



PROGRAMA ASTURIAS 2016-2017

RESULTADOS DEL PROYECTO:

**Desarrollo de nuevos métodos de caracterización a fractura en soldadura
para la industria offshore**

REFERENCIA Nº: IDI/2016/000284

Entidad Beneficiaria:



Fecha inicio: 01/01/2017

Fecha fin: 31/08/2017

1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto se plantea ante la necesidad de desarrollar nuevas técnicas para el estudio de uniones soldadas para componentes de la industria offshore. Normalmente las imperfecciones que se generan en los procesos de soldeo en otros tipos de industria son corregidos o tratados mediante la aplicación de tratamientos térmicos post soldeo, pero en el caso de la industria offshore el uso de este tipo de procesos es muy complejo por diversas causas:

- Por un lado se trata, en la mayoría de los casos, de estructuras muy complejas con nodos y ramificaciones tubulares.
- Por otro, en muchas ocasiones estas estructuras son ensambladas in situ, lo que hace muy complicado la aplicación de procesos postsoldo.

Por lo tanto, la única manera de demostrar que el comportamiento de un material o una estructura soldada con posibles defectos (de dimensiones inferiores a los límites de detección de los ensayos no destructivos) es tolerante a dichos defectos es demostrar el cumplimiento de la tenacidad de las uniones a nivel laboratorio.

Actualmente la normativa exige la aplicación de ensayos CTOD (crack tip opening displacement) para la homologación de los procedimientos de soldadura para este tipo de procesos, sin embargo, los últimos estudios plantean que la simulación con probetas tipo SE(T) y SEN(T) (single edge-notch tension) aportan valores más fiables.

Por todo ello, en este proyecto se plantea el desarrollo de nuevas metodologías para la caracterización a fractura de las estructuras utilizadas en la industria offshore.

2. OBJETIVOS

1. Desarrollo de métodos de caracterización a fractura de uniones soldadas de gran espesor.
 - Desarrollo de método de crecimiento de grietas en ZAT de uniones soldadas de grandes espesores
 - Evaluación de la aplicación de comportamiento a fractura a las diferentes zonas de la ZAT
2. Parametrización de la integral J en probetas sent para la industria offshore.
 - Implementación de un método de medida del crecimiento de grietas en probetas SENT.
 - Estudio comparativo del comportamiento a fractura entre probetas convencionales SENB y probetas SENT.
 - Parametrización de la integral J para probetas SENT

Para la consecución de estos objetivos el proyecto se ha estructurado en dos grandes hitos, detallándose a continuación los resultados obtenidos en cada uno de ellos.

3. ACTIVIDADES DESARROLLADAS

3.1 DESARROLLO DE MÉTODOS DE CARACTERIZACIÓN A FRACTURA DE UNIONES SOLDADAS DE GRAN ESPESOR.

T1.1 Implementación de los métodos de generación de grietas

A la hora de desarrollar los métodos de caracterización a fractura se debe tener en cuenta que en la generación de grietas, la orientación de la entalla es el factor que determinará la orientación de la propia grieta en la unión soldada. En concreto, en la industria offshore y oil&gas, las orientaciones más comunes suelen ser NP y NQ, que recogen las orientaciones de las grietas más susceptibles de aparecer en las uniones soldadas debidos a defectos y a solicitaciones de las estructuras y equipos, tanto mecánicas (sobre todo en equipos offshore) como por acciones combinadas térmicas y mecánicas (equipos a presión para uso en Oil&Gas). En la siguiente figura pueden verse los códigos de orientación del plano de grieta:

