



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos.

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE ENTALLA EN LA DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A FRACTURA CON EL ENSAYO *SMALL PUNCH*

Trabajo realizado por:

Ainhoa Jaurrieta Mellado

Dirigido:

Roberto Lacalle

David Andrés

Titulación:

**Máster Universitario en Ingeniería
de Caminos, Canales y Puertos**

Santander, Junio 2018

TRABAJO FINAL DE MÁSTER



INDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
1.1. INTRODUCCIÓN.....	3
1.2. OBJETIVOS.....	4
CAPÍTULO 2. EL ENSAYO <i>SMALL PUNCH</i>	6
2.1. INTRODUCCIÓN.....	6
2.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	7
2.2.1. Dispositivo experimental y probetas empleadas.....	7
2.2.2. Procedimiento de Ensayo	10
2.2.3. Resultados.....	10
2.3. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE TRACCIÓN MEDIANTE EL ENSAYO <i>SMALL PUNCH</i>	12
2.4. DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A FRACTURA MEDIANTE ENSAYOS <i>SMALL PUNCH</i>	14
CAPÍTULO 3. MATERIALES, METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL 18	
3.1. INTRODUCCIÓN.....	18
3.2. MATERIALES.....	18
3.2.1. Composición Química.....	19
3.2.2. Microestructura.....	20
3.3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	22
3.3.1. Dispositivos experimentales	22
3.3.2. Probetas empleadas.....	25
3.3.3. Realización de los ensayos	27
3.3.4. Tratamiento de Datos.....	28

3.4. MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS	28
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	31
4.1 INTRODUCCIÓN.....	31
4.2 RESULTADOS OBTENIDOS ACERO S355J2.....	32
4.3 RESULTADOS OBTENIDOS ALEACIÓN DE MAGNESIO AJ62	39
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	46
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA	48



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de la caracterización mecánica es conocer las propiedades del material, que permite realizar el análisis de la integridad estructural de los componentes de una estructura. Se trata, por tanto, de un análisis fundamental para evaluar el comportamiento de los elementos estructurales, requiriendo propiedades como la tenacidad a fractura, propiedades a tracción o propiedades de fluencia, para poder asegurar la integridad del conjunto. También permite optimizar los comportamientos de los componentes, obteniendo los límites resistentes reales del material, lo que permite maximizar su vida útil.

Tradicionalmente, la caracterización de los componentes se ha llevado a cabo con ensayos convencionales que necesitan grandes cantidades de material, pudiendo afectar a su integridad estructural. Las nuevas técnicas buscan evitar la destrucción de la pieza por medio de probetas miniatura. Esto consiste en obtener secciones muy reducidas de material del elemento a estudiar, sin comprometer su integridad estructural.

Entre las nuevas técnicas desarrolladas destaca el ensayo *Small Punch*, debido al gran nivel de difusión y al potencial que presenta. Consiste simplemente en punzonar una probeta plana de pequeñas dimensiones, deformándola hasta la rotura y registrando durante la prueba la carga ejercida sobre la muestra frente al desplazamiento experimentado por el punzón [1]. Como se aprecia, el ensayo *Small Punch* tiene un procedimiento muy sencillo y con obtención de resultados muy rápidos, lo cual permite el estudio de componentes en servicio. Se puede emplear además en otros campos donde se requieran pequeñas muestras o caracterización a nivel local, en el desarrollo de nuevos materiales, en el análisis de materiales irradiados o en la caracterización de soldaduras y recubrimientos [2].

El ensayo *Small Punch* permite estimar gran cantidad de propiedades: resistencia a tracción, tenacidad a fractura, obtención de la temperatura de transición dúctil-

frágil, caracterización en fluencia o fragilización por hidrógeno, entre otros. Además, aunque esta técnica se suele aplicar en aceros, ha sido empleada con éxito en otros materiales, como aleaciones ligeras o materiales cerámicos [2].

Sin embargo, aunque el ensayo *Small Punch* tiene gran recorrido, en la actualidad no existe una normativa de uso, pero se encuentra en proceso de estandarización en Europa y Estados Unidos, lo cual va a permitir unificar la geometría del ensayo. Si bien existe un código de recomendaciones europeo [3], que ha permitido comenzar a unificar los ensayos frente a la gran disparidad de geometrías de probetas y de útiles.

Una de las aplicaciones del ensayo *Small Punch* que más interés suscita es la estimación de la tenacidad a fractura de los materiales, asociada a la resistencia del material en presencia de fisuras. Hasta ahora se han utilizado multitud de métodos, como son su estimación a partir de la deformación equivalente de la probeta, a partir de la temperatura de transición o mediante métodos numéricos, entre otros. En este documento se estudia una de las opciones más prometedoras: su obtención por medio de probetas modificadas con una entalla lateral, que actúa a modo de defecto y permite la iniciación de una fisura, de manera análoga a los ensayos convencionales. Hasta la actualidad, la geometría empleada para la entalla lateral ha sido principalmente de radio 0.15 mm (valores propios del proceso de electroerosión) y longitud variable en torno a 4.5-5.0 mm, sin haberse analizado la influencia de la misma en los resultados. Por lo tanto, la optimización de la geometría de la entalla lateral da lugar a esta investigación, que se espera contribuya a aumentar la fiabilidad de la técnica *Small Punch*.

1.2. OBJETIVOS

Este Trabajo Fin de Máster tiene como objetivo analizar y optimizar la geometría de la entalla lateral pasante empleada en las probetas *Small Punch* con el fin de estimar la tenacidad a fractura. Como ya se ha expuesto en el apartado anterior, la geometría de la entalla no ha sido evaluada en detalle hasta ahora, por lo que en este trabajo se analizará la influencia tanto del radio como de la longitud de la misma en las estimaciones de tenacidad a fractura.

Para ello será necesario realizar el estudio de probetas *Small Punch* tanto por procedimientos experimentales, como mediante simulaciones de elementos finitos, aplicando diferentes escenarios, con diferentes combinaciones de radio y



longitud de entalla. Se van a estudiar dos materiales, con comportamientos opuestos, un acero estructural S355J2, con comportamiento de alta ductilidad y una aleación de magnesio AJ62, con un comportamiento de baja ductilidad.

En consecuencia, en base a los resultados obtenidos, mediante este trabajo se espera aumentar la fiabilidad de la técnica *Small Punch* y, en última instancia, contribuir al desarrollo del ensayo *Small Punch* como herramienta clave para la caracterización de componentes reales en evaluaciones de integridad estructural.

CAPÍTULO 2. EL ENSAYO *SMALL PUNCH*

2.1. INTRODUCCIÓN

El ensayo *Small Punch* surgió a principios de los años 80 en el MIT (*Massachusetts Institute of Technology*), con el fin de reducir los costes de los análisis de comportamiento mecánico de materiales irradiados. Para ello, Manahan, Argon y Harling plantearon el uso de un ensayo de flexión de un disco del tamaño de las probetas usadas en los microscopios de transmisión electrónica (TEM) [2, 4]. Al reducir notablemente el volumen de material ensayado, disminuyó la dosis neutrónica de la probeta necesaria para realizar la caracterización, y por tanto, se redujeron los costes de ensayo; siendo esta la primera aplicación del ensayo *Small Punch* [2].

A partir de su inicio hasta la actualidad el ensayo *Small Punch* ha ido desarrollándose debido en gran medida a sus reducidas dimensiones y su gran potencial, con diversas aplicaciones donde las metodologías convencionales no resultarían adecuadas y en gran variedad de materiales. Es importante resaltar que se trata de un ensayo alternativo, no convencional y de naturaleza indirecta, es decir, que, sin ser propiamente de tracción o tenacidad, permite la estimación de estas propiedades.

Algunos de los usos del ensayo *Small Punch* son los siguientes [2]:

- Determinación de las propiedades de los materiales de componentes en servicio, puesto que el reducido volumen de las probetas disminuye el riesgo de poner en peligro la integridad de la estructura.
- Evaluación de las propiedades de materiales irradiados, puesto que al disminuir el tamaño de la muestra se reduce el nivel de dosis de la muestra.
- Reutilización de materiales ensayados en situaciones de escasez de material, como, por ejemplo, en los programas de vigilancia de centrales nucleares. Gracias al reducido tamaño de las probetas, es posible obtener probetas *Small Punch* de probetas convencionales previamente ensayadas.
- Caracterización de capas de recubrimiento, donde no es posible realizar ensayos convencionales debido al espesor de las mismas.



- Determinación de las propiedades locales de zonas críticas de componentes, como, por ejemplo, en las diferentes regiones de una unión soldada.
- Desarrollo de materiales, puesto que permite la fabricación de pequeños volúmenes de material para comprobar sus propiedades, con el consiguiente ahorro económico y de tiempo.
- Análisis de anisotropía de materiales, pudiendo caracterizar diferentes direcciones con reducidos volúmenes de material.
- En general, la caracterización de materiales en cualquier escenario de escasez de material o donde sea necesaria la caracterización local de propiedades.

El desarrollo y uso práctico de la técnica de prueba *Small Punch* para la evaluación de propiedades mecánicas de materiales metálicos en Europa dio como resultado la publicación del documento CEN CWA 15627 Small Punch Test Method for Metallic Materials en 2007 [3]. La evaluación de las propiedades mecánicas reales de los materiales metálicos de los resultados de tales pruebas según CWA 15627 [3] se presentaron en las tres primeras conferencias internacionales SSTT "*Determination of Mechanical Properties by Small Punch and other Miniature Testing Techniques*" celebradas en Ostrava (2010, 2012) y Castle Seggau en Austria (2014) [5]. En la actualidad se está trabajando en el desarrollo de una normativa que unifique todos los resultados obtenidos a lo largo del desarrollo del ensayo *Small Punch*.

A lo largo de este capítulo se va a describir la técnica de ensayo *Small Punch*, desarrollando el procedimiento experimental empleado y algunas de las metodologías desarrolladas para la estimación de las propiedades del material.

2.2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.2.1. Dispositivo experimental y probetas empleadas

El ensayo *Small Punch* tiene un procedimiento similar al ensayo de punzonado por bola, empleado como medida de la ductilidad de láminas metálicas, es decir, se somete a una probeta de lámina plana de pequeñas dimensiones a un punzonamiento hasta la rotura [6].

El dispositivo experimental consta de una matriz rígida inferior donde descansa la probeta, una matriz rígida superior que empotra a la probeta a lo largo de su perímetro y un punzón de cabeza semiesférica que se encarga de aplicar la carga sobre la probeta [2], como se aprecia en la Figura 2.1. Es necesario que ambas matrices estén perforadas para permitir el paso del punzón que perfora la probeta y permitir la deformación de la probeta.

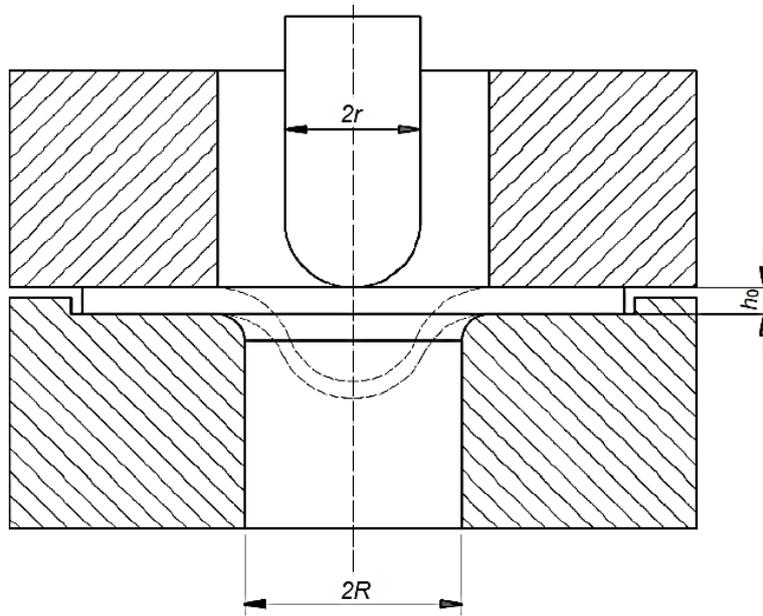


Figura 2.1. Esquema de la geometría de ensayo [1].

La geometría del dispositivo experimental es función de las dimensiones de la probeta, de acuerdo con las recomendaciones del CWA 15627:2007 [3]. Las dimensiones más empleadas, para una probeta de espesor 0.5 mm, son las siguientes:

- Probeta: espesor $h_0 = 0.500 \pm 0.005$ mm y diámetro de 8 mm o superior.
- Punzón: radio de la cabeza semiesférica, $r = 1.00 - 1.25$ mm.
- Matriz inferior: radio de la apertura para deformación de la probeta $R = 2$ mm. Además, la matriz inferior tendrá un chaflán a lo largo del perímetro de la apertura a 45° y dimensiones $R + 0.2$ mm.
- Matriz superior: deberá tener una apertura con un radio máximo de 2.2 mm, para poder empotrar la probeta contra la matriz superior.

Además, se recomienda que el material empleado como dispositivo experimental posea una dureza no inferior a 55 HRC.



Aunque el documento [3] recomiende unas dimensiones específicas, otros autores han demostrado que el ensayo es válido para diversas dimensiones, tanto en las dimensiones de la probeta, como en el dispositivo experimental, lo que dificulta la comparación de resultados entre laboratorios.

Las diversas tipologías de muestras se pueden encuadrar en dos grupos principales [2]: probetas circulares de 3 mm de diámetro y 0.25 mm de espesor y probetas circulares de 8 mm de diámetro y 0.5 mm de espesor. Otra geometría ampliamente empleada es la de probetas cuadradas de 10x10 mm y espesor 0.5 mm, que presentan la ventaja de poder ser mecanizadas fácilmente a partir de mitades de probetas Charpy ya ensayadas. La zona de proceso es exactamente la misma con independencia de que se empleen probetas circulares de 8 mm de diámetro, tal como recomienda el Código [3], o cuadradas de 10x10 mm, ya que la superficie adicional que aportan estas últimas muestras permanece empotrada, sin influenciar en los resultados.

En el caso de probetas para la determinación de la tenacidad a fractura, como es el caso de este trabajo, se introduce un defecto inicial en la probeta, empleándose probetas con entallas pasantes centradas, probetas con fisura longitudinal no pasante, probetas con entalla lateral pasante o probetas con entalla circular no pasante, entre otros, como se aprecia en la Figura 2.2. Para este caso el empleo de probetas cuadradas con fisuras de tipo lateral o longitudinal añade ventajas, ya que permite analizar una dirección concreta del material.

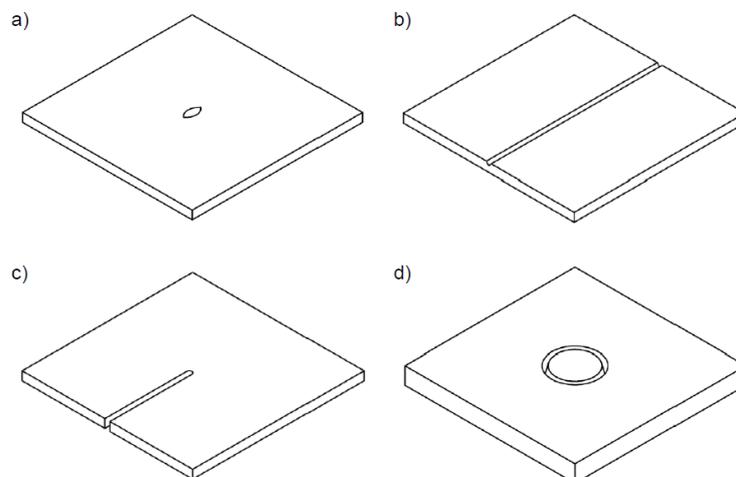


Figura 2.2. Probetas Small Punch modificadas: a) Probeta con entalla pasante centrada [7]; b) Probeta con fisura longitudinal no pasante [8, 9]; c) Probeta con entalla lateral pasante [1, 10]; d) Probeta con entalla circular no pasante [11].

2.2.2. Procedimiento de Ensayo

Una vez obtenidas las probetas de los elementos estructurales a analizar, en el caso de obtención de tenacidad a fractura o propiedades a tracción, el ensayo comienza colocándolas sobre el dispositivo experimental o utillaje. Para ello, se sitúa la probeta sobre la matriz inferior, la cual deberá tener un pequeño rebaje con las dimensiones de la probeta para facilitar su colocación.

Posteriormente se coloca la matriz superior, asegurándose que la probeta se encuentra empotrada en los extremos. Colocaremos a continuación el utillaje en una máquina convencional de ensayos mecánicos donde el punzón se desplaza a velocidad constante durante el ensayo, esta velocidad se estima entre 0,2 y 2 mm/min. Finalmente se da por concluido el ensayo cuando la carga aplicada en el punzón desciende un 20% respecto al valor máximo alcanzado, similar a los ensayos convencionales.

A lo largo del ensayo se deben registrar de manera continua la fuerza ejercida por el punzón y el desplazamiento de la probeta respecto al tiempo. El desplazamiento de la probeta puede ser determinado a través del descenso del punzón (descontando el componente de desplazamiento que aporta el utillaje) o a través de un comparador tipo LVDT colocado bajo el punto central de la muestra, tal como se muestra en la Figura 2.3 [8].

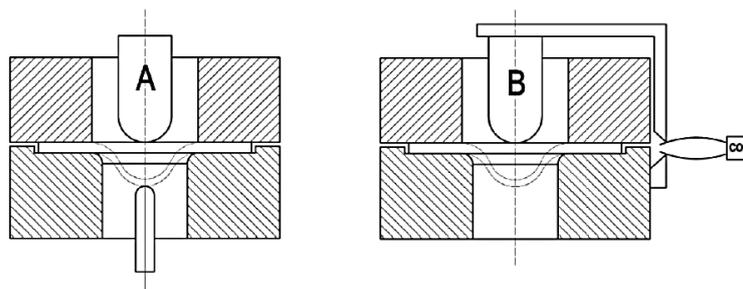


Figura 2.3 Esquema de los sistemas de medida de desplazamiento en la probeta: a) LVDT bajo el punto central de la probeta; b) Medida del desplazamiento del punzón mediante un COD externo [1].

2.2.3. Resultados

Simultáneamente a la realización del ensayo se van obteniendo dos curvas que nos indican la evolución de la probeta dentro del ensayo. Estas curvas son la curva Carga-Desplazamiento y la curva Carga-Desplazamiento VPDT. A partir



de estas curvas se pueden obtener las propiedades de los materiales estudiados, en el caso de este documento, la tenacidad a fractura del material.

En la curva Carga-Desplazamiento registrada durante la prueba se pueden distinguir diversas regiones de comportamiento [1]:

- Zona I: Comportamiento principalmente elástico, donde la probeta se comporta como una placa a flexión.
- Zona II: Aparecen deformaciones plásticas, aunque la probeta se sigue comportando como placa.
- Zona III: La probeta se comporta como una membrana, gracias al elevado grado de deformaciones y a la reducción de espesor de la misma.
- Zona IV: Se produce la inestabilidad plástica, que conduce a la rotura de la probeta tras la reducción del espesor en una región anular, de manera similar a la estricción de una probeta de tracción uniaxial.

