dispositivos autoajustables, estos últimos destinados a la sujeción del tipo de probetas laminares como la utilizada en el desarrollo de este trabajo. La sujeción por cualquiera de estos dispositivos debe garantizar que el eje central de la muestra este alineado con el de la línea central de la celda de carga y de la cruceta, ya que cualquier desviación puede alterar las mediciones de longitud y sección además de las tensiones existentes por el momento de flexión generado. Para esta alineación se contempla en la norma la utilización de micrómetros.

Las probetas utilizadas para la realización del ensayo, contempladas en las dos normas, son en forma de láminas, alambres, con forma de aro o barras rectangulares y circulares. Para cada uno de estos tipos se define, además del tipo de sujeción como ya ha sido explicado, las características geométricas y las dimensiones adecuadas. En la definición de las dimensiones de la probeta existen diferencias entre las dos normas, sin embargo, estas no son significativas en la obtención de los resultados finales. En el caso de la norma ISO 6892-1 para probetas laminares como la utilizada, se hace distinción entre los distintos espesores que pueden tener. Para el caso de encontrarse entre valores de 0.1 mm y 3.0 mm, el ancho de la zona de sujeción y aplicación de la carga  $w$  debe tener un valor entre 20 mm y 40 mm y la longitud del fuste  $L_0$  y la anchura del mismo  $b$  determinan la longitud total de la probeta  $L_c$ , que no debe ser menor que  $L_0 + b/2$  y, es recomendable que el valor de esta sea  $L_c = L_0 + 2b$ . La longitud de la zona de sujeción debe cumplir que al menos  $2/3$  partes de esta estén introducidas en el mecanismo de sujeción y tenga un valor suficiente para que el mecanismo de sujeción no interceda en la zona del fuste.

En las especificaciones de la norma se tienen en cuenta aspectos operativos de puesta en marcha, que determinan la necesidad de la realización de pruebas previas a temperatura ambiente antes de la que proporcione los resultados definitivos en el caso de que la máquina lleve sin operar un tiempo con el objetivo de minimizar errores resultantes de condiciones transitorias. También se especifica las características de los elementos de medida que debe poseer la máquina como son los extensómetros para la medición de la variación de longitud en cada momento, para ello la norma contempla la realización de marcas con punzón o tinta en la probeta de ensayo. La velocidad de ensayo puede venir definida en términos de la tasa de variación de longitud de la muestra, velocidad de la cruceta en condiciones de ensayo, tiempo transcurrido para la realización de la prueba, velocidad de la cruceta sin probeta. En los casos de medición de la velocidad de la cruceta, como sería en el caso de realizar experimentalmente la simulación llevada a cabo, se realiza mediante dispositivos específicos para la medición y control de la misma, no obstante, la norma sugiere que en ausencia de estos se puede establecer mediante la medición de longitudes y temporizadores adecuados.

Como se ha apuntado inicialmente, estas normas están orientadas a los ensayos de tracción experimentales, por lo que, todas las especificaciones referentes a la máquina de ensayo no son aplicables a la simulación realizada. Por el contrario, las dimensiones de la probeta sí son un aspecto para tener en cuenta de cara a obtener unos resultados finales que, además de ser cercanos a la realidad, se puedan comparar con probetas normalizadas ensayadas experimentalmente. Las dimensiones utilizadas en el proyecto cumplen con lo estipulado en la norma ISO 6892-1 siendo el valor del espesor 1 mm; la anchura de la zona de unión con las mordazas  $w = 20\text{mm}$ ; la longitud del fuste  $L_0 = 54\text{mm}$ , la anchura del mismo  $b = 8\text{mm}$  y la longitud total  $L_c = L_0 + 2b = 70\text{mm}$ .

## 9. ENTORNO SOCIO-ECONÓMICO

### 9.1. Presupuesto

En este apartado se presentan los costes para la realización del presente proyecto. El presupuesto comprende los costes personales, materiales e indirectos derivados del trabajo realizado en los últimos 4 meses, que se encuentran resumidos en la tabla de gastos totales.