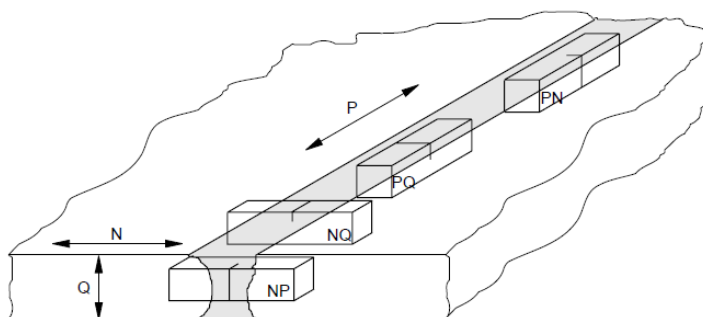
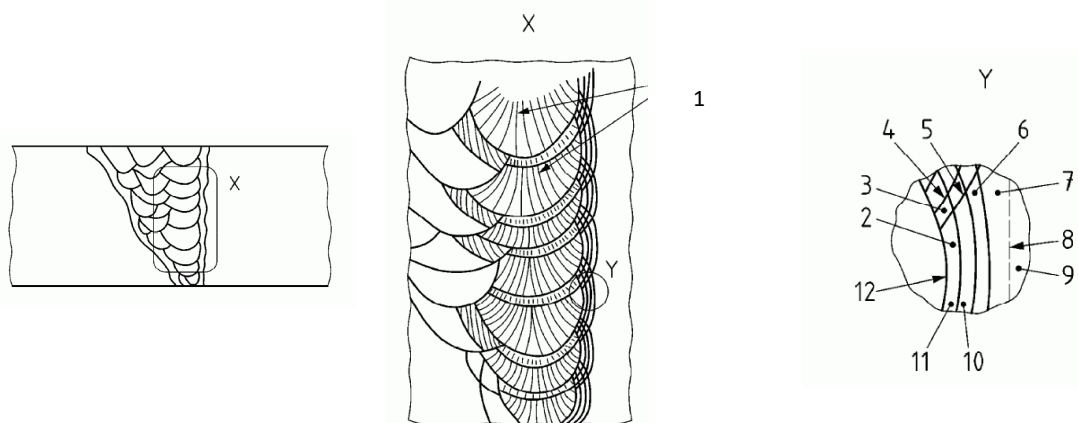


Fig.1 Códigos para la orientación del plano de grieta, para probetas de tenacidad a la fractura en uniones soldadas: N=normal a la dirección de soldeo; P= Paralela a la dirección de soldeo; Q= Dirección del espesor de la soldadura

Además se debe tener en cuenta que en las uniones soldadas las zonas objeto de estudio son el metal de aporte y la zona afectada térmicamente (ZAT), siendo esta última la más conflictiva, por considerarse la zona más frágil de la unión. En la ZAT aparecen microestructuras frágiles, que junto con la combinación de esfuerzos por tensiones residuales generados en la propia soldadura y la posible acumulación de hidrógeno, hacen que un porcentaje elevado de fallos tenga su origen en esta zona. Obsérvese además, que, muchas veces la caracterización de la ZAT con estas orientaciones implica la realización de cupones de soldadura de prueba con preparaciones de borde en "K" o en media "V" para tener ZATs rectas en el sentido del espesor.

Dentro de la ZAT pueden diferenciarse varias zonas, dependiendo del tamaño de grano, siendo comúnmente estudiadas en fractura, la zona de la línea de fusión, y diversas zonas de la ZAT, sobre todo en el caso de soldaduras multipasada, en uniones de gran espesor, como son la zona de grano grueso (CGHAZ), la zona de grano fino (FGHAZ), la zona intercrítica (ICHAZ) y la subcrítica (SGHAZ). La figura siguiente indica por ejemplo las zonas de interés:



Soldadura en media "V"

Detalle de soldadura multipasada. 1- Flechas

Zonas de la ZAT

Fig.2. Zonas de la ZAT

En la figura anterior se distinguen las siguientes zonas

1. Metal de aporte
2. SRCGAZ – Zona térmicamente afectada subcrítica de grano grueso (CGHAZ) (a)
3. IRGHAZ – Zona térmicamente afectada intercrítica de grano grueso (CGHAZ) (a)
4. AC3
5. AC1
6. ICHAZ zona térmicamente afectada intercrítica no modificada (b)
7. SCHAZ zona térmicamente afectada subcrítica no modificada (b)
8. Frontera no visible
9. Metal base
10. FCHAZ no modificada (zona térmicamente afectada de grano fino) (b)
11. GCHAZ no modificada (zona térmicamente afectada de grano grueso) (b)
12. Línea de Fusión
13. (a – zona creada por múltiples pasadas de soldadura)
14. (b – zona creada por una sola pasada de soldadura)

Para obtener una grieta en la zona de interés, se comenzará siempre por situar una entalla por mecanizado con la punta de la entalla en dicha zona, para, hacer crecer una grieta por fatiga a partir de dicha entalla. Es, por tanto fundamental, que la entalla se sitúe lo más precisamente posible en la zona objetivo.