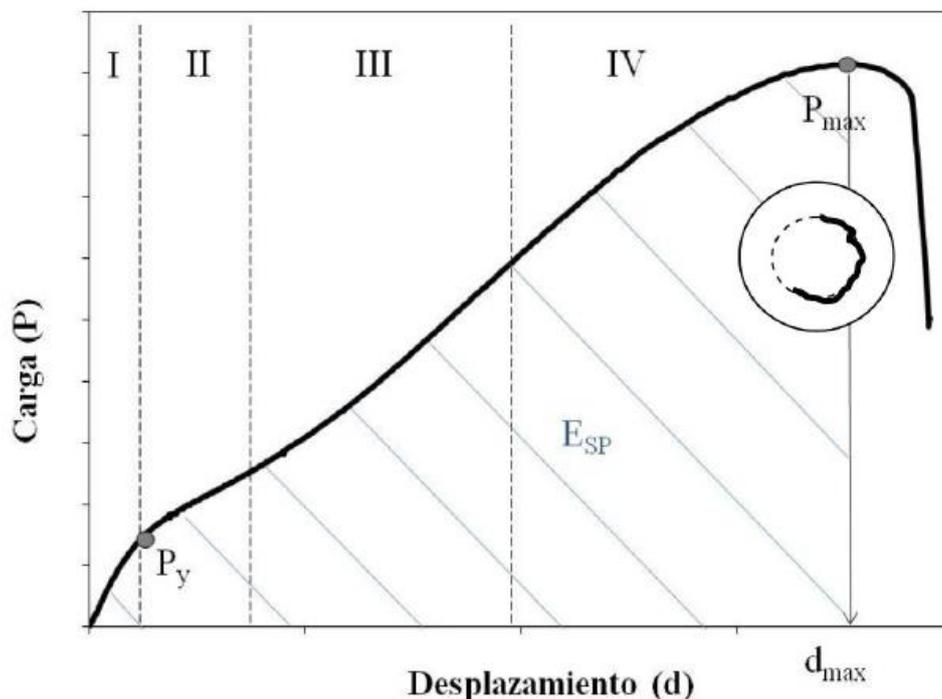


Figura 2.4. Curva Carga-Desplazamiento característica de un ensayo Small Punch para un material dúctil [1].

En el caso de materiales frágiles, la curva de ensayo no presentará la zona III, esto es debido a la fragilidad del material. Además, la rotura de la probeta en este caso no será de tipo circunferencial como en los materiales dúctiles, sino en estrella,

es decir, con fisuras que parten del punto central de la probeta en dirección radial [2, 12], sin presentar zona de estricción.

2.3. DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE TRACCIÓN MEDIANTE EL ENSAYO *SMALL PUNCH*

Una de las primeras aproximaciones del ensayo *Small Punch* fue la determinación de las propiedades a tracción del material [13]. Se distinguen tres aproximaciones metodológicas [14]:

- Las correlaciones experimentales, las aproximaciones más extensamente estudiadas, se basan en correlaciones entre los resultados de ensayos normalizados frente a parámetros obtenidos directamente de la curva fuerza-desplazamiento del ensayo [13, 15].
- Algunos autores desarrollaron formulaciones analíticas basadas en el estado tensional de la probeta a lo largo del ensayo [16].
- Por último, se desarrollaron otro tipo de aproximaciones basadas en simulaciones por elementos finitos o redes neuronales [17, 18].

Debido a la multitud de métodos existentes, en este trabajo se describen tan solo tres métodos representativos de estimación de las propiedades de tracción de materiales metálicos, basadas en correlaciones empíricas [1, 2, 19, 20]. Hay que señalar que cada metodología plantea el uso de diferentes parámetros obtenidos a partir de las curvas Carga-Desplazamiento, teniendo un carácter empírico-analítico todas ellas [2].

Para obtener el límite elástico, de acuerdo con los métodos estudiados [1, 2, 19, 20] se deben emplear las siguientes expresiones:

$$s_y = 0.55 \cdot \frac{F_{y(CEN)}}{h_0^2} - 59.863 \quad (2.1)$$

$$s_y = 1.35 \cdot \frac{F_{I-II}}{h_0^2} \quad (2.2)$$

$$s_y = 0.35 \cdot \frac{F_{y(h/10)}}{h_0^2} \quad (2.3)$$

En las tres expresiones se emplea una formulación similar a la utilizada para obtener la tensión máxima en una placa circular de espesor h_0 , empotrada en todo su perímetro y sometida a una carga vertical centrada, la cual es



determinada a partir de la curva Carga-Desplazamiento de acuerdo con varios criterios, en función del autor [2].

En las expresiones anteriores (2.1), (2.2) y (2.3), s_y representa el límite elástico del material (MPa), $F_{y(CEN)}$ es la carga correspondiente a la proyección vertical del punto de corte entre las tangentes de los dos primeros tramos de la curva Carga Desplazamiento [3], F_{I-II} es la carga correspondiente al primer punto de inflexión de la curva Carga-Desplazamiento (N) y $F_{y(h/10)}$ corresponde a la carga obtenida en la intersección entre la curva Carga-Desplazamiento y una línea recta paralela a la pendiente inicial del ensayo desplazada $h_0/10$ respecto al origen (N); tal como se muestra en la Figura 2.5.

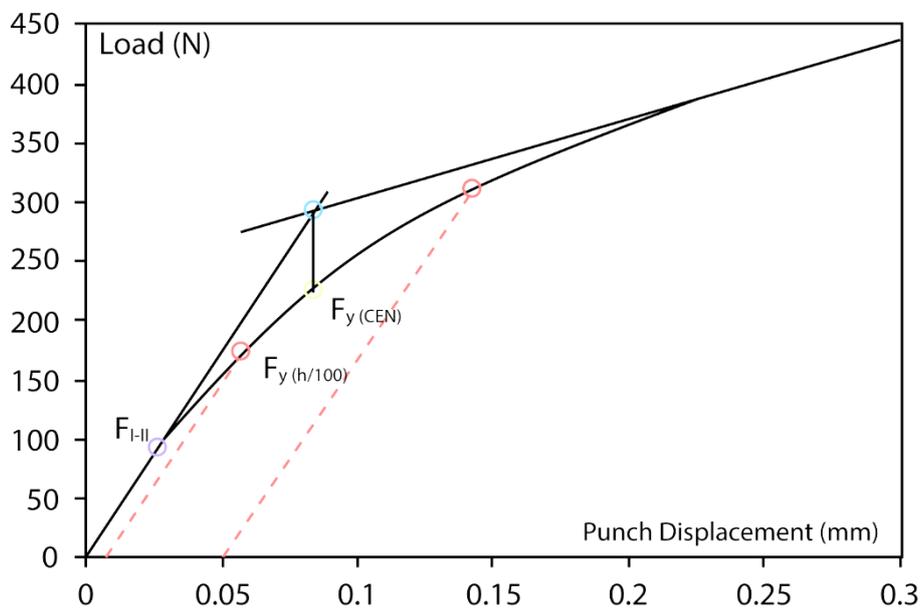


Figura 2.5. Parámetros obtenidos de la curva Carga-Desplazamiento para estimar el límite elástico a partir del ensayo Small Punch [20].

Por lo tanto, para estimar la resistencia a tracción del material, se pueden emplear las siguientes expresiones (2.5),(2.6) y (2.7), que relacionan en todas ellas la carga máxima alcanzada a lo largo de la prueba F_m (N), con la resistencia del material.

$$s_u = 0.52 \cdot \frac{F_m}{d_m \cdot h_0} - 170.5 \quad (2.4)$$

$$s_u = 0.74 \cdot F_{II-III} + 0.17 \cdot F_m \quad (2.5)$$

$$S_u = 0.28 \cdot \frac{F_m}{d_m \cdot h_0} \quad (2.6)$$

En las expresiones anteriores, s_u se define como la resistencia a tracción del material (MPa), F_{II-III} es la carga correspondiente al segundo punto de inflexión de la curva Carga-Desplazamiento (N) y d_m corresponde al desplazamiento en el momento en el que se alcanza la carga F_m (mm), tal como se muestra en la Figura 2.6.

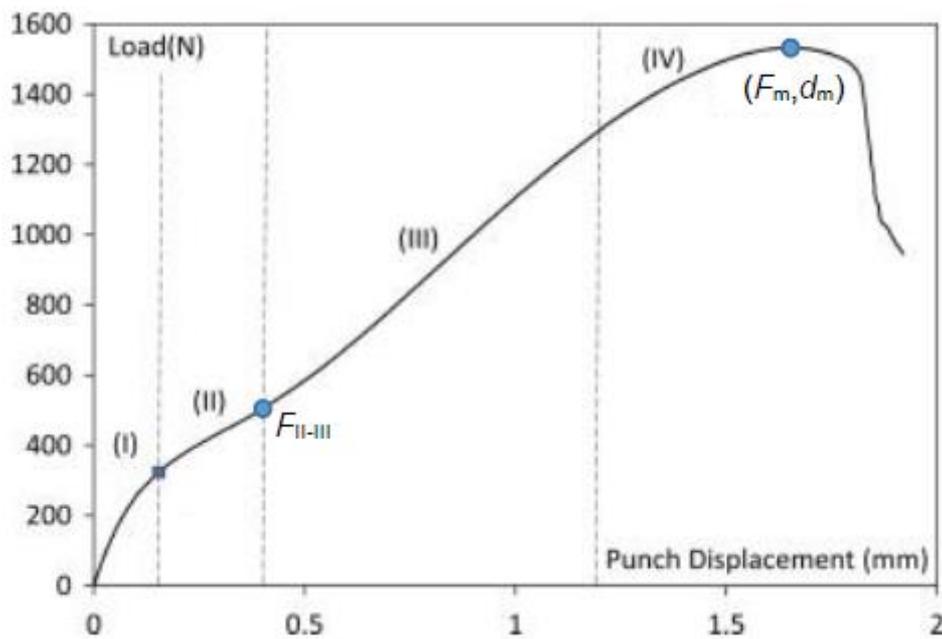


Figura 2.6. Parámetros obtenidos de la curva Carga-Desplazamiento para estimar la resistencia a tracción a partir del ensayo Small Punch [20].

2.4. DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A FRACTURA MEDIANTE ENSAYOS SMALL PUNCH

Las metodologías desarrolladas para la obtención de la tenacidad a fractura se pueden clasificar en tres grandes grupos: basadas en relaciones empíricas, en expresiones analíticas y en aproximaciones y simulaciones numéricas por elementos finitos.

Las correlaciones empíricas pueden estar relacionadas con la temperatura de transición dúctil-frágil obtenida mediante el ensayo Charpy [2, 21], que se relaciona con la obtenida a través del ensayo *Small Punch* tras la realización de ensayos a diferentes temperaturas. Otra opción es correlacionar la tenacidad a fractura con la deformación equivalente a fractura, basado en los trabajos iniciados por Mao [2, 13]. Por otro lado, los métodos



basados en elementos finitos precisan de la realización de ensayos *Small Punch* para posteriormente poder simular los ensayos, que permiten determinar las propiedades del material, para así después poder simular un ensayo convencional de fractura y estimar el valor de la tenacidad a fractura [2, 22].

Los métodos analíticos requieren, al contrario del resto, de la presencia de un defecto tipo fisura en la muestra. Es por ello por lo que se han propuesto diversas modificaciones de la probeta a lo largo del desarrollo del ensayo *Small Punch*, como las mostradas en la Figura 2.2 [1, 7, 11]. Entre ellos destaca el propuesto en [1, 10] con entalla lateral pasante, ya que permite la caracterización del material en cualquier orientación y presenta una buena correspondencia con los resultados obtenidos mediante metodología convencional en materiales metálicos [2, 23], patente también por la adopción de esta morfología de probeta en otros centros especialistas en ensayos Small Punch [2, 24, 25].

Esta metodología está basada en la determinación de la tenacidad por medio del concepto de CTOD (*Crack Tip Opening Displacement*) [1, 10]. Según éste, en aquellos materiales que en presencia de defectos no se comporten de acuerdo a los principios de la Mecánica de la Fractura Elástico Lineal, las fisuras experimentan un cierto grado de enromamiento antes de producirse la rotura o el crecimiento estable de las mismas. La magnitud de dicho enromamiento (CTOD) está directamente relacionada con la tenacidad a fractura del material [2, 26]. En el caso del ensayo *Small Punch* con entalla lateral pasante, el valor de CTOD puede ser establecido geoméricamente en función del desplazamiento del punzón y la longitud de entalla aplicada [1, 10].

Además, desde un punto de vista experimental se ha comprobado que la iniciación de grieta tiene su reflejo en la curva Carga-Desplazamiento en forma de discontinuidad en la pendiente de la curva, pudiendo adoptarse este criterio para determinar el instante de iniciación a través del registro de los datos del ensayo [2, 10, 22].

El método se puede resumir de la siguiente manera [1]:

- Determinación de las propiedades de tracción: mediante ensayos *Small Punch* o metodología convencional.
- Determinación del coeficiente de endurecimiento n , si no se dispone de ensayos de tracción convencionales, se puede determinar en base a [3] mediante la ecuación (2.7).

$$\frac{1}{n} = 0.3 \cdot \left[1 - \left(\frac{s_y}{s_u} \right) \right] \quad (2.7)$$

- Determinación del parámetro d_n , basado en los trabajos de Shih [27], mediante el ábaco que se puede observar en la Figura 2.7.

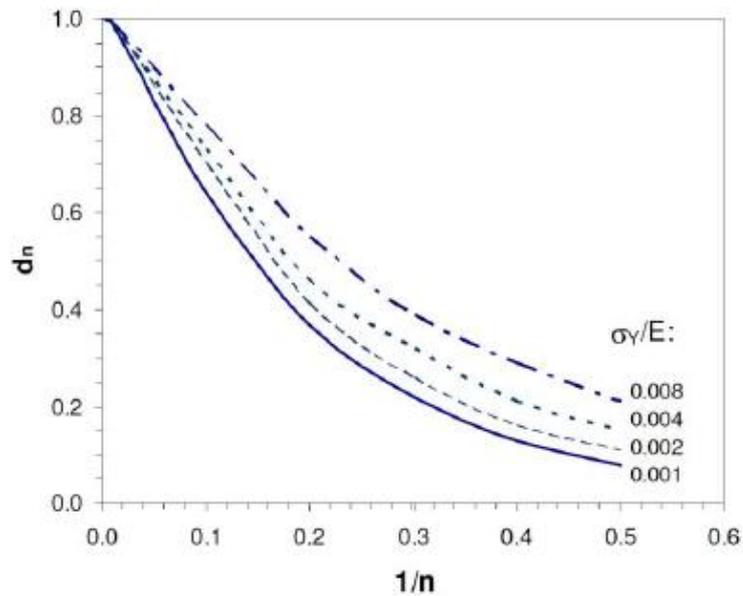


Figura 2.7. Estimación (en tensión plana) del parámetro d_n en base a las propiedades de tracción del material [27].

- Realización del ensayo Small Punch con probeta entallada e identificación de la iniciación de la fisura, tal como se muestra en la Figura 2.8.

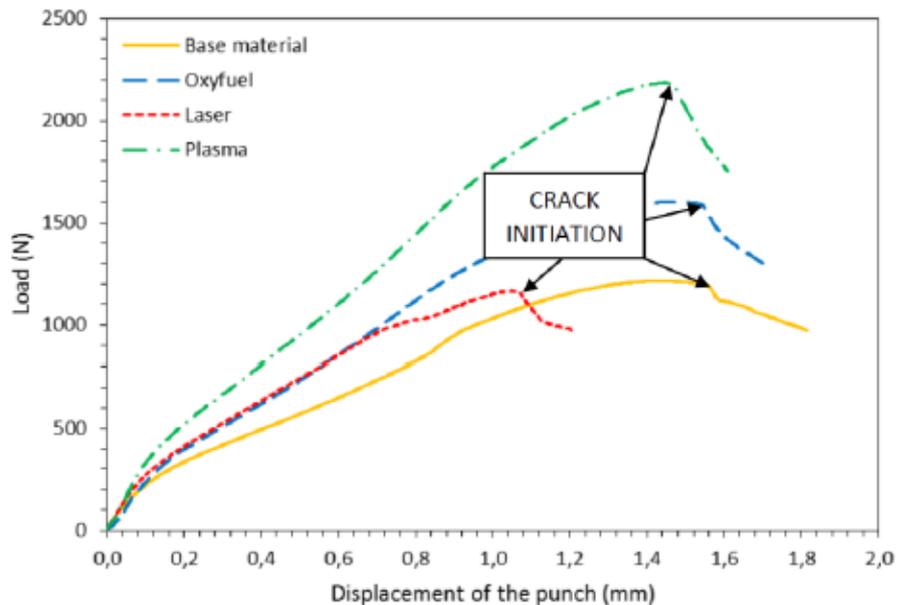


Figura 2.8. Identificación del quiebro en la continuidad de la pendiente de la curva Carga-Desplazamiento como iniciación de la fisura [28].

- Determinación del CTOD de iniciación o δ_{SPi} a partir del desplazamiento del punzón en el momento de iniciación de fisura (Figura 2.9), en la cual se presenta



un ábaco que relaciona el desplazamiento del punzón con el nivel de enromamiento de la fisura. Se trata de una relación geométrica que no depende de las características mecánicas del material y que ha sido obtenida mediante simulaciones de elementos finitos para diferentes longitudes de entalla. El nivel de enromamiento o apertura de la fisura, δ_{SPi} , se calcula como la media entre las aperturas máximas de la cara inferior y superior de la probeta menos el diámetro inicial de la entalla [1], en este trabajo se va a estudiar dos diámetros iniciales de entalla, un diámetro de 0.3 mm y uno de radio cero.

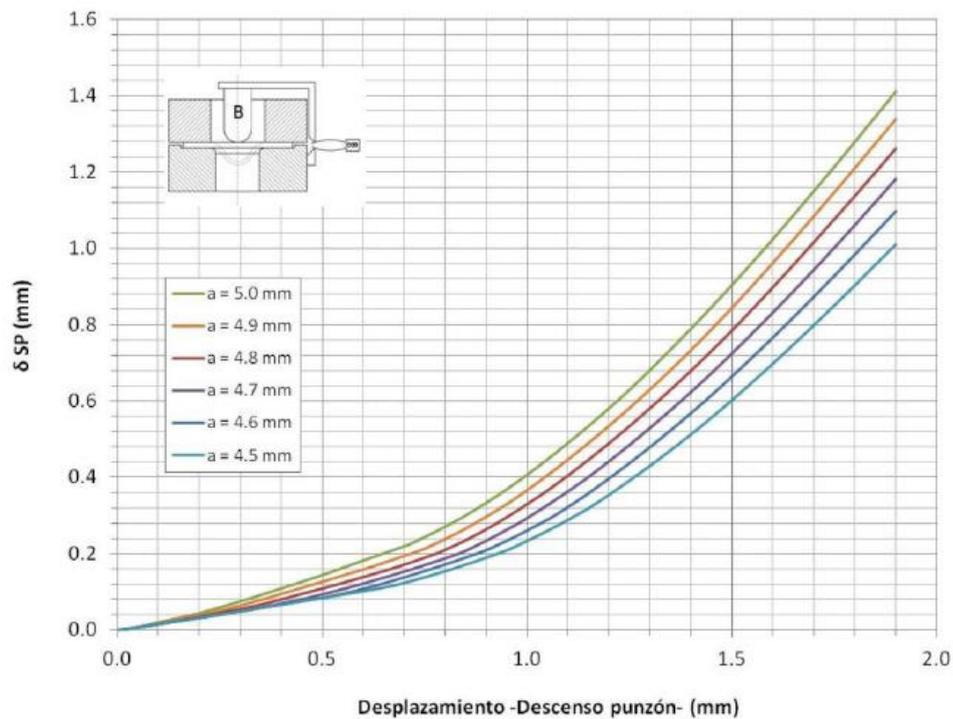


Figura 2.9. Relaciones entre el Desplazamiento del punzón y el valor de δ_{SP} para longitudes de entalla iniciales comprendidas entre 4.5 y 5.0 mm [1].

- Cálculo de la tenacidad de iniciación J_{Ic} mediante la ecuación (2.8) , de acuerdo a [16].

$$J_{Ic} = \frac{\delta_{SPi} \cdot S_y}{d_n} \quad (2.8)$$

CAPÍTULO 3. MATERIALES, METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan la tipología de materiales utilizados en este trabajo, definiendo de forma clara sus propiedades y microestructura. Además, se define el procedimiento experimental llevado a cabo en los ensayos *Small Punch*, así como una descripción de los modelos empleados en las simulaciones de elementos finitos.