Los costes personales incluyen los salarios del equipo de ingenieros responsables de la realización del proyecto. Este equipo está formado por un ingeniero encargado del desarrollo del trabajo y un ingeniero dedicado al asesoramiento del mismo. En la siguiente tabla se ha realizado un desglose de las horas empleadas:

Documentación	118 h
Elaboración del modelo numérico	85 h
Análisis de resultados	35 h
Reuniones de equipo	16 h
Elaboración de la memoria	86 h
<b>TOTAL DE HORAS DEL INGENIERO ENCARGADO</b>	<b>340 h</b>
<b>TOTAL DE HORAS DE ASESORAMIENTO</b>	<b>16 h</b>

El total de horas trabajadas por el ingeniero encargado del proyecto son 340 h que corresponden a 17 semanas trabajando 5 días a la semana una jornada de 4 horas diarias. Por su parte, el ingeniero encargado del asesoramiento ha trabajado durante la duración de las reuniones de equipo un total de 16 horas.

El salario mensual trabajando 8 horas diarias durante 5 días a la semana es de 1850 € (11,56 €/hora) para el ingeniero encargado mientras que en el caso del ingeniero asesor el salario mensual es de 3000 € (18,75 €/hora).

Los costes materiales corresponden a los gastos derivados de las licencias de los programas necesarios y los costes correspondientes al equipo informático utilizado.

La licencia del software ABAQUS para la realización de las simulaciones tiene un coste de 1100€ mientras que la licencia de Microsoft Office utilizada para la realización de cálculos y elaboración de la memoria tiene un coste total de 250€.

El equipo utilizado es un ordenador portátil con un coste de 850 € y un periodo de amortización de 4 años. El coste correspondiente al equipo informático viene detallado en la Ec. (30):

$$C_{amort} = \frac{C_{Total}}{t_{amort}} \times t_{proyecto} = \frac{850 \text{ €}}{48 \text{ meses}} \times 4 \text{ meses} = 70.83 \text{ €} \quad (30)$$

En los costes indirectos se han incluido los correspondientes al alquiler del local (350 €/mes) y los gastos de agua y electricidad (95 €/mes).

**TABLA 9. 2. COSTES TOTALES PARA LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO.**

Salario ingeniero encargado	3930.40 €
Salario ingeniero asesor	300 €
Coste licencia ABAQUS	1100 €
Coste licencia Microsoft Office	250 €
Coste equipo informático	70.83 €
Coste de alquiler del local	1400 €
Costes de agua y electricidad	380 €
<b>COSTE TOTAL (SIN I.V.A)</b>	<b>7431.23 €</b>

El presupuesto total del proyecto asciende a una cantidad de *siete mil cuatrocientos treinta y uno con veintitrés euros*.

## 9.2. Impacto socio-económico

El trabajo realizado comprende la investigación sobre el comportamiento de la aleación Al-7075 ante unas determinadas condiciones externas. Enmarcar esta investigación en un entorno socio-económico es conveniente para evaluar el impacto de la misma, entendiendo por entono socio-económico todo aspecto del entorno que rodea la investigación que puede afectar en la concepción y aplicación de esta. De igual manera, el desarrollo de la investigación modificará el entorno.

El interés del estudio de aleaciones ligeras, para su posterior aplicación, ha crecido notablemente en las últimas décadas. El uso de estos materiales debido a su buenas propiedades mecánicas se ha hecho imprescindible en muchos sectores de la industria y el conocimiento de su comportamiento ante distintas sollicitaciones se hace necesario para su aplicación. El análisis del impacto socio-económico realizado tiene por objetivo explicar la influencia de la investigación realizada sobre cada uno de los aspectos que a continuación se detallarán y la asignación de una ponderación individual de cada uno de estos para obtener un valor global del impacto producido.

Los aspectos evaluados se han clasificado tomando como base los métodos de evaluación de impacto socio-económico propuestos en [45].

En primer lugar, se realiza un análisis del sistema de investigación que complementa y amplía el presente proyecto. Esta parte analiza el número investigadores dedicados a la caracterización del comportamiento de aleaciones ligeras, los artículos publicados, los ensayos realizados y las instituciones implicadas. La valoración de este aspecto permite definir la capacidad de desarrollo de lo tratado en el proyecto. En este caso, la capacidad de desarrollo tiene una valoración muy favorable ya que son numerosas las publicaciones dedicadas al comportamiento frente a cargas de impacto, muchas de ellas citadas a lo largo del desarrollo del trabajo, además de contar con un buen número de investigadores, universidades y centros de investigación dedicados a ello. También es importante tener en cuenta la gran divulgación de estos artículos científicos, que supone un factor positivo para el desarrollo, cuyo último fin es la implantación de la investigación en la industria.