Las soldaduras no siempre se obtienen con la precisión geométrica requerida, por lo que se requiere el análisis geométrico de las mismas para poder situar el plano de la entalla para que el borde de la misma apunte a la zona de interés e intercepte dicha zona en el mayor porcentaje posible a lo largo del espesor.

Tanto las normas BS como ISO permiten, una ligera desviación del cordón de soldadura en el sentido longitudinal (véase la figura 3A). Sin embargo, se ha observado que estas desviaciones reducen drásticamente el número de ensayos válidos. Por lo que para facilitar los ensayos de las probetas y asegurar que el frente de la grieta se localiza dentro de la zona objeto de estudio, las caras de las probetas premecanizadas deben ser paralelas a la dirección de la línea de fusión (véase la figura 3B):

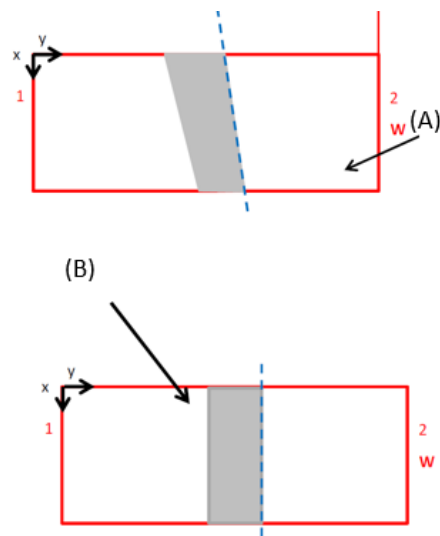


Fig 3. Relación entre direcciones de mecanización de probetas y cordón de soldadura.

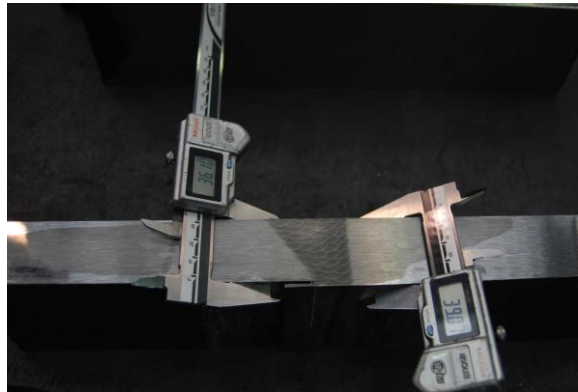


Fig.4. Ejemplo de desalineamiento en e cupón de soldadura para fractura

Para asegurar una adecuada mecanización, se debe, por tanto, fresar la probeta en las proximidades de la zona donde se vaya a generar la grieta de tal manera que las caras queden plano paralelas. Es necesario revelar las soldadura y la ZAT con una ataque químico adecuado (normalmente NITAL en aceros al carbono) una de las caras del cupón con la intención de poder mecanizar probetas cuyo eje sea perpendicular a la línea de fusión de la soldadura.

Una vez que las probetas se han fresado, se pule la superficie a entallar y la superficie opuesta y se atacan, de nuevo para revelar la microestructura de la unión soldada. A continuación, una vez que se ha revelado la microestructura de la soldadura y de la ZAT por ambos lados de la probeta, se traza una línea de referencia con un punzón metálico a lo largo de la microestructura objetivo y se proyecta dicha línea en la cara contraria (se prolongan en las superficies normales a las superficies preparadas). Finalmente se construye una nueva línea equidistante a las líneas prolongadas para delimitar el plano previsto de la entalla mecanizada.

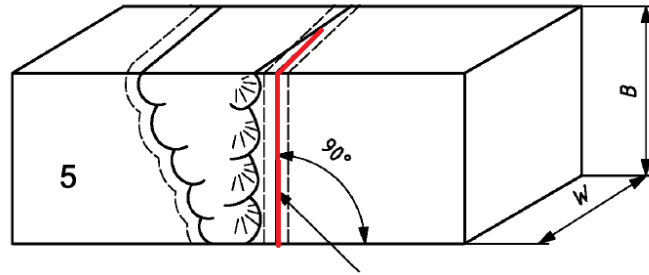


Fig 5. Localización de la entalla usando líneas de referencia



Fig 6. Marcado de la zona de entallado

La entalla siempre se realiza por mecanización y con especial cuidado de no introducir, en el propio proceso de mecanizado, más tensiones residuales que impidan el crecimiento correcto de la grieta de fatiga.