3.2. MATERIALES

En este trabajo se han estudiado dos tipos de materiales de comportamientos opuestos: un acero estructural comúnmente usado en de la industria y una aleación ligera de magnesio. Este material, aunque actualmente es menos empleado, está sustituyendo a otros materiales dentro de la industria automovilística, por ejemplo, y permite ampliar el rango aplicación del ensayo Small Punch a otros materiales, como son las aleaciones ligeras. Los materiales utilizados han sido los siguientes:

- Acero estructural S355-J2
- Aleación de Magnesio AJ62

El acero S355-J2 es un acero estructural laminado en caliente, muy empleado en edificación y en ingeniería civil. Sus aplicaciones más comunes son en bulones, cadenas, ejes de ferrocarril, bielas y estructuras metálicas. Tanto sus características químicas, como mecánicas vienen reguladas por la norma EN-ISO 10025 [28]. Se trata de un acero al carbono dúctil con una resistencia media y con buena soldabilidad y tenacidad.

Las aleaciones de Magnesio se caracterizan por ser poco dúctiles y con baja tenacidad. Las aleaciones donde participa el magnesio son muy fáciles de mecanizar. A temperatura ambiente el magnesio se endurece rápidamente por lo que hay que trabajar con él con gran rapidez. Las fundiciones de las aleaciones del magnesio son estables hasta temperaturas próximas a los 95°C. Algunos tipos



de aleaciones, como la aleación magnesio-aluminio-zinc, se envejecen si son usadas por encima de estas temperaturas. Las coladas de molde de aleaciones permanentes son bastante resistentes, viniendo utilizadas en los componentes de motores de aviones y llantas de los vehículos de competición. El magnesio es fácil de trabajar si se encuentra en caliente, por lo que normalmente se necesitan menos etapas que para trabajar con otros metales. Básicamente se necesitan tan sólo tres fases, el curvado, el calado y la terminación. La denominación de las aleaciones del magnesio sigue los sistemas de nomenclatura de referencia, entre los más usados se encuentra el sistema de A.S.T.M (Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales), donde se especifican tanto la dureza como la composición química [29].

3.2.1. Composición Química

La composición química de los materiales empleados en este trabajo aparece indicada en la Tabla 3.1.

	S355J2	AJ62
C	0.106	-
Si	0.493	-
Mn	1.57	0.0034
P	0.013	-
S	0.0008	-
N	0.004	-
Cu	0.032	-
Mo	0.015	-
Ni	0.058	-
Cr	0.045	-
V	0.001	-

Nb	0.027	-
Ti	0.004	-
B	0.0001	-
Al	0.036	0.06
Mg	--	-
Zn	--	-
Fe	Resto	-
Sr	-	0.02

Tabla 3.1. Composición química materiales de referencia. Resultados en % en peso [1].

3.2.2. Microestructura

La Figura 3.1 y Figura 3.2 muestran la representación correspondiente a la microestructura de cada uno de los materiales. La Figura 3.1 ilustra los rasgos microestructurales según los tres planos coordenados, definidos por las orientaciones L (dirección del laminado), T (dirección transversal al laminado) y S (ancho de la chapa), mientras que la Figura 3.2 muestra la representación de la microestructura en una de las direcciones.

En todos los casos las observaciones microestructurales han sido realizadas mediante microscopía óptica, preparando previamente las muestras mediante un pulido y un posterior ataque químico [1].

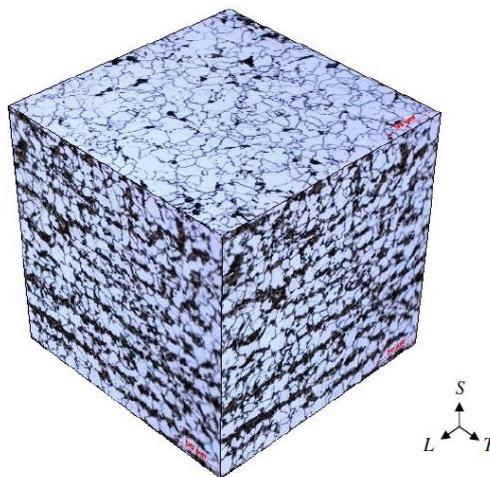


Figura 3.1. Microestructuras correspondientes al acero S355 [2] [1].

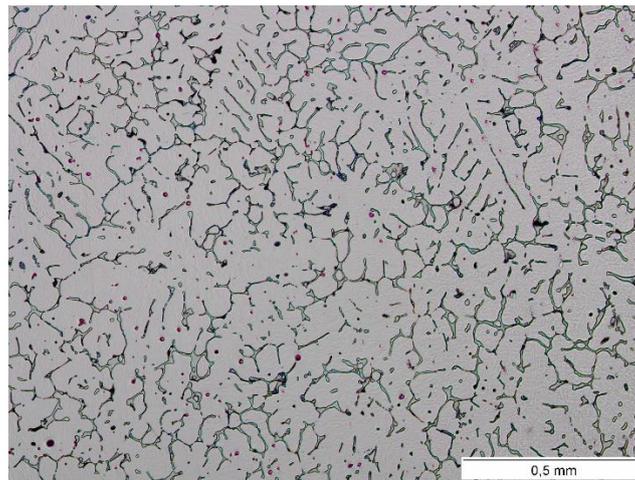


Figura 3.2. Microestructuras correspondientes a la Aleación de Magnesio AJ62.

Como se puede apreciar en la Figura 3.1, correspondiente a la microestructura del acero S355J2, presenta una microestructura de tipo ferrítico-perlítico, con una orientación de los granos bien definida según la dirección del laminado [1]. Por el contrario, la microestructura de esta aleación AJ62 mostrada en la Figura 3.2 consiste en una matriz de α -Mg y compuestos interdendríticos distribuidos en los límites de los granos [30].

A continuación, se indican los valores resistentes de tenacidad y tracción correspondientes a cada uno de los materiales estudiados. En el caso de la aleación de magnesio AJ62, se han realizado dos ensayos de tenacidad a fractura de acuerdo a la norma ASTM 1820 [23]. El objetivo es determinar las condiciones críticas que permiten la fractura súbita de una pieza que se somete a tensiones uniaxiales. Se han obtenido los siguientes valores: $K_{JIC} = 10.7 \text{ MPa m}^{1/2}$ y $K_{JIC} = 10.2 \text{ MPa m}^{1/2}$. Las propiedades a tracción se obtendrán a través del ensayo *Small Punch*.

Para el acero S355J se han realizado tres ensayos de tenacidad a fractura, de acuerdo a la norma ASTM 1820 [23], para la obtención de las propiedades de tenacidad, obteniéndose los siguientes resultados: $K_{JIC} = 347.74 \text{ MPa m}^{1/2}$, $K_{JIC} = 332.47 \text{ MPa m}^{1/2}$ y $K_{JIC} = 368.99 \text{ MPa m}^{1/2}$. Las propiedades a tracción [31] obtenidas son:

- E: 201.6 GPa
- Límite elástico: 376.4 MPa

- Resistencia a tracción: 557.6 MPa

3.3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En los apartados siguientes se van a describir el procedimiento experimental para la realización de ensayos *Small Punch* empleado en este trabajo. El procedimiento se ajusta a las recomendaciones dispuestas por el Código Europeo CWA 15627:2008 [3]. Se describirán las particularidades del método experimental empleado, haciendo referencia al utillaje de ensayos, a la tipología de probeta empleada, a los parámetros propios del ensayo y al tratamiento de datos [2].

3.3.1 Dispositivos experimentales

De acuerdo al Código Europeo CWA 15627:2008 [3], y como ya se ha comentado en el apartado 2.2.2. los elementos fundamentales del utillaje necesario para la realización del ensayo *Small Punch* son, en primer lugar, una matriz inferior donde se coloca la probeta y permite su deformación, una matriz superior, cuyo objetivo es empotrar la probeta en todo su contorno y por último un punzón que se encarga de transmitir la carga a la probeta.

Las dimensiones de estas piezas en su contacto con la probeta son, por tanto, las que definen el tamaño de la zona de proceso y el tipo de sollicitación [1, 2]. En este trabajo se han adoptado las recomendaciones del Código Europeo [3]: radio del agujero de la matriz inferior $R = 2$ mm y radio del punzón de cabeza semiesférica $r = 1.25$ mm.

Estos elementos suponen las características básicas del utillaje empleado desde un punto de vista práctico, pero el dispositivo cuenta con más piezas y particularidades que permiten asegurar la correcta realización de la prueba y garantizan el adecuado ensamblaje a la máquina de ensayos a la que debe ser acoplado [2]. Este equipo experimental debe ser correctamente diseñado para la correcta realización de los ensayos, lo que supone un gran reto.

Al estudiar diferentes longitudes de entalla se debe garantizar su correcta alineación dentro de la matriz inferior. Para ello se ha desarrollado una nueva matriz móvil capaz de adaptarse a la geometría de cada probeta. Tal y como se muestra en la Figura 3.4, se compone de una mitad fija, y otra móvil, esto permite ajustar la longitud de cada probeta y evitar posibles holguras, minimizando las posibles desviaciones de la entalla durante el ensayo.



El utillaje completo utilizado, por tanto, para estimar la tenacidad a fractura y las propiedades a tracción de cada uno de los materiales estudiados, se muestra en la Figura 3.3, desarrollado en trabajos previos [1, 2].

El utillaje utilizado se caracteriza [2] por estar formado por piezas intercambiables, lo que permite el empleo de diferentes tipologías de probetas y su sustitución fácil. Como se ha mencionado, la matriz inferior sirve de alojamiento a la probeta, permitiendo al tiempo su deformación, y asegurando la correcta colocación de la probeta. La matriz superior garantiza el empotramiento de la probeta en todo su contorno, permitiendo el paso del punzón, por lo que cuenta con un rebaje que encaja con la matriz inferior, dispone también de un orificio que permite el paso del punzón y actúa como guía. Su cabeza esférica facilita el apriete de la misma sobre la probeta mediante el tornillo superior, ejerciéndose presión de manera homogénea sobre la probeta. El punzón está formado por dos partes: un actuador, con una parte de sección de hasta 8 mm de diámetro para evitar su pandeo y una esfera de 1.25 mm de radio que es la encargada de ejercer la presión sobre la probeta. La separación de actuador y esfera en el punzón en dos piezas viene motivada por cuestiones de sencillez constructiva, y también porque permite la posibilidad de cambio de la esfera por su desgaste de una manera sencilla.

Por último, el presionador es el encargado de transmitir la fuerza de la máquina de ensayos al punzón y el casquillo externo aloja y ensambla al resto de piezas, permitiendo la instalación del conjunto en la máquina de ensayos [2]. El conjunto de piezas se ha fabricado en acero F-521 seguido de un tratamiento de temple y revenido, lo que asegura que se alcanza la dureza del material recomendada por el Código Europeo [3].

Para la realización de los ensayos, el útil se acopló a una máquina de ensayos mecánicos mono-columna ZWICK modelo BT1-FR2.5TS.140 con una capacidad máxima de carga de 2,500 N, la cual se puede observar en la Figura 3.5.

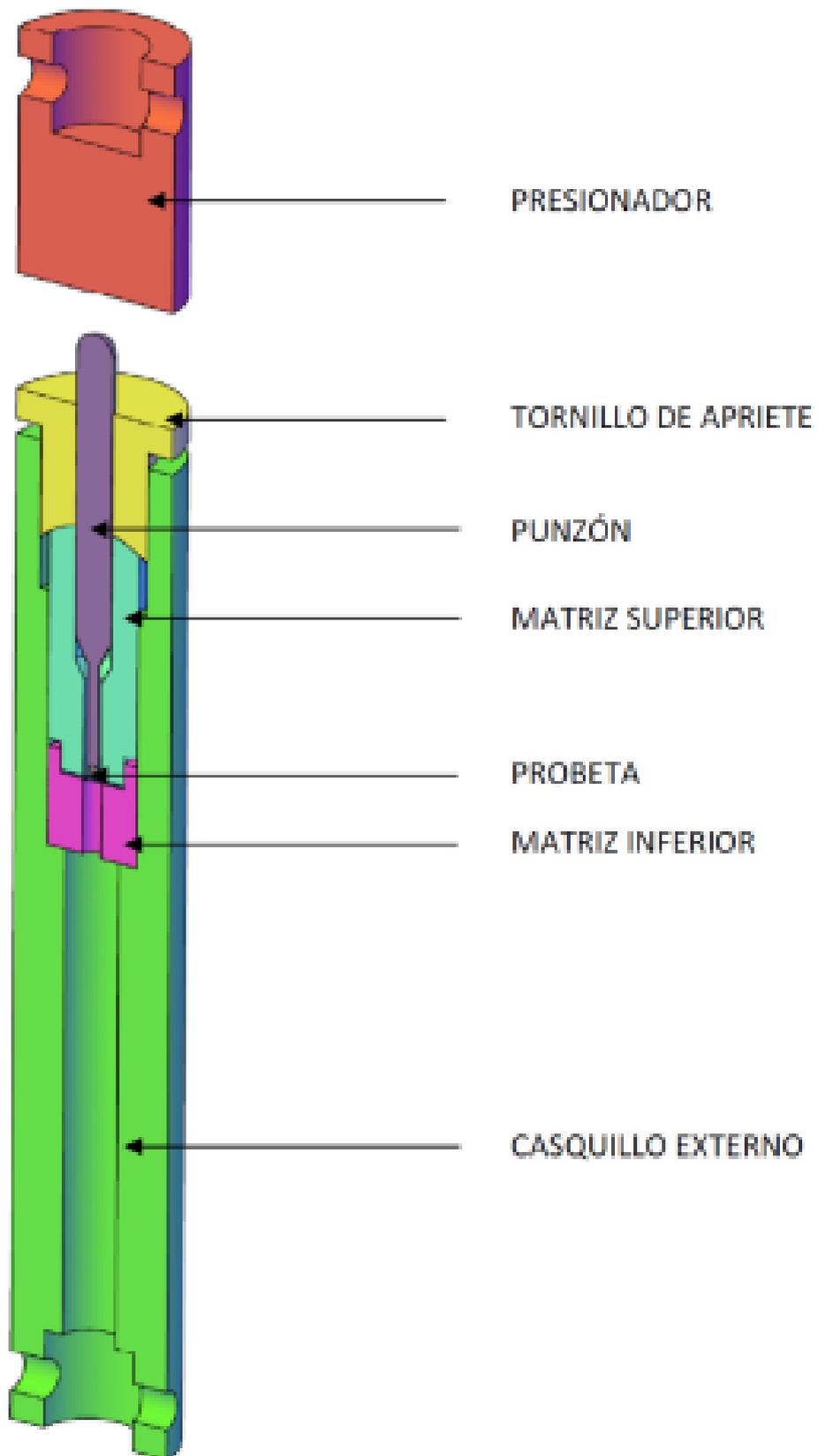


Figura 3.3. Esquema del útil empleado en el ensayo Small Punch [1].



Figura 3.4. Matriz desarrollada para la realización de los ensayos.



Figura 3.5. Utillaje acoplado a la máquina de ensayos ZWICK [1].

3.3.2 Probetas empleadas

Las probetas *Small Punch* recomendadas en el Código Europeo [3] son probetas circulares de 8 mm de diámetro y 0.5 mm de espesor, sin embargo, en este trabajo se han utilizado probetas *Small Punch* cuadradas de 10x10 mm. Esto es debido a que el utillaje utilizado permite que la zona de proceso sea exactamente la mismas para ambas tipologías. Además, las probetas cuadradas 10x10 presentan ventajas a la hora de mecanizarlas, por ejemplo, a partir de probetas Charpy ya ensayadas.

El proceso de preparación de las probetas ha consistido en la realización de las siguientes etapas [2]:

1. Corte mediante cortadora de precisión Secotom 15 (Struers) de piezas de un espesor de 0.55 mm a partir de un prisma de sección cuadrada de 10x10 mm, con caras ya paralelas. Gracias a la refrigeración empleada durante el corte, es posible garantizar que la microestructura de los materiales analizados permanece inalterada.
2. Pulido de la probeta hasta conseguir el espesor deseado de 0.5 ± 0.005 mm, manteniendo las caras de las probetas paralelas y comprobando el espesor de la misma de acuerdo a las recomendaciones de [3] mediante un micrómetro. Se ha alcanzado en todos los casos un acabado final dentro del intervalo establecido, realizando el pulido con refrigeración para evitar alteraciones de la microestructura.

En este trabajo se han elaborado tres tipos de probetas, con el objetivo de estudiar la tenacidad de fractura de una forma más amplia. En primer lugar, probetas *Small punch* de 10x10 mm sin entalla, cuya finalidad es su modelización por medio de elementos finitos. Para su preparación se siguen las etapas anteriormente citadas.

En el caso de las probetas *Small Punch* para obtener la tenacidad a fractura, se realiza un procedimiento similar, con la única diferencia de que en este caso el prisma de 10x10 mm cuenta con una entalla mecanizada mediante electroerosión. Se ha trabajado con probetas a las que se les ha introducido una entalla de diámetro 0.3 mm y con probetas a las cuales se les ha prefisurado por fatiga para obtener un defecto de radio 0. Para poder realizar el prefisurado la probeta debía ser de mayores dimensiones (en el caso de acero un prisma de longitud 10 cm y en el caso de la aleación una probeta CT, tal y como se aprecia en la Figura 3.6), por lo tanto, una vez obtenida la fisura ha sido necesario realizar trabajos de cortado, pulido y de corrección para obtener una probeta *Small Punch* con la fisura centrada.

Las longitudes de probeta estudiadas, objetivo principal del trabajo, han sido cuatro, 4 mm, 4,5 mm, 5 mm y 5,5 mm. Para obtener estas longitudes, en primer lugar se procedió a medir la longitud real de entalla, posteriormente mediante

pulido tanto en la zona entallada como en la no entallada se obtuvo la longitud a estudiar.

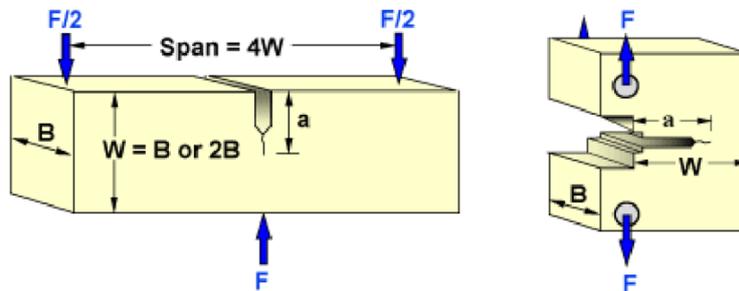


Figura 3.6. Esquema de las probetas empleadas durante la prefisuración en Acero S355 y en Aleación de Magnesio AJ62

3.3.3 Realización de los ensayos

Los ensayos *Small Punch* se han realizado de acuerdo a las recomendaciones del Código Europeo [3]. Los ensayos de velocidad de desplazamiento constante del punzón se han realizado en control de posición, con una velocidad de desplazamiento del cabezal superior de la máquina de 0.5 mm/min, controlando el ensayo en todo momento mediante el software testXpert [32].

En el transcurso del ensayo se registran los valores de desplazamiento, carga y deflexión (LVDT) proporcionados por la propia máquina. Para obtener el valor correspondiente al desplazamiento real del punzón sobre la probeta, se ha calibrado la flexibilidad del utillaje por separado, que ha de ser restada de las curvas que se obtengan directamente por medida del desplazamiento del cabezal [2].