En segundo lugar, se lleva a cabo un análisis del potencial de uso del conocimiento derivado de la investigación. Evaluará la capacidad de explotación de la investigación en los diversos sectores de la industria. La valoración referente a este aspecto es desfavorable en cuanto al impacto socio-económico se refiere. Se trata de un estudio insuficiente para su aplicación en la industria actualmente, pero con una alta capacidad de desarrollo como anteriormente se ha citado que si hará de esta investigación útil para la industria.

En tercer lugar, se analizan los efectos (positivos o negativos) que implica la incorporación del conocimiento alcanzado en la sociedad. Para conocer el impacto social se evaluarán los aspectos de seguridad y empleo. En cuanto a seguridad la valoración es muy favorable, ya que estos materiales proporcionarán la capacidad de fabricar estructuras más ligeras, con una buena capacidad de absorción de energía y buena capacidad de deformación. En cuanto al empleo la valoración es favorable, el conocimiento del comportamiento en casos dinámicos hará que sean cada vez más las aplicaciones en las que se comenzará a emplear aleaciones ligeras para la fabricación de estructuras, lo que generará un impacto positivo sobre el empleo creado.

Por último, se analizan los efectos que implica la incorporación del conocimiento alcanzado en el medio ambiente. Se evalúan los aspectos de ahorro de energía y recursos y materias primas empleadas. Especialmente en las aplicaciones de aleaciones de aluminio en las industrias del automóvil y aeronáutica generarán una reducción de los consumos y con ello de la contaminación, por lo que el ahorro de energía es muy favorable. En cuanto a recursos y materia prima se refiere, la ampliación del uso de estos materiales supondría una reducción de los recursos necesarios debido al buen comportamiento frente a la corrosión que presentan.

En la siguiente tabla se resumen las valoraciones dadas y se muestra el valor global del impacto generado.

<b>TABLA 9. 3. RESUMEN DE LAS VALORACIONES DEL IMPACTO SOCIO-ECONÓMICO</b>				
<b>Ponderaciones</b>	<b>-2</b>	<b>-1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
Capacidad de desarrollo				X
Capacidad de explotación		X		
Empleo			X	
Seguridad				X
Ahorro de energía				X
Consumo de recursos y materias primas			X	
<b>IMPACTO SOCIO-ECONÓMICO GLOBAL</b>	<b>7</b>			

## 10.REFERENCIAS

- [1] R. A. Bustamante Plaza. “Mecánica de sólidos”. Doc. Player. <https://docplayer.es/57883015-Mecanica-de-solidos-roger-a-bustamante-plaza.html> (acceso: 23 de marzo de 2019).
- [2] J.A. Acosta Sullcahuamán, “Fractura de materiales poliméricos a altas velocidades de sollicitación”, Tesis Doctoral, Dpto. de Ciencias de Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universitat politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2001. [En línea]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/handle/10803/6034>
- [3] J.M. Goicolea. “Estructuras sometidas a impacto”. Grupo de mecánica computacio-nal UPM. <http://w3.mecanica.upm.es/gmc/impacto.php> (acceso: 28 de marzo de 2019).
- [4] “Test results volvo XC90”. Euro Ncap for safer cars. <https://www.euroncap.com/es/results/volvo/xc90/20976> (acceso: 30 de mayo de 2019).
- [5] R. Hill, “A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals”, *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 193, pp. 281-297, nov. 1947.
- [6] K.E. N’souglo, J.A. Rodríguez-Martínez, A. Vaz-Romero y O. Cazacu, “The combined effect of plastic orthotropy and tension-compression asymmetry on the development of necking instabilities in flat tensile specimens subjected to dynamic loading”, *Int J Solids Struct*, vol. 159, pp. 272-288, mzo. 2019.
- [7] J. Zahr Viñuela, “Tema 1: Comportamiento Mecánico de los Materiales”, *Mecánica de Sólidos*, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2018.
- [8] M. Sánchez Soto, “Comportamiento mecánico y fractura de mezclas de poliestireno y microesferas de vidrio”, Tesis doctoral, Dpto. de Ciencias de Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universitat politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2000. [En línea]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/handle/10803/6040>
- [9] “Ensayo de tracción estática”. Universidad Tecnológica Nacional. Dpto de Ingeniería civil. [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/2\\_anio/tecno\\_materiales/files/TP%20N%C2%B08%20-%20Tracci%C3%B3n%20est%C3%A1tica.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/2_anio/tecno_materiales/files/TP%20N%C2%B08%20-%20Tracci%C3%B3n%20est%C3%A1tica.pdf) (acceso: 10 de mayo de 2019)