Uno de los métodos más adecuados para obtener una entalla afilada, con precisión y de forma que no se generen tensiones de mecanización es utilizar la técnica de electroerosión, por la que obtendremos una entalla de aproximadamente 0.2 mm de anchura.

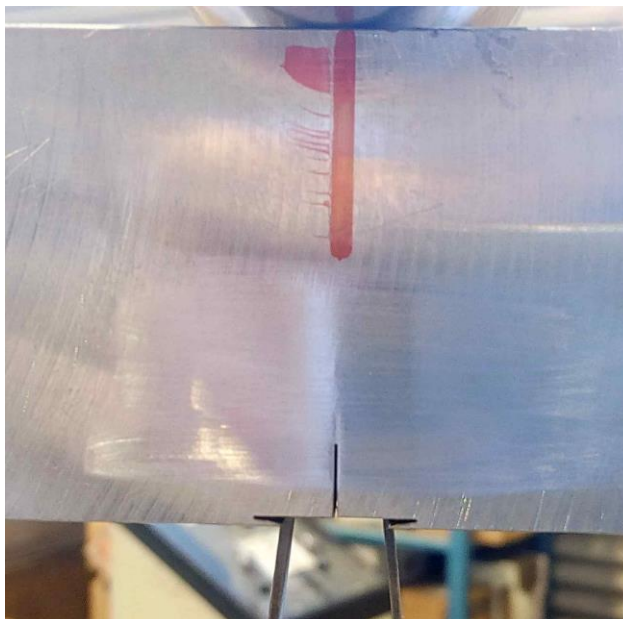


Fig 7. Entalla y grieta en probeta de fractura generada por EDM

Otro de los grandes problemas de generación de las grietas a partir de las entallas es que los cupones soldados pueden tener tensiones residuales, debido al propio proceso de soldeo. Estas tensiones dificultan el crecimiento homogéneo del frente de grieta.

Por un lado y tras varias probetas ensayadas, se han detectado varias circunstancias tras el ensayo:

- Crecimiento desigual del frente de grieta (véase la fig.8)
- Crecimiento mayor en los lados de la probeta que en el centro de la misma.

En los estudios llevados a cabo se ha observado que la grieta crece más en los extremos que en la parte central (véanse las figuras siguientes).

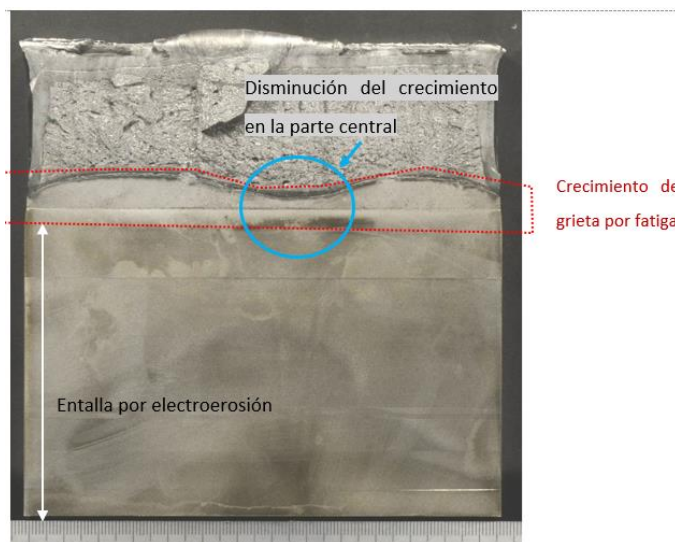


Fig 8. Preagrietamiento no homogéneo debido a las tensiones residuales generadas durante el proceso de soldeo. Entalla recta

En un principio se probó con el cambio de hacer una entalla en “chevron” en lugar de una entalla recta, que actúa como concentrador de tensiones y facilita el crecimiento de la grieta en la zona central de la probeta. No obstante, en fuertes espesores sigue apareciendo un frente de grieta desigual, como se muestra en la figura 9.