Para poder realizar el tratamiento de datos ha sido necesario medir la flexibilidad del utillaje, para ello se han realizado cuatro ensayos en una probeta de 4 mm de espesor con uno de los materiales de estudio. En el ensayo se deforma la probeta plásticamente, obteniendo curvas coincidentes entre sí para cada uno de los ensayos como se aprecia en la Figura 3.7. De estas curvas se obtiene la flexibilidad como media de las cuatro pendientes. El valor obtenido tras los ensayos es: 2,93E-04 mm/N

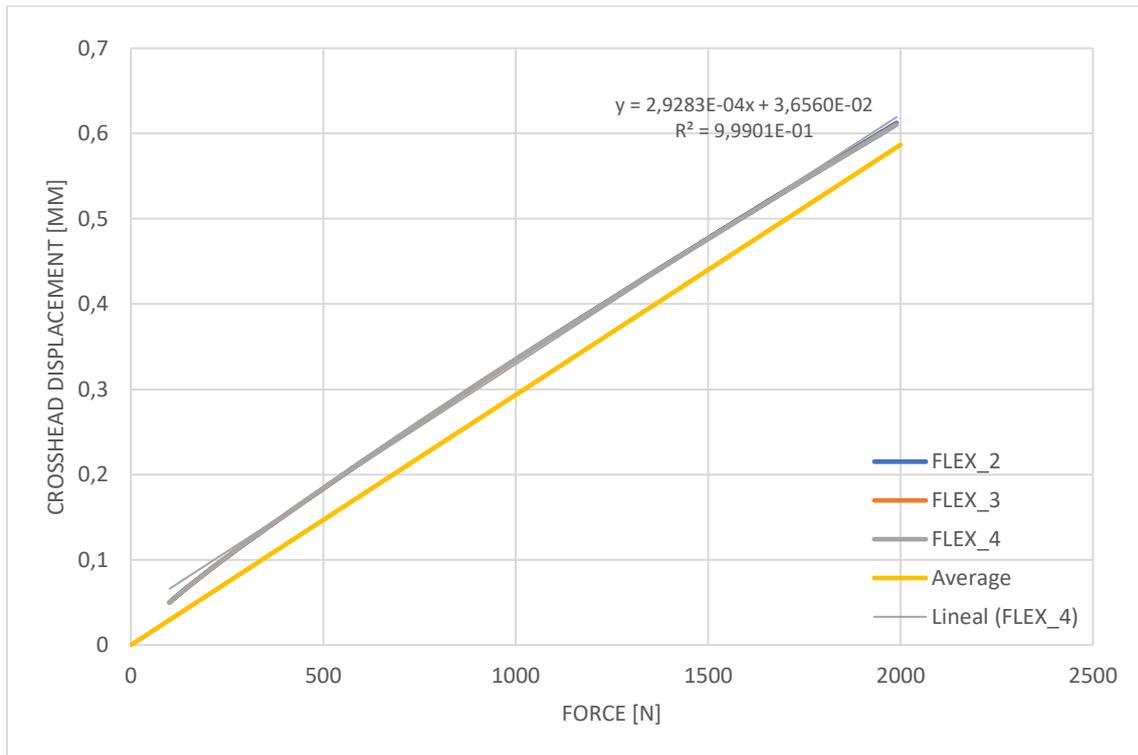


Figura 3.7. Curvas correspondientes a la obtención de la Flexibilidad del Utillaje.

3.3.4 Tratamiento de Datos

Durante el ensayo se obtienen los datos correspondientes al desplazamiento del punzón, deflexión de la probeta y la fuerza ejercida durante el ensayo. De la máquina de ensayos obtenemos hasta dos mil puntos que permiten conformar con gran precisión las curvas Fuerza-Desplazamiento del ensayo.

Los datos obtenidos en el ensayo nos permiten obtener el punto de iniciación de la propagación de fisura y aplicar la teoría de mecánica de fractura, vista en el capítulo 2.

3.4. MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS

En este trabajo se han realizado simulaciones por medio de elementos finitos del ensayo *Small Punch* en condiciones de velocidad constante de desplazamiento del punzón como en carga constante. Las simulaciones permiten conocer mejor desde un punto de vista tenso-deformacional el comportamiento de las probetas durante las pruebas, y simular diferentes condiciones de ensayo sin la necesidad de realizar los ensayos [2].

Con los datos obtenidos en la simulación de diferentes longitudes de defecto se ha podido obtener los parámetros geométricos que permiten relacionar la



longitud de la entalla con el enromamiento (CTOD). Esta relación es puramente geométrica y no depende de las características del material, es por ello que se ha realizado únicamente la simulación con los parámetros del acero S355-J2, valiendo los resultados para la aleación de magnesio AJ62.

La simulación por medio de elementos finitos se basa en la realización de un modelo numérico, que aplicándole los principios de simetría permite simular el ensayo realizado en laboratorio, tal y como se muestra en la Figura 3.8. Para la creación del modelo numérico se ha modelado en 3D la geometría del ensayo y posteriormente se ha introducido el modelo en el programa para su simulación, creándose la malla de elementos finitos. El programa utilizado para ambas funciones es el software ANSYS.

La geometría empleada en el modelo ha sido la mencionada en el apartado 3.3.1 y las propiedades de los materiales han sido obtenidos mediante ensayos convencionales, ya mencionados en el apartado 3.2. Las simulaciones han empleado como inputs las propiedades elásticas (módulo de elasticidad) y las propiedades plásticas (ajuste de Ramberg-Osgood).

Para simular las superficies de contacto, se han empleado contactos con fricción, que han permitido analizar los diferentes coeficientes de fricción durante los ensayos, empleando un valor de 0.21 para los ensayos de velocidad de desplazamiento constante del punzón y entre 0 y 0.5 para los ensayos de carga constante [2]. Éstos han sido calibrados con los resultados obtenidos experimentalmente, empleando como criterio la obtención de la misma velocidad mínima de desplazamiento del punzón.

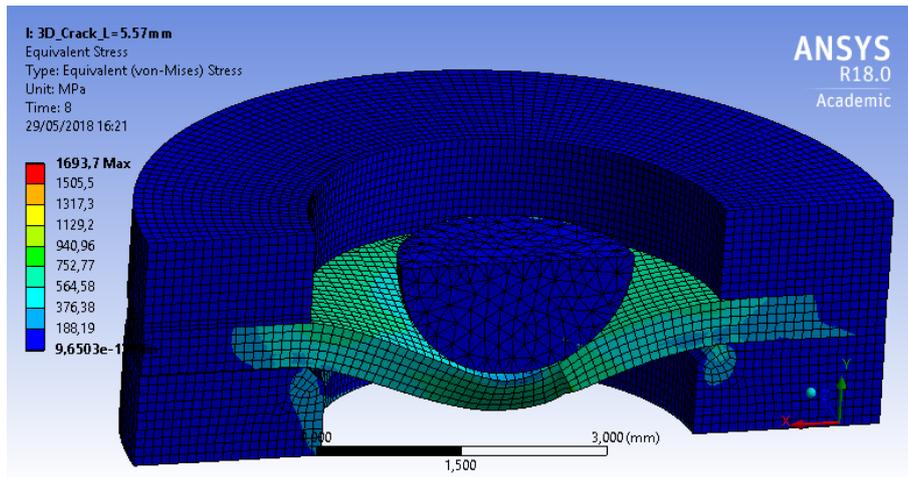


Figura 3.8. Muestra en alzado de la Simulación del ensayo Small Punch mediante elementos finitos.

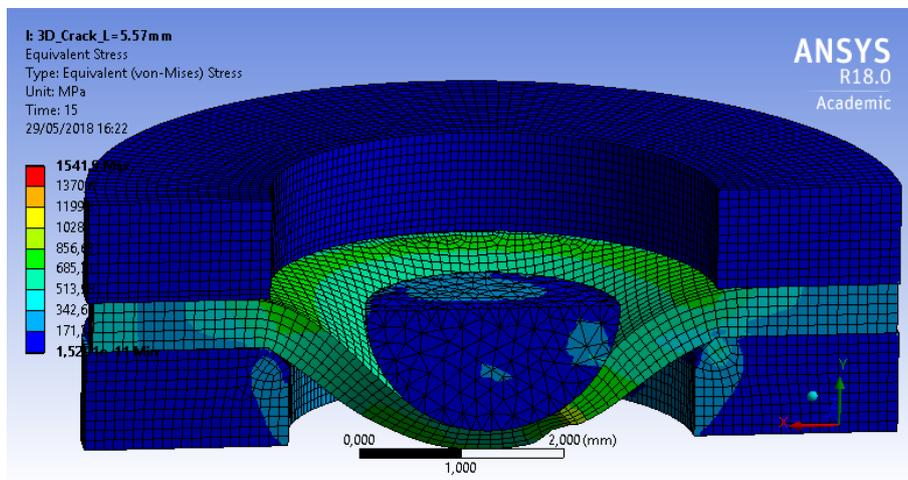


Figura 3.9. Muestra en alzado de la Simulación del ensayo Small Punch mediante elementos finitos en el momento del colapso.

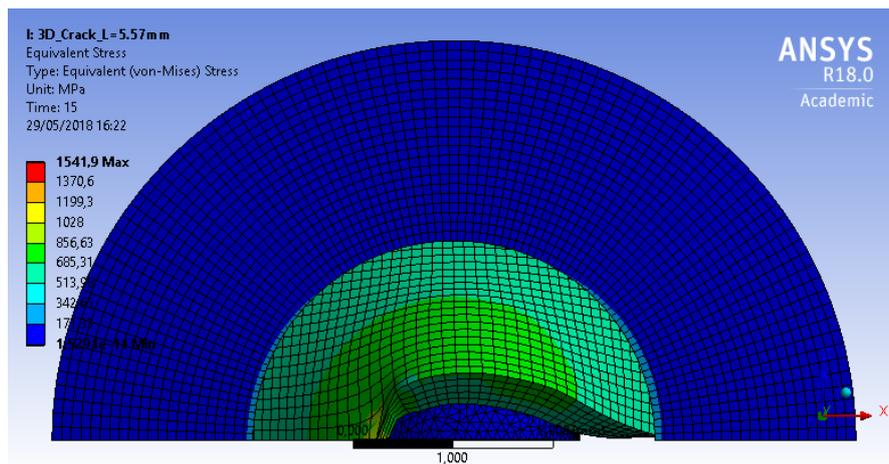


Figura 3.10. Vista inferior Simulación del ensayo Small Punch mediante elementos finitos.



CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 INTRODUCCIÓN

Una vez realizados los ensayos en laboratorio y el tratamiento de datos, en este capítulo se procede al análisis de los resultados obtenidos. Para un análisis con mayor claridad se plantean los resultados de los dos materiales utilizados (Acero S355J2 y Aleación AJ62) por separado, llegando a una conclusión final comparando ambos materiales.

El objetivo último es estudiar la obtención de la tenacidad a fractura con las diferentes longitudes de entalla analizadas, de tal forma que sea posible realizar una caracterización alternativa a los ensayos convencionales. Es por ello, que se ha comparado el valor de tenacidad a fractura obtenido en el ensayo *Small Punch*, con los valores reales, permitiendo estudiar con mayor detalle la fiabilidad del ensayo *Small Punch* en el estudio de tenacidad.

Las estimaciones de tenacidad a fractura del acero S355J2 han sido realizadas de acuerdo a la metodología basada en el concepto de CTOD [10, 33]. Aplicando esta metodología, ha sido posible relacionar el grado de enromamiento de la entalla en el momento de la iniciación con la tenacidad a fractura del material [33].

Como se ha expresado en el capítulo 3, se han estudiado dos tipos de defectos, entalla de radio 0,15 mm y una fisura de radio 0, en cada una de ellas se ha estudiado 4 longitudes diferentes, 4 - 4,5 - 5 - 5,5 mm.

La longitud de entalla estudiada, conseguida a través del pulido, busca acercarse lo máximo posible a las longitudes estándar (4- 4,5...). Por otro lado, la longitud de entalla real estudiada, se calcula en base a la geometría de la probeta tras el ensayo como:

$$L_{real} = 5 + [(x_3 + 0.5 \cdot x_2) - (0.5 \cdot (l_1 + l_2) - L_{estudiada})]$$

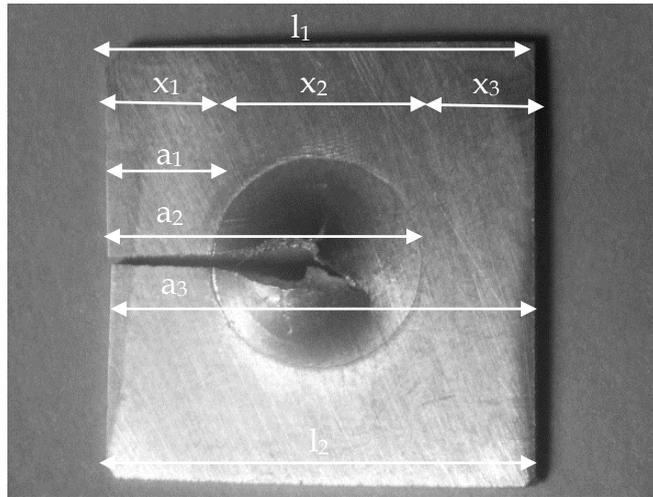
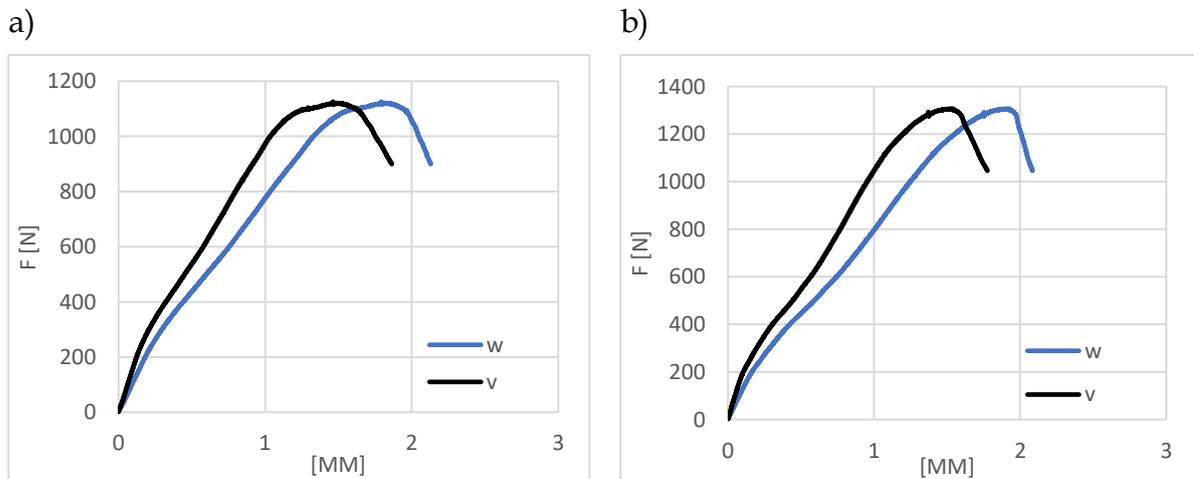


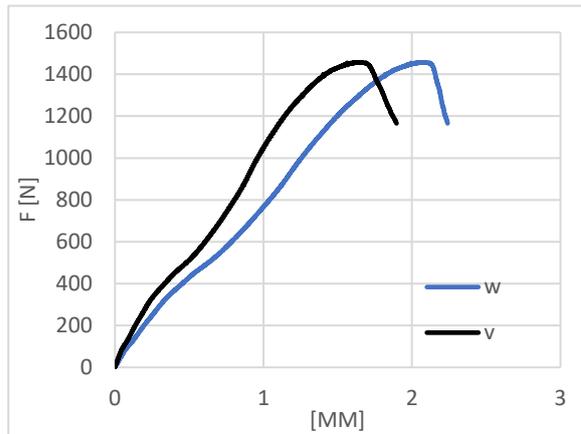
Figura 4.1 Parámetros de medida en las Probetas Ensayadas

4.2 RESULTADOS OBTENIDOS ACERO S355J2

Tras la realización de los ensayos *Small Punch*, se han obtenido las curvas mostradas en la Figura 4.2 y Figura 4.3. La curva *v* corresponde a la relación Fuerza-Desplazamiento en la probeta y la curva *w* corresponde al desplazamiento del cabezal.



c)



d)

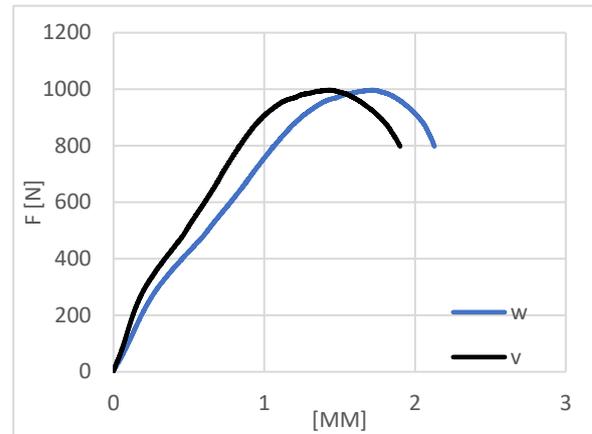
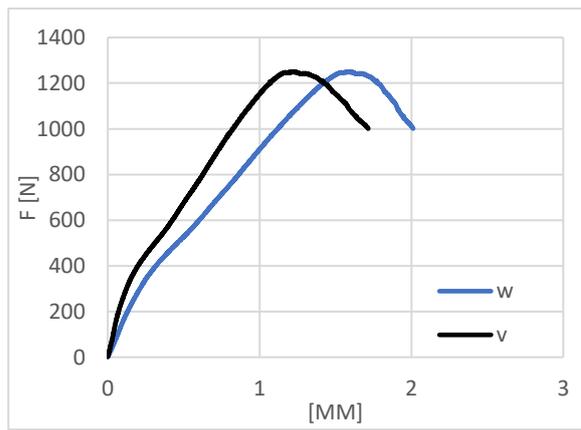
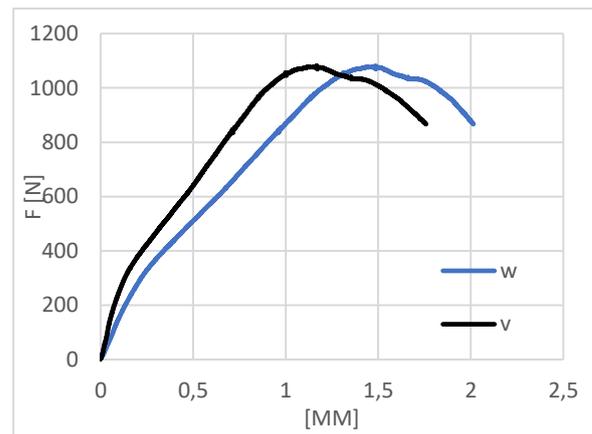


Figura 4.2. Resultado del ensayo Small Punch en Probetas con ENTALLA a) $Lo=4,96$ mm b) $Lo= 4,53$ mm c) $Lo= 4,03$ mm
d) $Lo= 5,5$ mm

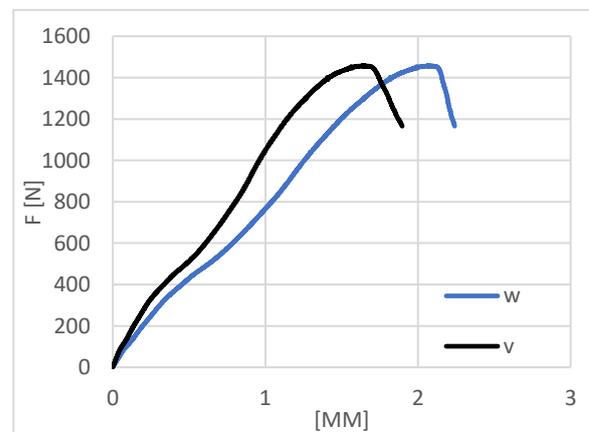
a)



b)



c)



d)

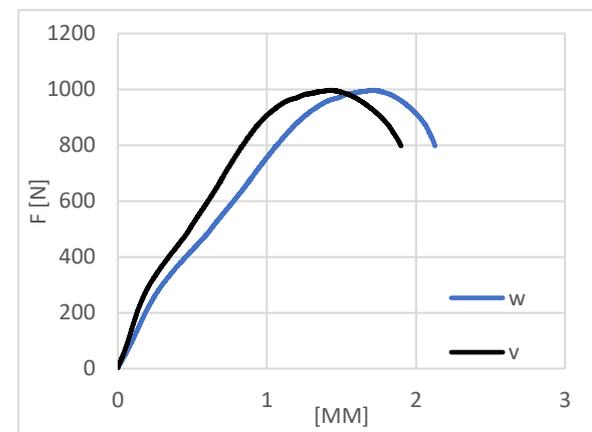


Figura 4.3. Resultado del ensayo Small Punch en Probetas con FISURA a) $Lo=4,49$ mm b) $Lo= 4,99$ mm c) $Lo= 4,01$ mm
d) $Lo= 5,45$ mm

Se puede apreciar una caída brusca correspondiente al punto de generación de la fisura propagada en la mayoría de las gráficas anteriores. Sin embargo, se observa en las gráficas correspondientes a la entalla y fisura 5,5 que no se aprecia una caída brusca y por tanto no ha habido una propagación de fisura. Es por ello que no se puede aplicar la teoría de la mecánica de fractura en ellas, impidiendo la obtención de la tenacidad a fractura.