- [10] “Ensayo de tracción”. Instituto peruano de la calidad. <http://ipercal.com.pe/ensayos/> (acceso: 11 de mayo de 2019)
- [11] “El ensayo de tracción indirecta”. Universitat politècnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3324/558728.pdf?sequence=8&isAllowed=y> (acceso: 10 de mayo de 2019)
- [12] Y. Ortega, “Prueba de impacto: Ensayo Charpy”, *Rev. Mex. Fís.*, vol. 52, pp. 51-57, jun. 2006.
- [13] R.A. Gamboa-Castellanos, J.G. Carrillo-Baeza y E.A. Flores-Johnson, “Diseño y construcción de un cañón de gas de una etapa para pruebas de impacto de alta velocidad”, *Ing. Investigación y Tecnología*, vol. 16, pp. 185-195, jun. 2015.
- [14] L.F. Bermúdez Valencia y A.H. Borda Mojica, “La barra de Hopkinson: Avance, teoría y diseño”, Trabajo fin de grado, Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena de Indias, Colombia, 2005. [En línea]. Disponible en: <http://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0032105.pdf>
- [15] H.C. Mann, “Fundamental study of the design of impact test specimens”, *Proc Am Soc Test Mater*, vol.37, pp. 102-130, 1937.
- [16] D.S. Clark, “The influence of impact velocity on the tensile characteristics of some aircraft metals and alloys”, Tech. Rep.; National Advisory Committee for Aeronautics, 1942.
- [17] E. Parker y C. Ferguson, “The effect of strain rate upon the tensile impact strength of some metals”, *Trans Am Soc Met*, vol. 30, pp. 68-80, 1942.
- [18] G.F. Beardsley y L.D. Coates, “A study of the effect of repeated tension impact loads upon certain metals used in aircraft construction”, Tesis doctoral, California Institute of Technology, California, Estados Unidos, 1939.
- [19] P.E. Clark y P.E. Duwez, “Discussion of the forces acting in tension impact test of materials”, *J Appl Mech*, vol.15, pp. 243-247, 1948.
- [20] J. Lubliner, “A generalized theory of strain-rate-dependent plastic wave propagation in bars”, *J Mech Phys Solids*, vol.12, pp. 59-65, 1964.
- [21] S.A. Simmons, E. Hauserf y J. Dorn, “Response of metals to high velocity deformation”, *Inter-science*, pp. 1-14, 1961.
- [22] A. Glema, T. Lodygowski y P. Perzyna, “Interaction of deformation waves and localization phenomena in inelastic solids”, *Comput Method Appl Mech Eng*, vol. 183, pp.123-140, mzo. 2000.