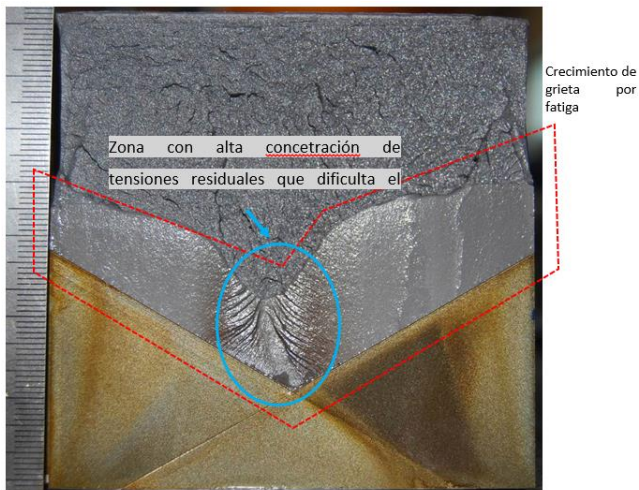


Fig 9. Pregrietamiento no homogéneo debido a las tensiones residuales generadas durante el proceso de soldeo. Entalla chevron

Tras la consulta de publicaciones y de los apartados de pregrieta de las normas de ensayo en soldadura BS-7448-2 y UNE EN ISO 15653, se utilizaron varias de las soluciones propuestas, en concreto el método del aumento de la relación R entre carga máxima y mínima de la prefatiga desde 0.1 hasta 0.5, sin resultados realmente concluyentes en los ensayos de grandes espesores, debido a la fuerte influencia de las tensiones residuales. Este método, además, obliga a recalcular los factores de intensidad de tensiones K_{max} y K_{min} , aun cuando se mantenga la relación de ΔK , que es la variable de control en la prefatiga.

Otro de los problemas detectados en la fase de prefatiga es la desviación del plano de la grieta, normalmente hacia el metal base, donde las tensiones residuales son menores, desviándose así la grieta de la microestructura objetivo, la cual se pretendía caracterizar.

Tras varios intentos en probetas de espesor mayor de 50 mm, se estudió la opción de la compresión local (descrita en ambas normas de ensayos de fractura en uniones soldadas), que pretende la redistribución de las tensiones residuales en el espesor de las probetas, como se indica en las figuras siguientes:

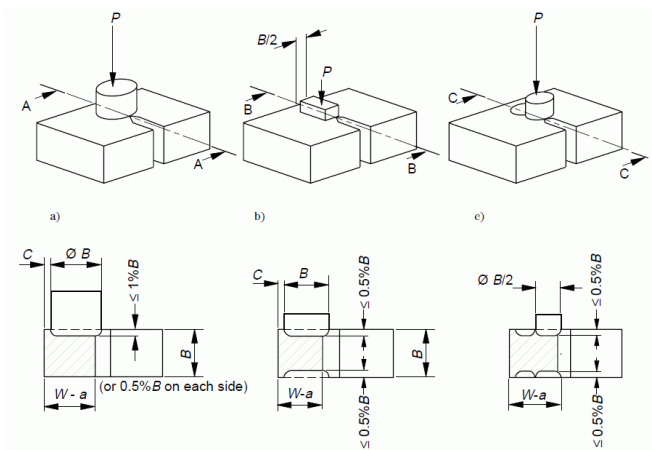


Fig 10. Método de la compresión local

Para lo cual se utilizaron punzones de material templado indeformable para la compresión de la zona posterior a la entalla donde hacer crecer la grieta de fatiga, no obstante este método, todavía daba resultados no adecuados, aunque mejoraba sustancialmente la rectitud del frente de grieta por fatiga.

Tras varios intentos con diferentes cupones y espesores, se decidió utilizar una combinación de la forma de la entalla y la compresión local, obteniendo resultados aceptables desde el punto de vista de la rectitud de la grieta por prefatiga, para espesores hasta 70 mm aproximadamente:

Entalla chevron que actúa como concentrador de tensiones y facilita el crecimiento de la grieta en la zona central de la probeta. Para probetas rectangulares realizando una entalla con un ángulo de 90° y para probetas cuadradas con un ángulo de 120°.