En la Figura 4.4, correspondiente a la curva Fuerza-Desplazamiento del punzón, se observa de una forma clara la influencia de la geometría de la entalla, apreciándose de forma clara los diferentes radios de entalla. Los mayores niveles de fuerza se han obtenido en general para un mismo desplazamiento cuanto menor es el radio de la entalla aplicada. Por otro lado, también se observa que la fuerza máxima alcanzada es dependiente de la longitud de la entalla, siendo mayor cuanto menor es la longitud de la entalla aplicada [33].

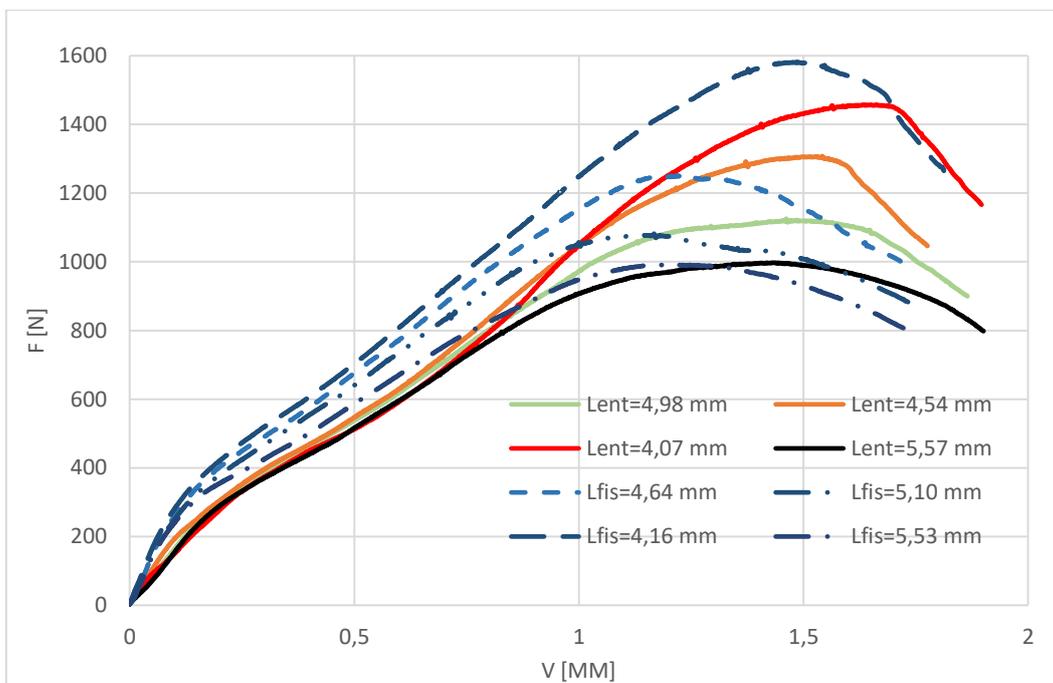


Figura 4.4. Curvas Fuerza-Desplazamiento del punzón obtenidas en los ensayos.

Estos efectos se estiman que se deben a la presencia de mayor o menor cantidad de material en la zona de proceso del ensayo. Es decir, se han alcanzado mayores valores de fuerza cuanto mayor es la cantidad de material disponible en la zona sometida a esfuerzos. Por tanto, como conclusión, se obtienen mayores valores cuanto menor es el radio y menor es la longitud de la entalla.



A continuación, se han comparado los resultados obtenidos en el tratamiento de datos de la totalidad de las probetas, obteniendo las siguientes gráficas:

Estudiando la relación de los parámetros obtenidos, en la Figura 4.5 se puede observar como la geometría de la entalla tiene influencia en el desplazamiento del punzón correspondiente a la iniciación de la fisura, d_i . El punto de iniciación de fisura se produce en el quiebro de la curva Fuerza-Desplazamiento del punzón, que habitualmente se encuentra muy próximo tras haber alcanzado el punto máximo. Para este material se ha adoptado el punto exacto de iniciación de fisura (zona de quiebro en la curva Fuerza-Desplazamiento). Como simplificación se puede adoptar como punto de iniciación el punto máximo de la curva.

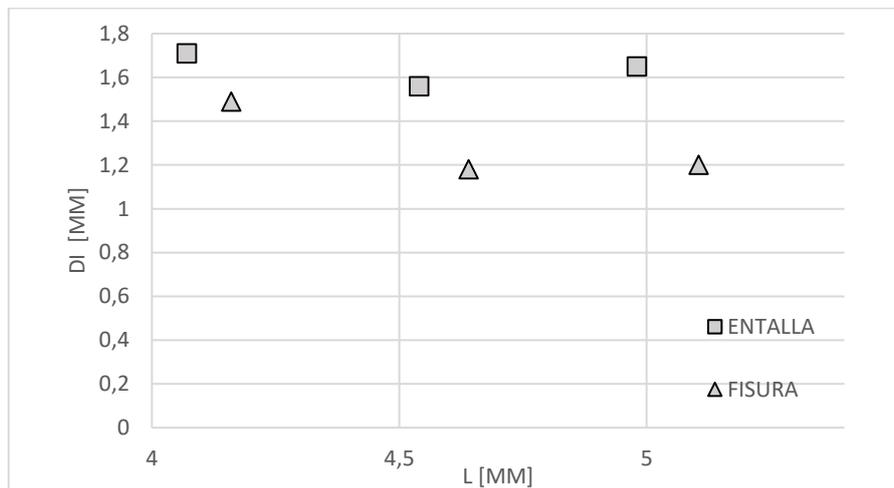


Figura 4.5. Relación entre el desplazamiento del punzón en el que se produce la iniciación de la fisura y la longitud del defecto aplicado, en función del radio del mismo (0 ó 0.15 mm).

Aplicando este método, se muestran los desplazamientos correspondientes a la iniciación de la fisura en función de la longitud del defecto. Se observa una ligera tendencia a valores menores de d_i cuanto mayor es la longitud del defecto, presentándose las mayores diferencias para aquellas probetas con menores longitudes de defecto [33].

En la Figura 4.6, se puede observar la existencia de una relación lineal entre la fuerza máxima alcanzada durante el ensayo y la longitud del defecto analizado, independientemente del radio (fisura o entalla).

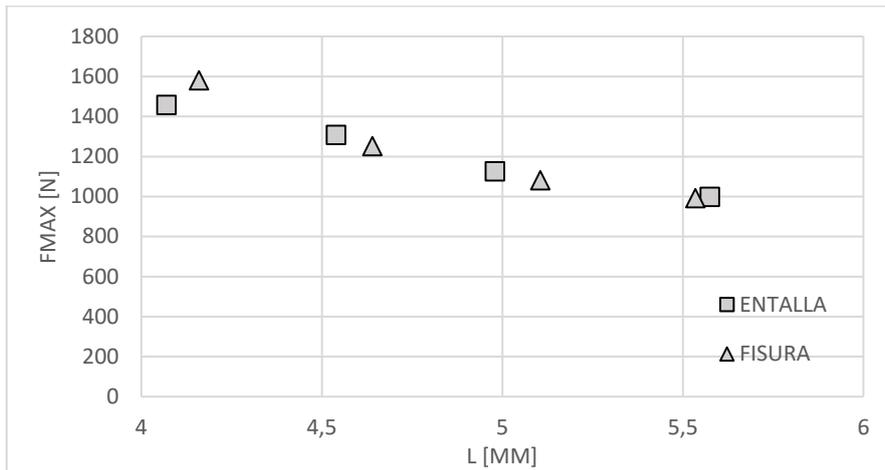


Figura 4.6. Fuerza máxima alcanzada durante los ensayos en función de la longitud del defecto empleado, tanto para radio 0 mm (fisura), como para radio 0.15 mm (entalla).

Se obtienen mayores valores de fuerza cuanto menor es la longitud del defecto. Este efecto puede ser debido a la combinación de dos efectos: la aparición de una fisura en el fondo de la entalla tras el enromamiento, junto con una rotura posterior de la probeta sin efecto de la entalla. Es decir, se observa como la fisura tiende a tomar la rotura convencional de las probetas SP sin entalla, en forma de media luna [33]. Este efecto se puede apreciar en las fractografías de las probetas ensayadas:

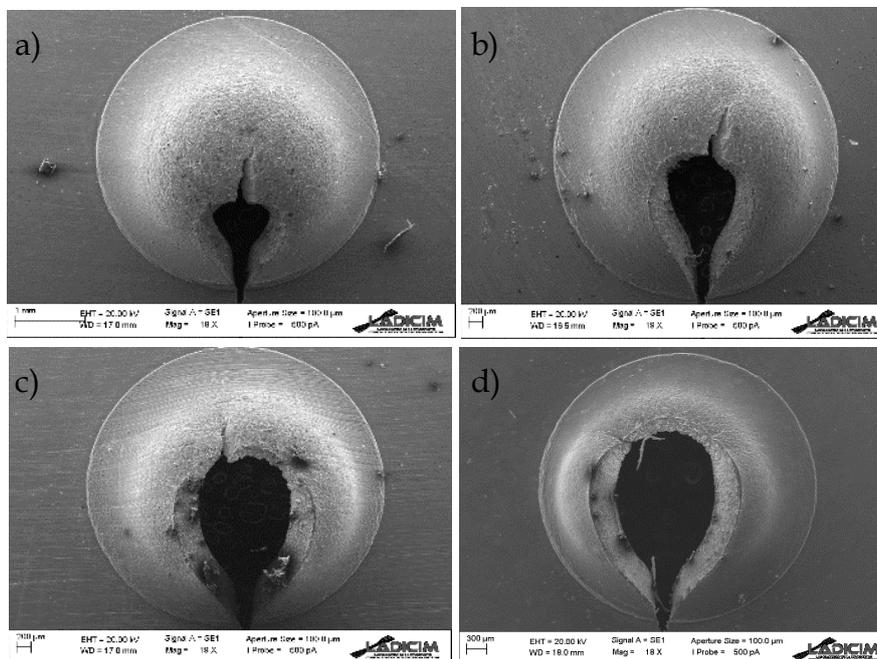


Figura 4.7. Fractografías de las probetas ensayadas: a) Entalla de longitud 4.07 mm, b) Entalla de longitud 4.54 mm,, c)) Entalla de longitud 4.98 mm, d) Entalla de longitud 5,50 mm.

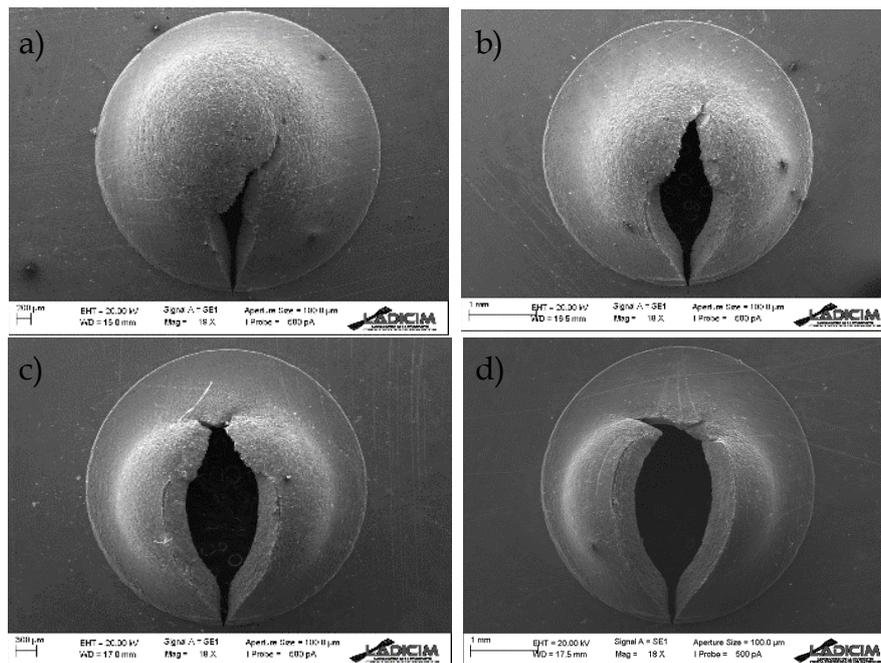


Figura 4.8. Fractografías de las probetas ensayadas: a) Fisura de longitud 4,16 mm, b) Fisura de longitud 4,64 mm, c) Fisura de longitud 5,10 mm, d) Fisura de longitud 5,50 mm.

En el análisis fractográfico de las probetas, se ha comprobado que no se produce un cambio en los micromecanismos de fractura debido a la geometría de la entalla. En las Figura 4.7 y Figura 4.8 se pueden observar las probetas analizadas, destacando la propagación de una fisura a partir de la entalla en todos los ensayos, excepto en los correspondientes a longitud de fisura y entalla de 5,5 mm. Además, se aprecia un mayor grado de enronamiento de la entalla en función de la geometría de la misma, tanto para las entallas de radio 0,15 mm como para las fisuras, siendo mayor cuanto mayor es la longitud de la entalla.

Mediante la aplicación del método propuesto en el capítulo 2, se ha obtenido el CTOD, δ_{SPI} , correspondiente a probetas donde se ha producido propagación de fisura, tanto probetas con entalla, como con fisura. Los resultados obtenidos se encuentran en la Figura 4.9. Se comprueba que, para las mayores longitudes de entalla y fisura, se obtienen mayores valores de CTOD. A diferencia de las anteriores relaciones, en esta ocasión hay cierta diferencia entre las probetas con entalla y las probetas con fisura, obteniendo mayores valores de CTOD para la misma longitud de defecto en probetas con entalla. Esta diferencia es más evidente cuanto mayor es la longitud del defecto.

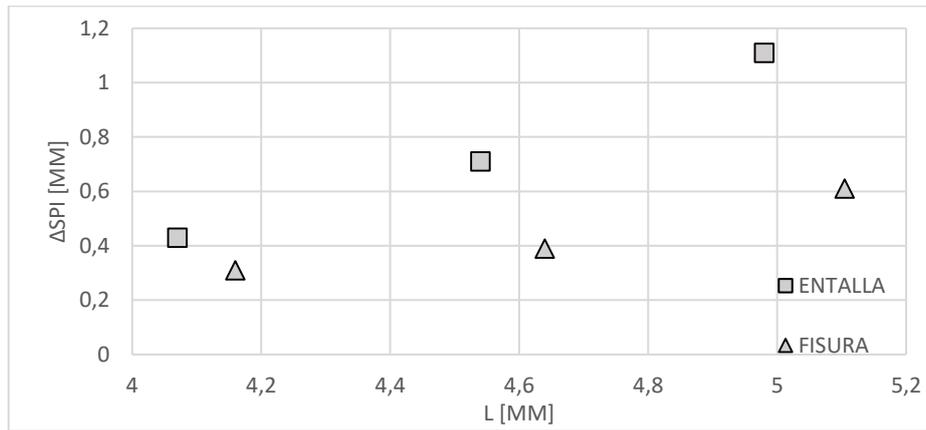


Figura 4.9. Relación entre el valor δ_{SPi} y la longitud del defecto aplicado (radio 0,15 mm y radio 0).

A partir de los resultados de CTOD obtenidos en el momento de iniciación, y aplicando las ecuaciones vistas en el capítulo 2, es posible obtener las estimaciones de tenacidad a fractura, que se muestran en la Figura 4.10. De forma similar se aprecia la tendencia seguida en la Figura 4.9, a mayores valores de CTOD, mayores valores de tenacidad a fractura, es decir, a mayor longitud de defecto, mayor es la tenacidad a fractura estimada. Se mantiene, además, que el valor de la tenacidad a fractura es mayor a misma longitud de defecto en las probetas con entalla.

$$J_{ic} = \frac{\delta_{SPi} \cdot \sigma_Y}{d_n} \quad (4.1)$$

$$K_{jic} = \sqrt{\frac{E \cdot J_{ic}}{1 - \nu^2}} \quad (4.2)$$

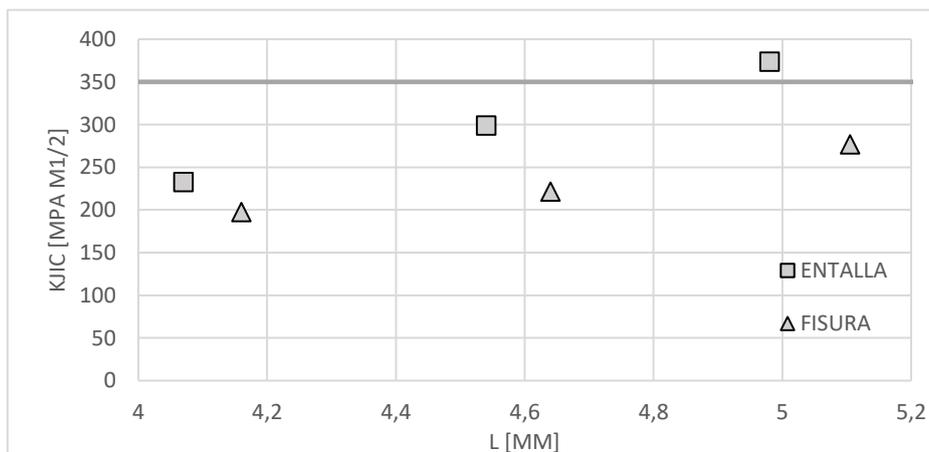


Figura 4.10. Relación entre la estimación de la tenacidad a fractura mediante ensayos SP y la longitud del defecto aplicado (radio 0,15 mm y radio 0).



Para estudiar la efectividad del ensayo se han comparado las estimaciones obtenidas con el valor obtenido mediante ensayos convencionales, y se han calculado los coeficientes de seguridad de las estimaciones, que se muestran en la Figura 4.11. Se observa que a menor longitud de entalla se obtiene valores mayores de tenacidad, acercándose más al valor real con valores de 4,5 o 5 mm de longitud de defecto. Además, se aprecia que los valores pertenecientes a las probetas con fisura tienen un valor superior de coeficiente de seguridad, esto es debido fundamentalmente al efecto entalla que se produce en la probeta. El valor del CTOD se ha estimado muy próximo al valor máximo de la curva Carga-Desplazamiento, que ofrece siempre valores más conservadores.

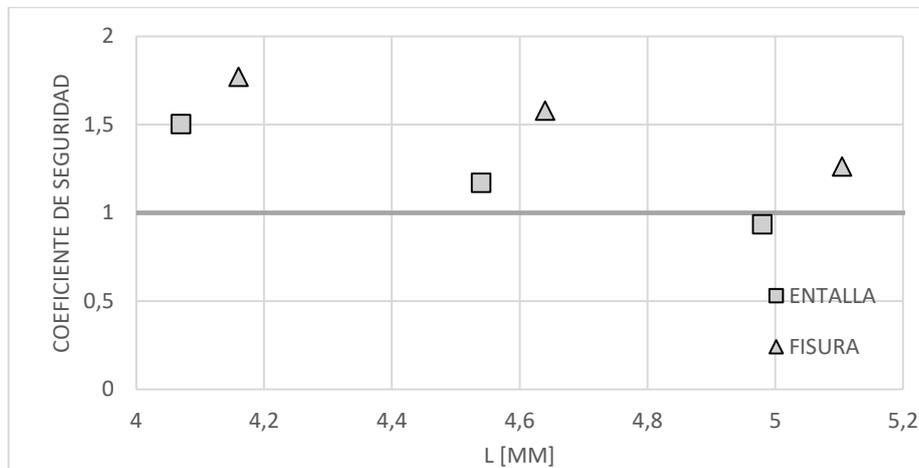


Figura 4.11. Relación entre el coeficiente de seguridad de las estimaciones y la longitud del defecto aplicado (radio 0,15 mm y radio 0).