- [23] A. Rusinek, R. Zaera, J.R. Klepaczko y R. Cheriguene, “Analysis of inertia and scale effects on dynamic neck formation during tension of sheet steel”, *Acta Materialia*, vol. 53, pp. 5387-5400, oct. 2005.
- [24] J.R. Klepaczko, “Review on critical impact velocities in tension and shear”, *Int J Impact Eng*, vol.32, pp. 188-209, dic. 2005.
- [25] G. Battams, "The use of optical techniques to asses the damage tolerance of composite materials", Tesis doctoral, Dept. Engineering Mats & Surface Engineerg, University of Southampton, Southampton, Reino Unido, 2014. [En línea]. Disponible en: <https://eprints.soton.ac.uk/363784/>
- [26] E.G. Maffia. “Estructuras y propiedades de las aleaciones”. Universidad Nacional de La Plata. [https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/M0624/descargar.php?-secc=0&id=M0624&id\\_inc=2717](https://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/M0624/descargar.php?-secc=0&id=M0624&id_inc=2717) (acceso: 15 de marzo de 2019)
- [27] S. Ortolá. “Manual del aluminio y sus Aleaciones”. Ingeniería de Materiales. <https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/> (acceso: 14 de marzo de 2019)
- [28] “Unidad 13. Aleaciones para ingeniería”. Universitat politècnica de Valencia. [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13\\_4.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm13/fcm13_4.html) (acceso: 20 de marzo de 2019)
- [29] M.T. Baile Puig, “Estudio de la conformación de componentes aluminio-silicio en estado semisólido”, Tesis Doctoral, Dpto. de Ciencias de Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universitat politècnica de Catalunya, Barcelona, España, 2005. Disponible en: <https://www.tdx.cat/handle/10803/6045?show=full>
- [30] A. Singh, G. Singh, “Study of Mechanical properties of Al 7075 alloy after Heat Treatment”. Research gate. [https://www.researchgate.net/publication/326065903-\\_Study\\_of\\_Mechanical\\_properties\\_of\\_Al\\_7075\\_alloy\\_after\\_Heat\\_Treatment](https://www.researchgate.net/publication/326065903-_Study_of_Mechanical_properties_of_Al_7075_alloy_after_Heat_Treatment) (acceso: 15 de marzo de 2019)
- [31] R. von Mises, *Z. angew. Math. Mech*, vol. 8, pp. 161, 1928.
- [32] J. Rueda et al., “Metodología para determinar densidad de microfracturas en rocas,a partir de parámetros anisótropos. Una aproximación en núcleos sintéticos”, *Revistas UIS*, Jun. 2010.
- [33] M. Lorenzo, B. González, J.C. Matos, L. Aguado, V. Kharin y J. Toribio, “Análisis del efecto Bauschinger en aceros de alta resistencia”, *Anales de mecánica de la fractura*, vol.1, nº 26, pp. 319-324, ene. 2009.

- [34] J. Zahr Viñuela y J.A. Rodríguez Martínez, “Tema 3: Plasticidad”, Mecánica de Sólidos, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2018.
- [35] A.J. Martínez Donaire, “Análisis del efecto del gradiente de deformaciones en el conformado de chapa metálica”, Tesis doctoral, Dpto. de Ingeniería Industrial, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/24277>
- [36] F. Korber y H. Hoff, “Ueber die Festigkeitseigenschaften und den rei  $\beta$ winkel kaltgewalzter metalle”. *Mitteilungen aus dem Kaiser-Wilhelm-Institut fuer Eisenforschung zu Duesseldorf*, n°10, pp. 175–187, 1928.
- [37] J. Zahr Viñuela, L. Moreno Fernández-Cañadas, A. Montoya Sancha, “Técnicas de programación en MATLAB aplicables al Método de Elementos Finitos en Elasticidad 2D, con Elementos Isoparamétricos de Cuatro Nodos”, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2018.
- [38] A. Vaz-Romero Santero, “Aplicación del Método de los Elementos Finitos al diseño y cálculo de estructuras multicelulares”, Estructuras ligeras, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2018.
- [39] M. Rubiales Duplas, “Predicción numérica del fallo por estricción en procesos de estirado de chapa con flexión”, Trabajo fin de grado, Dpto. de Ingeniería Industrial, Universidad de Sevilla, Sevilla, España, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/66704>
- [40] “Tema 7: Cuadratura de Gauss”, Modelización en mecánica de sólidos, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España, 2018.
- [41] F. de las Cuevas, A. Ferraiuolo, L. Pentti Karjalainen y J. Gil Sevillano, “Propiedades mecánicas a tracción y mecanismos de endurecimiento de un acero TWIP a altas velocidades de deformación: relación de Hall-Petch”, *Revista de Metalurgia*, vol. 50, n°. 4, 2014. [En línea]. Disponible en <http://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1338/1414>
- [42] D.S. Clark y D.S. Wood, “The influence of specimen dimension and shape on the results in tension impact testing”, *Proc ASTM*, pp.50-577,1950.
- [43] *Ambient Tensile Testing of Metallic Materials*, UNE-EN ISO 6892-2016
- [44] *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM E8/E8M-2016

- [45] Y. Milanés Guisado, F.M. Solís Cabrera y J. Navarrete Cortés. “Aproximaciones a la evaluación del impacto social de la ciencia, la tecnología y la innovación”. Acimed.<https://www.medigraphic.com/pdfs/acimed/aci-2010/aci102c.pdf> (Acceso: 1 de Junio de 2019).