Como se puede observar todos los valores se encuentran por el lado de la seguridad, estando muy próximos al valor real, se aprecia, por tanto, la idoneidad del método, obteniendo estimaciones por el lado de la seguridad, con valores en torno a un 25% inferiores a los obtenidos mediante métodos convencionales.

4.3 RESULTADOS OBTENIDOS ALEACIÓN DE MAGNESIO AJ62

Para este material se ha seguido el mismo procedimiento que en el acero S355-J2. La diferencia entre ambos materiales radica en su fragilidad, siendo la aleación de magnesio AJ62 un material muy frágil y el acero S355-J2 un material mucho más dúctil. La fragilidad del magnesio ha quedado patente a lo largo de todo el procedimiento, marcando cada resultado obtenido.

Se han realizado un total de ocho ensayos, cuatro ensayos con un defecto tipo entalla y el resto con defecto tipo fisura, en ambos casos con diferentes longitudes de defecto (4- 4,5 - 5 - 5,5 mm). En todos ellos la rotura producida en la probeta ha sido igual, independientemente del defecto introducido, tal y como se aprecia en las Figura 4.12 y Figura 4.13. Es por ello que, no se puede asegurar de forma certera que se haya producido la propagación de una fisura que nos permita determinar los valores de tenacidad a fractura a través del ensayo *Small Punch*.

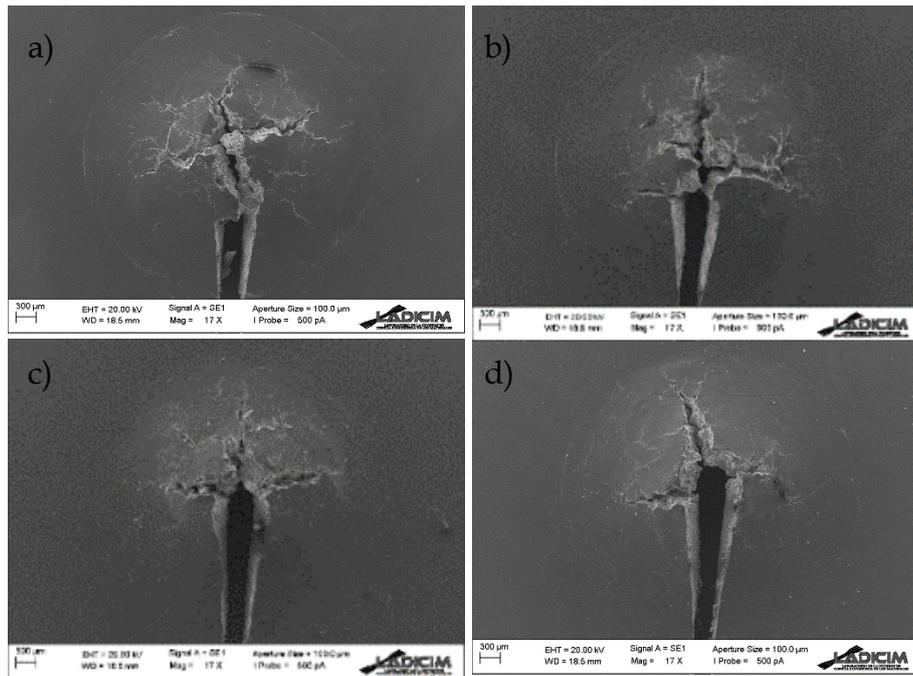


Figura 4.12. Fractografía de las probetas ensayadas: a) Entalla de longitud 4,07 mm, b) Entalla de longitud 4,53 mm, c) Entalla de longitud 4,97 mm, d) Entalla de Longitud 5,5 mm.

En la Figura 4.12 se observa la fractografía de las probetas *Small Punch* con entalla ya ensayadas. En la imagen a) y b) se observa de una forma clara que la rotura se produce fuera de la zona de influencia de la entalla, siendo la forma de la rotura en estrella, la habitual de este material. Esto nos indica que las probetas con entalla de 4,07 mm y con entalla 4,53 mm colapsan antes por fragilidad del material que por la existencia de un defecto.

En el caso de las imágenes c) y d) la entalla si ha alcanzado la rotura, que al igual que en las anteriores, sigue siendo en forma de estrella. Sin embargo, debido a su forma, no se puede asegurar que se haya producido una propagación de fisura debida a la entalla.

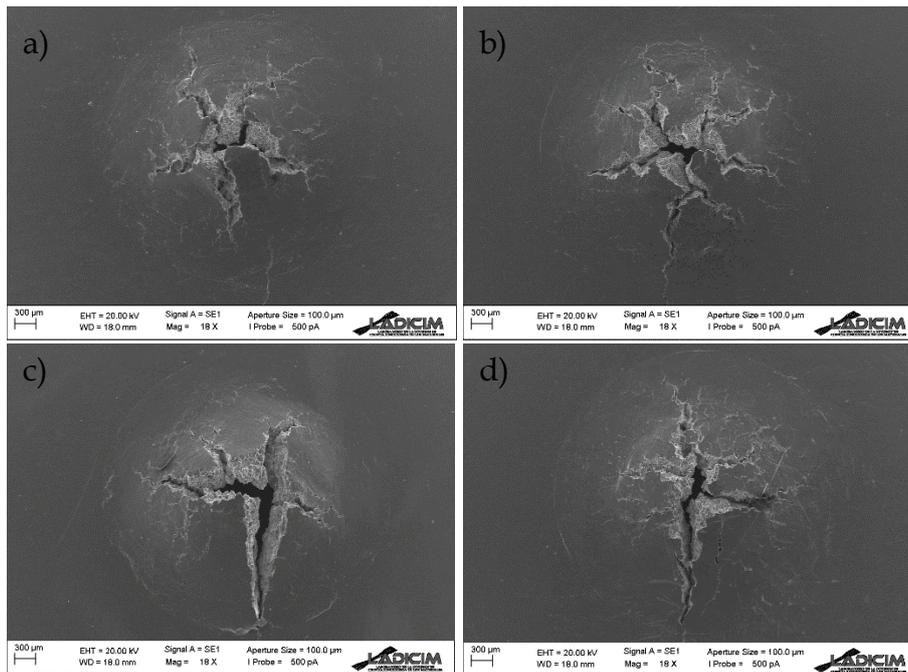
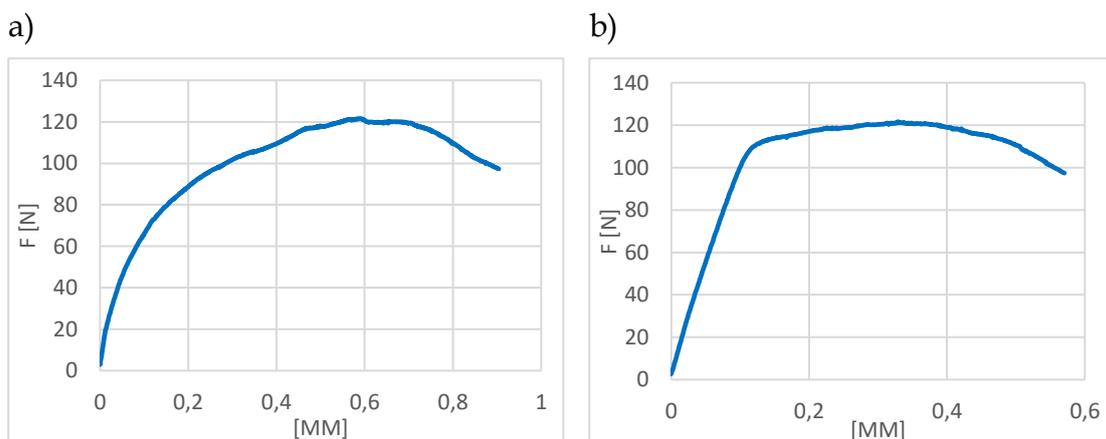


Figura 4.13. Fractografía de las probetas ensayadas: a) Fisura de longitud 4,03 mm, b) Fisura de longitud 4,56 mm, c) Fisura de longitud 5 mm, d) Fisura de longitud 5,53 mm.

En la Figura 4.13 se observa la fractografía de las probetas *Small Punch* con fisura ya ensayadas. Se observa claramente en las cuatro imágenes que no ha habido influencia del defecto aplicado en la rotura, siendo esta en forma de estrella y sin producirse una propagación clara de fisura.

Tras la realización de los ensayos se han obtenido las siguientes curvas Carga-Desplazamiento:



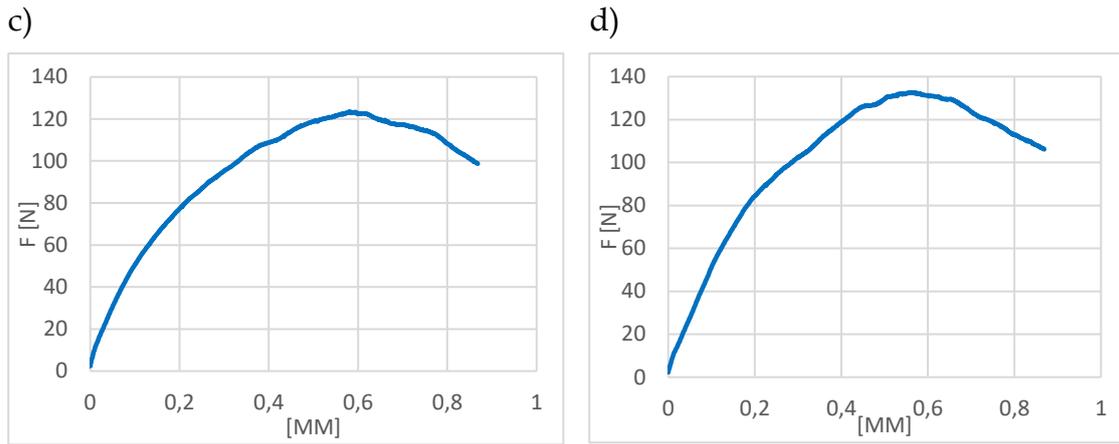


Figura 4.14. Resultado del ensayo Small Punch en Probetas con entalla a) $L_0 = 4,07$ mm b) $L_0 = 4,53$ mm c) $L_0 = 4,97$ mm d) $L_0 = 5,5$ mm

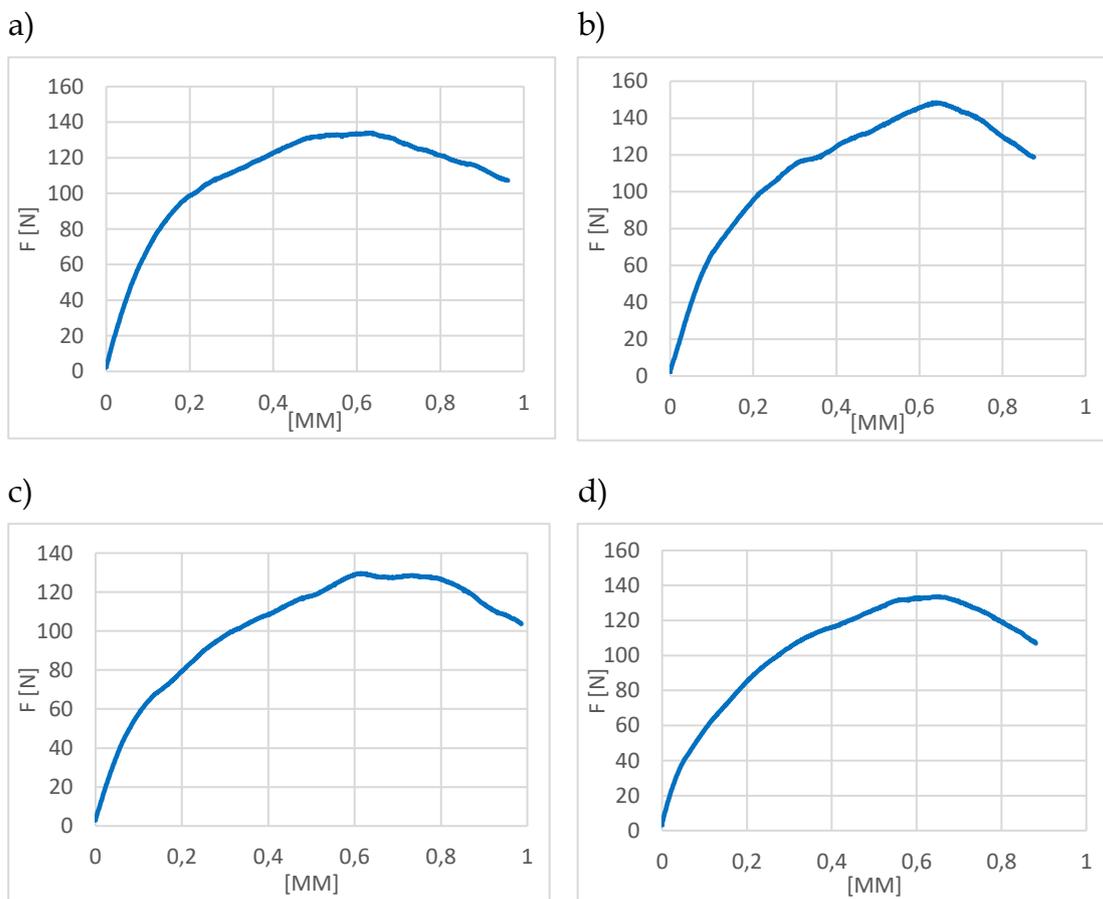


Figura 4.15. Resultado del ensayo Small Punch en Probetas con fisura a) $L_0 = 4,03$ mm b) $L_0 = 4,56$ mm c) $L_0 = 5$ mm d) $L_0 = 5,53$ mm

Como se puede apreciar en las gráficas de la Figura 4.14 y Figura 4.15 no hay una caída brusca que haga indicar que se ha producido una propagación de fisura, como en el caso del acero, sino que hay una vibración constante de la curva Fuerza-Desplazamiento. Esto es debido a que al tratarse de un material muy



frágil su rotura habitual es en forma de estrella, generando fisuras en distintas direcciones, produciendo en la curva distorsiones por cada fisura generada.

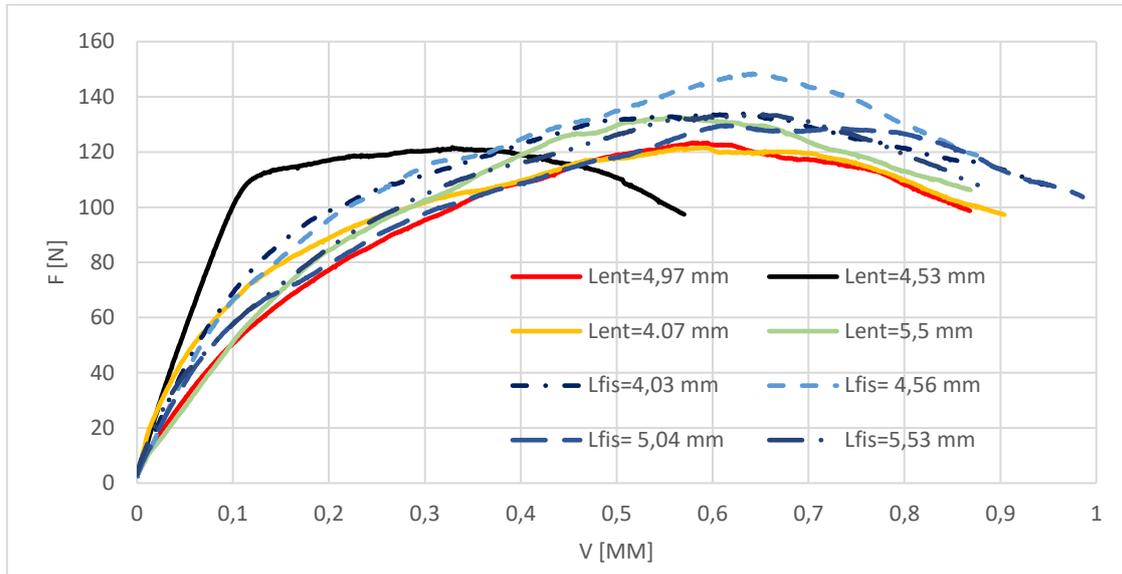


Figura 4.16. Curvas Fuerza-Desplazamiento del punzón obtenidas en los ensayos en probetas A]62.

En la Figura 4.16 no se aprecia una diferencia clara entre los ensayos realizados en probetas con fisura y los ensayos realizados en probetas con entalla. Sin embargo, si se puede apreciar que para una misma longitud de entalla las probetas con fisura admiten mayor fuerza máxima en el ensayo.

El ensayo E5 correspondiente a longitud 4,53 mm no sigue la misma trayectoria, esto es debido a un fallo de toma de medidas durante el ensayo y por tanto es descartado del estudio. Independientemente, en la rotura de la probeta no se observa propagación de fisura.

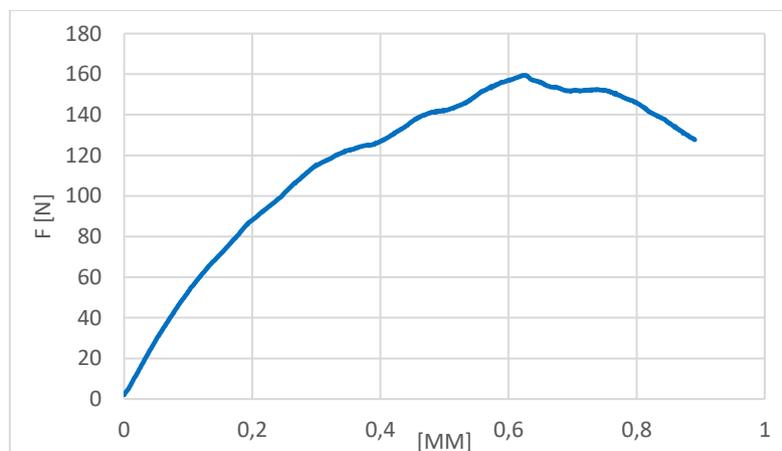


Figura 4.17. Curva Fuerza-Desplazamiento probeta SP sin entalla.

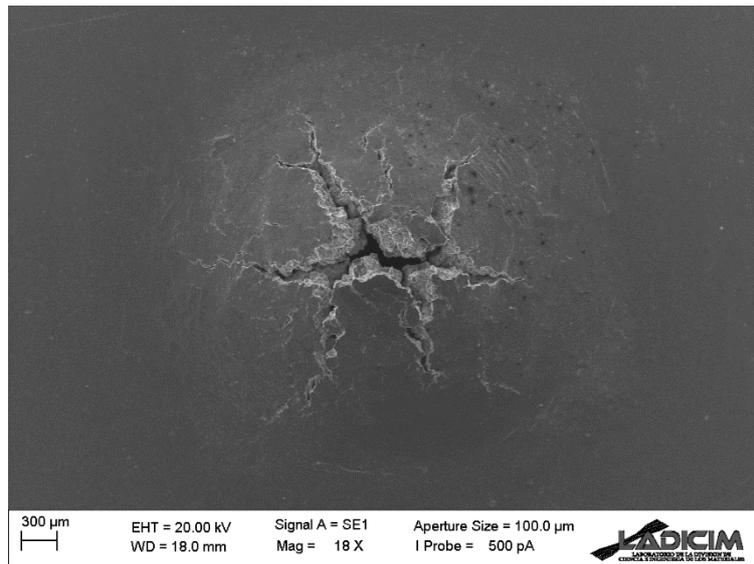


Figura 4.18. Fractografía de la probeta SP sin defecto.

Con el objetivo de mostrar los quiebros que se generan en la curva en este material al romperse independientemente de la existencia de un defecto, se muestran en la Figura 4.17 la curva Fuerza-Desplazamiento y en la Figura 4.18 la fractografía correspondiente a una probeta sin defecto. Como se puede observar hay continuos cambios bruscos de la curva al igual que ocurre en las probetas a las que se les ha introducido un defecto. Es por ello que no se puede asegurar que en la probeta haya existido una iniciación de fisura y por tanto no se puede obtener valores de tenacidad a fractura.

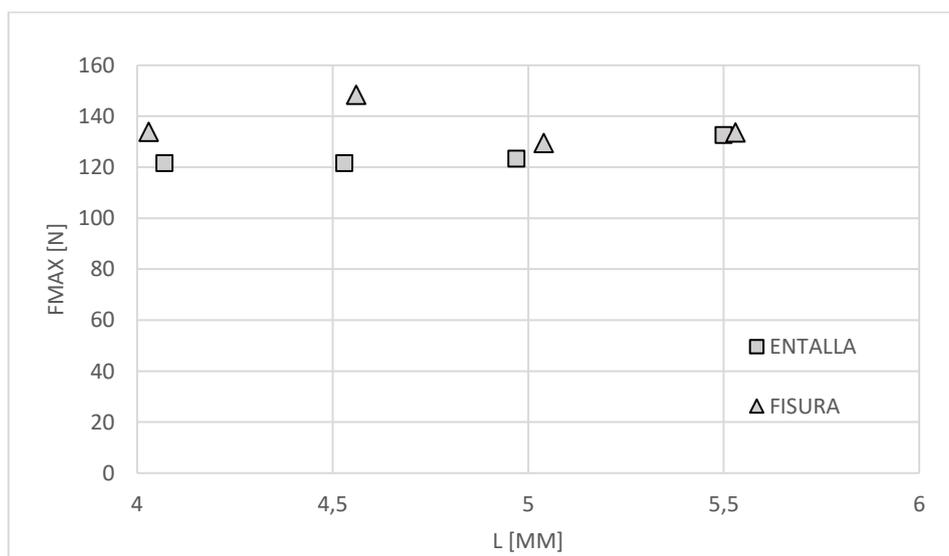


Figura 4.19. Fuerza máxima alcanzada durante los ensayos en función de la longitud del defecto empleado, tanto para radio 0 mm (fisura), como para radio 0.15 mm (entalla).

En la Figura 4.19 se muestran las fuerzas máximas alcanzadas en los ensayos para cada longitud de defecto ensayado. Aunque no hay una tendencia clara, se puede



observar que para mayor longitud de entalla hay un ligero aumento de la fuerza alcanzada durante el ensayo. Los valores obtenidos en las probetas con fisura no tienen una tendencia clara, sin embargo, se han obtenido valores mayores para una misma longitud de defecto que los obtenidos en las probetas con entalla.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se ha analizado la influencia de la geometría de entalla en las estimaciones de tenacidad a fractura en dos materiales con características opuestas, con el objetivo de alcanzar mayor rango de posibilidades. Se han analizado un acero estructural S355J2 y una aleación de magnesio AJ62.

Una vez analizados los resultados obtenidos, se destacan dos conclusiones principales, en primer lugar, tras analizar el efecto generado por diferentes radios de defecto, 0,15 mm y de radio cero, se detecta que el efecto entalla juega un papel muy remarcable. Como se ha visto en las gráficas presentadas en el capítulo 4, para una misma longitud de defecto, se obtienen de forma general una diferencia de resultados entre las probetas con fisura y con entalla. Los valores de tenacidad a fractura en el caso de probetas con fisura como defecto son alrededor de un 25% menores que los valores obtenidos en las probetas con entalla de radio 0,15 mm.

En segundo lugar, se debe destacar como conclusión el efecto que han tenido las diferentes longitudes de defectos aplicadas, siendo este el objetivo último de este trabajo. A continuación, se analiza la longitud óptima para cada material estudiado.

Se ha comprobado que el ensayo *Small Punch* para el acero S355-J2 ofrece resultados por el lado de la seguridad, independientemente de la geometría de entalla empleado. En el caso de probetas con entalla de radio 0,15 mm se obtienen coeficientes de seguridad más cercanos a la unidad, siendo los más idóneos los correspondientes a la longitud de entalla 4,5 y 5 mm, con coeficientes de seguridad 1,17 y 0,94 respectivamente.

En el caso de probetas de acero S355J2 con fisura de radio cero la tendencia se mantiene. Se han obtenido valores más cercanos a la unidad en longitudes de fisura 4,5 mm y 5 mm, con coeficientes de seguridad 1,57 y 1,26 respectivamente.

Se comprueba además en ambos casos que, para longitudes de entalla mayores a 5 mm se pierde idoneidad del ensayo, en las probetas de entalla 5,5 mm no se produce una propagación de fisura y por tanto no se pueden obtener valores de tenacidad a fractura.



Con los resultados obtenidos se confirma la idoneidad y adecuación del método para su aplicación en evaluaciones de estructuras reales en presencia de fisuras y entallas de acero S355-J2, asegurando que en dichas evaluaciones se contará con un determinado coeficiente de seguridad. El ensayo *Small Punch* se presenta, por tanto, como una herramienta fiable para la caracterización local de componentes en servicio, presentando las ventajas de sencillez, económico y con la necesidad de reducidos volúmenes de material. Ventajas difícilmente abordables mediante otras técnicas convencionales o alternativas.

Con el objetivo de ampliar el campo de aplicación del ensayo *Small Punch*, se ha analizado la influencia de la geometría de entalla en la aleación de magnesio AJ62. Para este material no se ha podido asegurar la idoneidad del método debido en gran medida a la fragilidad que presenta este material, no llegando a alcanzar la propagación de fisura en ninguna de las longitudes de fisura y entalla estudiados.

En trabajos futuros se plantea ampliar la metodología estudiada a otros materiales, buscando contrastar los resultados obtenidos en materiales menos dúctiles que el acero S355-J2. En el caso de materiales muy frágiles, como el AJ62, se plantea explorar nuevas vías que lleven a la optimización del ensayo *Small Punch* para dichos materiales. Por último, es necesario un análisis en detalle del efecto del uso de entallas cortas en las estimaciones de tenacidad a fractura, así como el desarrollo de simulaciones y ensayos que permitan alcanzar un mayor grado de conocimiento del uso de defectos con radio 0 mm (fisuras).

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Lacalle, *Determinación de las propiedades de tracción y fractura de materiales metálicos mediante ensayos small punch*, Universidad de Cantabria, 2012.
- [2] D. Andrés, *Caracterización mecánica mediante ensayos Small Punch de materiales metálicos sometidos a altas temperaturas (Tesis Doctoral)*, Universidad de Cantabria, 2016.
- [3] *Small Punch Test Method for Metallic Materials, CWA 1597. Part A: Code of Practice for Small Punch Creep Testing and Part B: A Code of Practice for Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behaviour*, Brussels: Documents of CEN WS21 , 2007.
- [4] M.P. Manahan, A.S. Argon, O.K. Harling, *The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties*, Journal of Nuclear Materials 103-104 , (1981) 1545-1550..
- [5] K. Matocha and R. Hurst, "*Small Punch Testing - The Transition from a Code of Practice to a European Testing Standard*", Key Engineering Materials, Vol. 734, pp. 3-22, 2017.
- [6] ASTM E-643-15, *Standard Test Method for Ball Punch Deformation of Metallic Sheet Material*, ASTM International, (2015).
- [7] J.B. Ju, J.I. Jang, D. Kwon, *Evaluation of fracture toughness by small-punch testing techniques using sharp notched specimens*, International Journal of Pressure Vessels and Piping 80:4 , (2003) 221-228.
- [8] I.I. Cuesta,, *Evaluación de la Tenacidad a Fractura en Aceros Mediante el uso de Probetas Miniatura Prefisuradas (Tesis Doctoral)*, Universidad de Burgos, (2010).



- [9] E. Martínez-Paéda, T.E. García, C. Rodríguez, *Fracture toughness characterization through notched small punch test specimens*, *Materials Science and Engineering A* 657, (2016) 422-430.
- [10] R. Lacalle, J.A. Álvarez, F. Gutiérrez-Solana, *Use of small punch notched specimen determination of fracture toughness*, *ASME 2008 Pressure Vessels and Piping C* 6, (2008) 1363-1369.
- [11] K. Turba, B. Gülcimen, Y.Z. Li, D. Blagoeva, P. Hähner, R.C. Hurst, *Introduction of a new notched specimen geometry to determine fracture properties by small punch testing*, *Engineering Fracture Mechanics* 78:16, (2011) 2826-2833.
- [12] N. Hide, J.M. Brear, A. Fairman, *Non-destructive fracture toughness assessment by miniature punch technique (PUNCH)*, Final Report. ERA Report 2001-0133, ERA Technology, (2001).
- [13] X. Mao, H. Takahashi, *Development of a further-miniaturized specimen of 3 mm diameter for tem disk (\varnothing 3 mm) small punch tests*, *Journal of Nuclear Materials* 150:1, (1987) 42-52.
- [14] B. Arroyo Martínez, *Caracterización mecánica de aceros de alta y media resistencia en condiciones de fragilización por hidrogeno mediante ensayos Small Punch (Tesis Doctoral)*, Universidad de Cantabria, 2017.
- [15] J. Isselin, T. Shoji, «*Yield Strength Evaluation by Small Punch Test*,», *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 37, nº 6, pp. 1-7, 2009.
- [16] M. Eskner, R. Sandström, «*Mechanical property evaluation using the small punch test*,», *Journal of Testing and Evaluation*, vol. 32, nº 4, pp. 282-289,, 2004..
- [17] M. Abendroth, M. Kuna, *Determination of Deformation and Failure Properties of Ductile Materials by means of the Small Punch Test and Neural Networks*, *Computational Materials Science* 28, (2003) 633-644.

- [18] I. Peñuelas, I.I. Cuesta, C. Betegón, C. Rodríguez, J. Belzunce, *Inverse Determination of the Elastoplastic and Damage Parameters on Small Punch Tests*, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 32 , (2009) 872-885..
- [19] R. Hurst, K. Matocha, *Experiences with the European Code of Practice for Small Punch Testing for Creep, Tensile and Fracture Behaviour*, *Conference Proceedings SSTT 2014*, (2014) 1-26.
- [20] T.E. García, C. Rodríguez, F.J. Belzunce, C. Suárez, *Estimation of the mechanical properties of metallic materials by means of the small punch test*, *Journal of Alloys and Compounds* 585, (2014) 708-717.
- [21] L. Tóth, H.P. Rossmanith, T.A. Siewert, *Historical background and development of the Charpy test*, *European Structural Integrity Society* 30, (2002) 3-19.
- [22] D. Andrés, T. García, S. Cicero, R. Lacalle, J.A. Álvarez, A. Martín-Meizoso and J. Aldazábal , *Evaluación de las propiedades de tracción mediante ensayos Small Punch en la zona afectada por los cortes térmicos*, *Anales de Mecánica de la Fractura* 32 , (2015).
- [23] ASTM Standard E-1820-15a, *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*, ASTM International, (2015).
- [24] I.I. Cuesta, J.M. Alegre, *Analysis of the effect of the test rate on polymer essential work of fracture parameters for the small punch test*, *Journal of Applied Polymer Science* 133:16 (2016) 43314, doi: 10.1002/app.43314..
- [25] J.M. Alegre, I.I. Cuesta, H.L. Barbanacho, *Determination of the fracture properties of metallic materials using pre-cracked small punch tests*, *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* 38:1 (2014) 104-112..
- [26] A.A. Well, *Unstable Crack Propagation in Metals: Cleavage and Fast Fracture*, Cranfield (UK): *Proceedings of the Crack Propagation Symposium* 1:84, (1961).



- [27] C.F. Shih, *A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*, *Journal of Applied Mechanics* 35, (1968) 379-386.
- [28] D. Andrés, T. García, S. Cicero, R. Lacalle, J.A. Álvarez, A. Martín-Meizoso, J. Aldazábal, A. Bannister, A. Klimpel, *Characterization of heat affected zones produced by thermal cutting processes by means of Small Punch tests*, *Materials Characterization* 119, (2016) 55-64.
- [29] [En línea]. Available: <https://quimica.laguia2000.com/elementos-quimicos/aleaciones-del-magnesio>.
- [30] Andrzej Kielbus, Tomasz Rzychoń, *Microstructure and Creep Properties of AJ62 and AE44 Die-Casting Magnesium Alloys*, *Materials Science Forum* 638-642:1546, 2010.
- [31] «<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630712002567>,»
[En línea].
- [32] UNE-EN 10025-2, *“Productos laminados en caliente de aceros para estructuras. Parte 2; Condiciones técnicas de suministro de los aceros estructurales no aleados.*

OPTIMIZATION OF THE NOTCHED SPECIMENS GEOMETRY IN THE DETERMINATION OF FRACTURE TOUGHNESS WITH THE SMALL PUNCH TEST

Directors: Roberto Lacalle, David Andrés.

Keywords: Fracture Toughness, notch, Miniature Specimen, mechanical characterization, *Small Punch*.

1. INTRODUCTION

The objective of the mechanical characterization is to know the properties of the material, which allows the analysis of the structural integrity of the components of a structure. It is, therefore, a fundamental analysis to evaluate the behavior of the structural elements, requiring properties such as fracture toughness, tensile properties or yield properties, in order to ensure the integrity of the assembly. It also allows to optimize the behavior of the components, obtaining the real resistant limits of the material, which allows to maximize its useful life.

Commonly, the mechanical characterization of the structural components has been carried out with conventional tests that require large amounts of material, which may affect their structural integrity. That is why alternative trials are emerging that reduce the volume of material needed. Among the new techniques developed stands out the Small Punch essay. It consists simply in punching specimens of small dimensions, deforming it until the break and recording during the test the load exerted on the sample against the displacement experienced by the punch.

Among the various applications presented by the small punch test, this work focuses on the estimation of the fracture toughness of the materials associated with the strength of the material in the presence of cracks. obtaining is studied by means of probes modified with a side notch (Figure 1) which acts as a default and allows the initiation of a crack analogously to conventional tests.

Based on the results obtained, this work is expected to increase the reliability of the Small Punch technique and contribute to the development of the Small Punch assay as a key tool for the characterization of real components in structural integrity assessments.

2. THE SMALL PUNH ASSAY, EXPERIMENTAL PROCEDURE.

2.1. Materials and Small Punch Specimens.

In this work we have studied two types of materials with opposite behaviors: S355-J2 one structural steel commonly used in the industry and a light magnesium alloy AJ62.

The fracture toughness estimation of the SP tests has been carried out using modified miniature specimens with a pass-through notched. The dimensions used corresponding to 10x10 mm square test specimen, as shown in Figure 1. Its preparation and mechanization is simpler than the 8 mm diameter test specimen recommended by code CWA 15627: 2007 and the tooling used allows the process area be exactly the same for both types

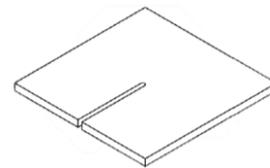


Figure 1. Diagram SP specimen with pass-through notched.

In this paper we have developed three types of samples in order to study the fracture toughness of a broader way. Firstly, specimens Small Punch 10x10 mm unnotched, whose purpose is its modeling by finite elements. Subsequently we worked with SP specimens which have been applied a defect to estimate the fracture toughness, studying the effect of two types of defect. First, test pieces with notch diameter 0.3 mm and with specimens which has prefixed by fatigue to obtain a defect of radius 0. The studied specimen lengths, main objective of the work, have been four, 4 mm, 4.5 mm, 5 mm and 5.5 mm.

2.2. Experimental device.

The test has been carried out in accordance with European Code CWA 15627: 2008, the

fundamental elements of the tooling required to perform the Small Punch test are, first, a lower matrix where the specimen is placed and allows its deformation, a matrix upper, whose objective is to embed the specimen in all its contour and finally a punch that is responsible for transmitting the load to the specimen.

These elements represent the basic characteristics of the tooling used from a practical point of view, but the device has more parts and features that ensure the correct performance of the test and ensure proper assembly to the testing machine that must be coupled. This experimental equipment must be correctly designed for the correct performance of the tests, which is a great challenge.

Due to the study different notch lengths, correct alignment within the lower matrix must be guaranteed. For this purpose, a new mobile matrix capable of adapting to the geometry of each specimen has been developed. As shown in Figure 2, it consists of a fixed half, and another mobile, this allows adjusting the length of each specimen and avoid possible slack, minimizing possible deviations of the notch during the test.

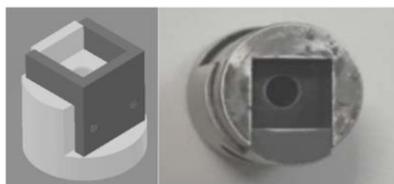


Figure 2. Matrix developed to carry out the tests.

3. Results

The fracture toughness estimates have been made according to the ratio of the degree of enramation of the notch at the time of initiation with the fracture toughness of the material.

3.1. S355-J2 results

The Small Punch test offers us the Force-Displacement curves obtained along it. The curves of the 8 tests performed are shown in Figure 3. The influence of the geometry of the notch is clearly observed. The highest levels of force have been obtained in general for the smaller radius of the applied notch. On the other hand, it is also observed that the maximum force reached is dependent on the length of the notch, the force is

greater when the length of the notch applied is smaller.

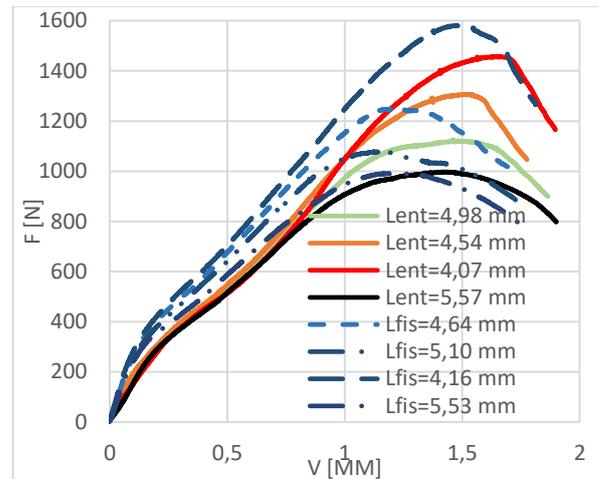
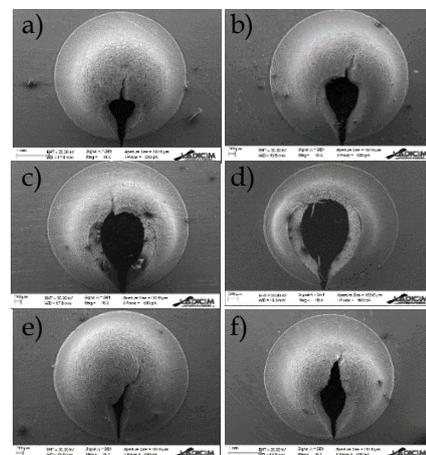


Figure 3. Small Punch test results for steel S355-J2

These effects are estimated due to the presence of greater or lesser amount of material in the process area of the test. That is to say, great force values have been reached, the greater the amount of material available in the zone subjected to stresses.

Next, the fractographs made to the specimens once tested are shown in the Figure 4. It is showed how it is producing an opening of the defect (enramation) until producing a fissure that propagates, this is due to its ductile character. In all of them it has been proven that there is no change in the fracture micromechanisms due to the geometry of the notch, highlighting a greater degree of enramation of the notch depending on the geometry of the same, both for the notches of radio 0, 15 mm as for those with zero radius, being greater the length of the notch, the greater.



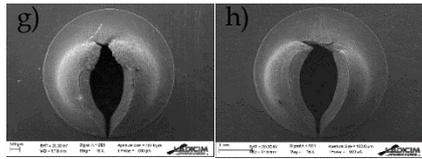


Figura 1. Fractographs of the tested specimens: a) $L_{ent}=4.07$ mm, b) $L_{ent}=4.54$ mm,, c) $L_{ent}=4.98$ mm, d) $L=5.50$ mm. e) $L_{fis}=4.16$ mm, f) $L_{fis}=4.64$ mm, g) $L_{fis}=5.10$ mm, h) $L_{fis}=5.50$ mm.

By studying the relationship of the parameters obtained is observed that the geometry of the notch, both the length and radius of the same has influence on the results obtained, to longer defect, higher fracture toughness estimated. In addition, the fracture toughness value is greater at the same defect length in the notched specimens.

To study the effectiveness of the test, the obtained estimates were compared with the value obtained by conventional tests, and the safety coefficients of the estimates were calculated. It is observed that at average values of notch length, greater tenacity values are obtained, approaching more to the real value.

3.2. AJ62 Results.

For this material the same procedure has been followed as in S355-J2 steel. The difference between both materials lies in their fragility, the magnesium alloy AJ62 is a very fragile material and the steel is a ductile material. The fragility of magnesium has been evident throughout the entire procedure, marking each result obtained.

In order to show the fragility of this material by breaking independently of the existence of a defect, the fractography of the tested specimens is shown in Figure 5. In them it is observed in a clear way that the crack occurs outside the area of influence of the notch, being the shape of the star crack, usual in this material. It indicates that the specimens collapse before by its fragility than by the existence of a defect. This the reason that it can not be guaranteed that a fracture initiation has existed in the specimen and therefore it is not possible to obtain values of fracture toughness.

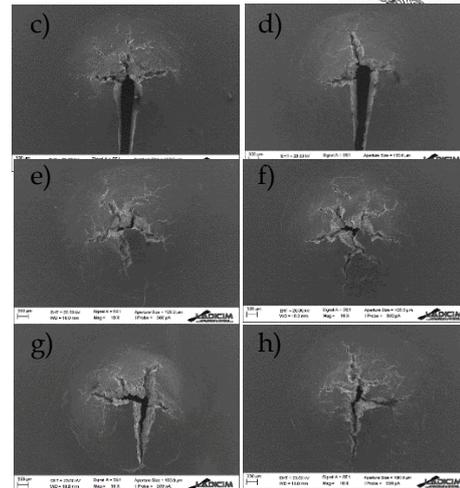
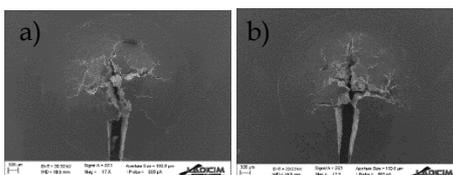


Figura 2 . Fractographs of the tested specimens:: a) $L_{ent}=4.07$ mm, b) $L_{ent}=4.53$ mm, c) $L_{ent}=4.97$ mm, d) $L_{ent}=5.5$ mm a) $L_{fis}=4.03$ mm, b) $L_{fis}=4.56$ mm, c) $L_{fis}=5$ mm, d) $L_{fis}=5.53$ mm

3. Conclusions

Once analyzed the results obtained, two main conclusions are highlighted, firstly, after analyze the effect generated by different radius of defect, 0.15 mm and zero radius, it is detected that the effect notch plays a very remarkable role. For the same defect length, a difference of results between the fractured and notched specimens is generally obtained. Secondly, it should be highlighted as a conclusion the effect that the different lengths of defects applied have had, this being the ultimate goal of this work

It has been proven that the Small Punch test for steel S355-J2 offers results on the safety side, regardless of the notch geometry used.

With the results obtained, the suitability and adequacy of the method are confirmed for its application in evaluations of real structures in the presence of cracks and steel notches S355-J2, ensuring that in said evaluations a certain safety coefficient will be available. The Small Punch test is presented, therefore, as a reliable tool for the local characterization of components in service, presenting the advantages of simplicity, economic and with the need for small volumes of material. Advantages that are difficult to tackle using other conventional or alternative techniques.

In order to broaden the field of the application of the Small Punch test, the influence of the notch geometry in the magnesium alloy AJ62 has been analyzed. For this material it has not been possible to assure the suitability of the method due to the



fragility that this material presents, not reaching to reach the propagation of fissure in any of the fissure and notch lengths studied.

In future work it is proposed to extend the methodology studied to other materials, seeking to contrast the results obtained in less ductile materials than steel S355-J2. In the case of very fragile materials such as AJ62, it arises explore new avenues leading to the optimization of Small Punch test for such materials. Finally, a detailed analysis of the effect should be necessary in order to study the use of short notches in the fracture toughness estimates, as well as the development of simulations and tests that allow to reach a greater degree of knowledge of the use of defects with radius 0 mm (fissures).

Bibliografía (en su caso).

- [1] R. Lacalle, Determinación de las propiedades de tracción y fractura de materiales metálicos mediante ensayos small punch, Universidad de Cantabria, 2012.
- [2] D. Andrés, Caracterización mecánica mediante ensayos Small Punch de materiales metálicos sometidos a altas temperaturas (Tesis Doctoral), Universidad de Cantabria, 2016.
- [3] Small Punch Test Method for Metallic Materials, CWA 1597. Part A: Code of Practice for Small Punch Creep Testing and Part B: A Code of Practice for Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behaviour, Brussels: Documents of CEN WS21 , 2007.

OPTIMIZACIÓN DE LA GEOMETRÍA DE ENTALLA EN LA DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A FRACTURA CON EL ENSAYO SMALL PUNCH

Directores: Roberto Lacalle, David Andrés.

Palabras Clave: Tenacidad a Fractura, Entalla, Probetas miniatura, Caracterización mecánica, *Small Punch*.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de la caracterización mecánica es conocer las propiedades del material, que permite realizar el análisis de la integridad estructural de los componentes de una estructura. Se trata, por tanto, de un análisis fundamental para evaluar el comportamiento de los elementos estructurales, requiriendo propiedades como la tenacidad a fractura, propiedades a tracción o propiedades de fluencia, para poder asegurar la integridad del conjunto. También permite optimizar los comportamientos de los componentes, obteniendo los límites resistentes reales del material, lo que permite maximizar su vida útil.

Comúnmente, la caracterización mecánica de los componentes estructurales se ha llevado a cabo con ensayos convencionales que requieren grandes cantidades de material, pudiendo afectar a su integridad estructural. Por ello están apareciendo ensayos alternativos que reduzcan el volumen de material necesario. Entre las nuevas técnicas desarrolladas destaca el ensayo *Small Punch*. Consiste simplemente en punzonar una probeta plana de pequeñas dimensiones, deformándola hasta la rotura y registrando durante la prueba la carga ejercida sobre la muestra frente al desplazamiento experimentado por el punzón.

Entre las diversas aplicaciones que presenta el ensayo *Small Punch*, este trabajo se centra en la estimación de la tenacidad a fractura de los materiales, asociada a la resistencia del material en presencia de fisuras. Se estudia su obtención por medio de probetas modificadas con una entalla lateral (Figura 1), que actúa a modo de defecto y permite la iniciación de una fisura, de manera análoga a los ensayos convencionales.

En base a los resultados obtenidos, mediante este trabajo se espera aumentar la fiabilidad de la técnica *Small Punch* y contribuir al desarrollo del ensayo *Small Punch* como herramienta clave para la caracterización de componentes reales en evaluaciones de integridad estructural.

2. EL ENSAYO SMALL PUNCH, PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.1. Materiales y Probetas SP.

En este trabajo se han estudiado dos tipos de materiales de comportamientos opuestos: un acero estructural S355-J2 comúnmente usado en la industria y una aleación ligera de magnesio AJ62.

La estimación de la tenacidad a fractura mediante los ensayos SP se ha realizado empleando probetas miniatura modificadas con una entalla lateral pasante. Las dimensiones utilizadas han sido las correspondientes a una probeta cuadrada de 10x10 mm, tal como se muestra en la Figura 1. Su preparación y mecanización es más sencilla que las probetas de 8 mm de diámetro que recomienda el código CWA 15627:2007 y el utillaje utilizado permite que la zona de proceso sea exactamente la misma para ambas tipologías

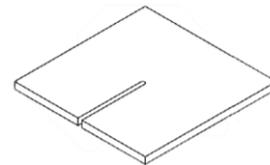


Figura 1. Esquema Probeta SP con entalla lateral.

En este trabajo se han elaborado tres tipos de probetas con el objetivo de estudiar la tenacidad de fractura de una forma más amplia. En primer lugar, probetas *Small Punch* de 10x10 mm sin entalla, cuya finalidad es su modelización por medio de elementos finitos. Posteriormente se ha trabajado con probetas SP a las que se les ha aplicado un defecto para estimar la tenacidad a fractura, estudiándose el efecto de dos tipos de defecto, en primer lugar, probetas con entalla de diámetro 0.3 mm y con probetas a las cuales se les ha prefisurado por fatiga para obtener un defecto de radio 0. Las longitudes de probeta estudiadas, objetivo principal del trabajo, han sido cuatro, 4 mm, 4,5 mm, 5 mm y 5,5 mm.



2.2. Dispositivo Experimental.

El ensayo se ha realizado de acuerdo a al Código Europeo CWA 15627:2008, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** los elementos fundamentales del utillaje necesario para la realización del ensayo *Small Punch* son, en primer lugar, una matriz inferior donde se coloca la probeta y permite su deformación, una matriz superior, cuyo objetivo es empotrar la probeta en todo su contorno y por último un punzón que se encarga de transmitir la carga a la probeta.

Estos elementos suponen las características básicas del utillaje empleado desde un punto de vista práctico, pero el dispositivo cuenta con más piezas y particularidades que permiten asegurar la correcta realización de la prueba y garantizan el adecuado ensamblaje a la máquina de ensayos a la que debe ser acoplado. Este equipo experimental debe ser correctamente diseñado para la correcta realización de los ensayos, lo que supone un gran reto.

Al estudiar diferentes longitudes de entalla se debe garantizar su correcta alineación dentro de la matriz inferior. Para ello se ha desarrollado una nueva matriz móvil capaz de adaptarse a la geometría de cada probeta. Tal y como se muestra en la Figura 2, se compone de una mitad fija, y otra móvil, esto permite ajustar la longitud de cada probeta y evitar posibles holguras, minimizando las posibles desviaciones de la entalla durante el ensayo.



Figura 2. Matriz desarrollada para la realización de los ensayos.

3. Resultados

Las estimaciones de tenacidad a fractura han sido realizadas de acuerdo a la relación del grado de enronamiento de la entalla en el momento de la iniciación con la tenacidad a fractura del material.

3.1. Resultados S355-J2

El ensayo *Small Punch* nos ofrece a las curvas Fuerza-Desplazamiento obtenidas a lo largo del mismo. Las curvas de los 8 ensayos realizados se

muestran en la Figura 3. Se observa de una forma clara la influencia de la geometría de la entalla. Los mayores niveles de fuerza se han obtenido en general para un mismo desplazamiento cuanto menor es el radio de la entalla aplicada. Por otro lado, también se observa que la fuerza máxima alcanzada es dependiente de la longitud de la entalla, siendo mayor cuanto menor es la longitud de la entalla aplicada.

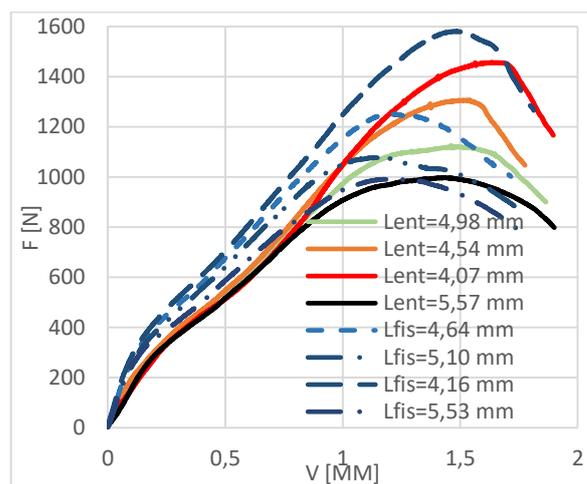
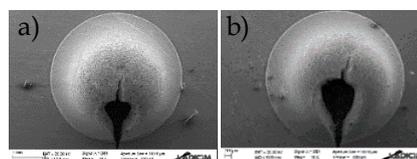


Figura 3. Resultados ensayo *Small Punch* para acero S355-J2

Estos efectos se estiman que se deben a la presencia de mayor o menor cantidad de material en la zona de proceso del ensayo. Es decir, se han alcanzado mayores valores de fuerza cuanto mayor es la cantidad de material disponible en la zona sometida a esfuerzos.

A continuación, se muestran las fractografías realizadas a las probetas una vez ensayadas (Figura 4). En él se aprecia como se va produciendo una apertura del defecto (enronamiento) hasta producir una fisura que se propaga, esto es debido a su carácter dúctil. En todas ellas se ha comprobado que no se produce un cambio en los micromecanismos de fractura debido a la geometría de la entalla, destacando un mayor grado de enronamiento de la entalla en función de la geometría de la misma, tanto para las entallas de radio 0,15 mm como para las de radio cero, siendo mayor cuanto mayor es la longitud de la entalla.



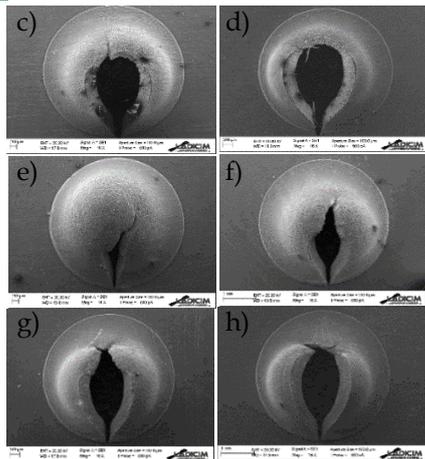


Figura 4. Fractografías de las probetas ensayadas: a) Entalla de longitud 4,07 mm, b) Entalla de longitud 4,54 mm,, c) Entalla de longitud 4,98 mm, d) Entalla de longitud 5,50 mm. e) Fisura de longitud 4,16 mm, f) Fisura de longitud 4,64 mm, g) Fisura de longitud 5,10 mm, h) Fisura de longitud 5,50 mm.

Estudiando la relación de los parámetros obtenidos se observa como la geometría de la entalla, tanto la longitud, como el radio de la misma tiene influencia en los resultados obtenidos, a mayor longitud de defecto, mayor tenacidad a fractura estimada. Además, el valor de la tenacidad a fractura es mayor a misma longitud de defecto en las probetas con entalla.

Para estudiar la efectividad del ensayo se han comparado las estimaciones obtenidas con el valor obtenido mediante ensayos convencionales, y se han calculado los coeficientes de seguridad de las estimaciones. Se observa que a valores medios de longitud de entalla se obtiene valores mayores de tenacidad, acercándose más al valor real.

3.2. Resultados AJ62.

Para este material se ha seguido el mismo procedimiento que en el acero S355-J2. La diferencia entre ambos materiales radica en su fragilidad, siendo la aleación de magnesio AJ62 un material muy frágil y el acero un material mucho más dúctil. La fragilidad del magnesio ha quedado patente a lo largo de todo el procedimiento, marcando cada resultado obtenido.

Con el objetivo de mostrar la fragilidad en este material al romperse independientemente de la existencia de un defecto, se muestra en la Figura 5 la fractografía de las probetas ensayadas. En ellas se observa de una forma clara que la rotura se produce fuera de la zona de influencia de la

entalla, siendo la forma de la rotura en estrella, la habitual de este material. Esto nos indica que las probetas colapsan antes por fragilidad del material que por la existencia de un defecto. Es por ello que no se puede asegurar que en la probeta haya existido una iniciación de fisura y por tanto no se puede obtener valores de tenacidad a fractura.

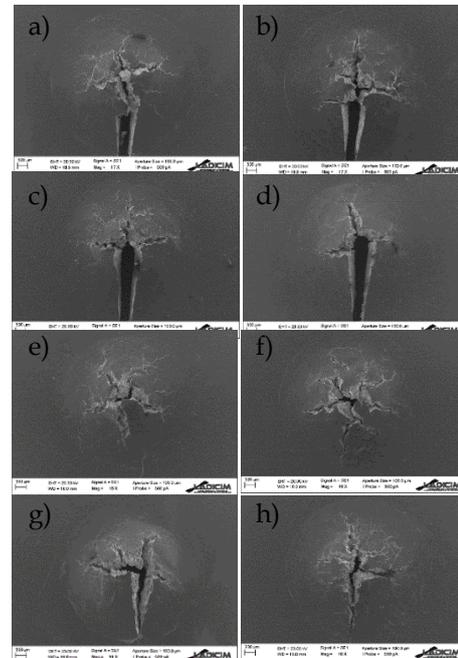


Figura 5. . Fractografía de las probetas ensayadas: a) Entalla de longitud 4,07 mm, b) Entalla de longitud 4,53 mm, c) Entalla de longitud 4,97 mm, d) Entalla de Longitud 5,5 mm a) Fisura de longitud 4,03 mm, b) Fisura de longitud 4,56 mm, c) Fisura de longitud 5 mm, d) Fisura de longitud 5,53 mm

Conclusiones.

Una vez analizados los resultados obtenidos, se destacan dos conclusiones principales, en primer lugar, tras analizar el efecto generado por diferentes radios de defecto, 0,15 mm y de radio cero, se detecta que el efecto entalla juega un papel muy remarcable. Para una misma longitud de defecto, se obtienen de forma general una diferencia de resultados entre las probetas con fisura y con entalla. En segundo lugar, se debe destacar como conclusión el efecto que han tenido las diferentes longitudes de defectos aplicadas, siendo este el objetivo último de este trabajo

Se ha comprobado que el ensayo *Small Punch* para el acero S355-J2 ofrece resultados por el lado de la seguridad, independientemente de la geometría de entalla empleado.



Con los resultados obtenidos se confirma la idoneidad y adecuación del método para su aplicación en evaluaciones de estructuras reales en presencia de fisuras y entallas de acero S355-J2, asegurando que en dichas evaluaciones se contará con un determinado coeficiente de seguridad. El ensayo *Small Punch* se presenta, por tanto, como una herramienta fiable para la caracterización local de componentes en servicio, presentando las ventajas de sencillez, económico y con la necesidad de reducidos volúmenes de material. Ventajas difícilmente abordables mediante otras técnicas convencionales o alternativas.

Con el objetivo de ampliar el campo de aplicación del ensayo *Small Punch*, se ha analizado la influencia de la geometría de entalla en la aleación de magnesio AJ62. Para este material no se ha podido asegurar la idoneidad del método debido en gran medida a la fragilidad que presenta este material, no llegando a alcanzar la propagación de fisura en ninguna de las longitudes de fisura y entalla estudiados.

En trabajos futuros se plantea ampliar la metodología estudiada a otros materiales, buscando contrastar los resultados obtenidos en materiales menos dúctiles que el acero S355-J2. En el caso de materiales muy frágiles, como el AJ62, se plantea explorar nuevas vías que lleven a la optimización del ensayo *Small Punch* para dichos materiales. Por último, es necesario un análisis en detalle del efecto del uso de entallas cortas en las estimaciones de tenacidad a fractura, así como el desarrollo de simulaciones y ensayos que permitan alcanzar un mayor grado de conocimiento del uso de defectos con radio 0 mm (fisuras).

Bibliografía (en su caso).

[1] R. Lacalle, Determinación de las propiedades de tracción y fractura de materiales metálicos mediante ensayos small punch, Universidad de Cantabria, 2012.

[2] D. Andrés, Caracterización mecánica mediante ensayos Small Punch de materiales metálicos sometidos a altas temperaturas (Tesis Doctoral), Universidad de Cantabria, 2016.

[3] Small Punch Test Method for Metallic Materials, CWA 1597. Part A: Code of Practice for Small Punch Creep Testing and Part B: A Code of

Practice for Small Punch Testing for Tensile and Fracture Behaviour, Brussels: Documents of CEN WS21 , 2007.

[4] D. Andrés, T. García, S. Cicero, R. Lacalle, J.A. Álvarez, A. Martín-Meizoso and J. Aldazábal , Evaluación de las propiedades de tracción mediante ensayos Small Punch en la zona afectada por los cortes térmicos, Anales de Mecánica de la Fractura 32 , (2015).

[5] M.P. Manahan, A.S. Argon, O.K. Harling, The development of a miniaturized disk bend test for the determination of postirradiation mechanical properties, Journal of Nuclear Materials 103-104 , (1981) 1545-1550..