Compresión local. Aplicando a través del ligamento resistente ($W-a$), siendo “W” la anchura de la probeta y “a” la entalla realizada por electroerosión, en el frente de la entalla mecanizada antes del preagrietamiento a fatiga. La compresión ha de englobar la punta de la entalla y producir una deformación plástica de hasta un 1% del espesor de la probeta.

Los resultados obtenidos indican que en probetas de espesores menores de 70 mm, la combinación de entalla chevron y compresión local favorece la rectitud de los frentes de grieta. Mientras que para probetas de espesores superiores a 70 mm se puede realizar una entalla recta y compensar las tensiones residuales únicamente con la compresión local.

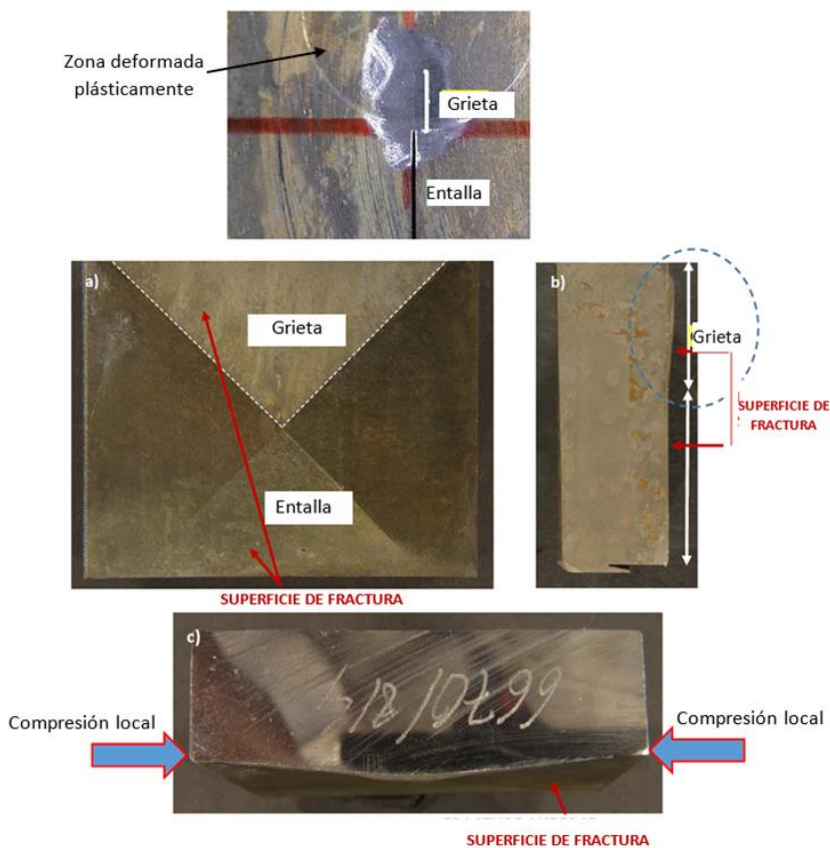


Fig. 11. Esquema de los posibles métodos utilizados en la mitigación de tensiones residuales

T1.2 Implementación de métodos de medida de la grieta en zat rectas y en planos objetivo.

Medidas del frente de grieta

En esta tarea se evaluaron las formas de control del avance de grieta durante la etapa de la prefatiga, la medida indirecta de la misma durante la prefatiga y el control de la precisión de la medida de grieta mediante la medida física de la misma tras el ensayo.

La medida de la grieta durante la etapa de la prefatiga se realiza por el método de la flexibilidad, de tal forma que se hace una medida indirecta del avance de la grieta a través de la medida de la flexibilidad del ligamento resistente, midiendo indirectamente la apertura de la boca de la entalla.



Fig. 12. Ejemplo de la disposición del extensómetro COD en la boca de la entalla

De esta forma, a medida que la grieta avanza, el ligamento resistente de la probeta disminuye, y la flexibilidad aumenta, pudiéndose calcular la longitud de la grieta. Este cálculo, que es conocido y adoptado por la normativa y por software dedicado a este tipo de ensayos está validado y calculado exactamente para metales base, en los cuales se conoce de forma exacta el módulo elástico del material. No obstante, en el caso de soldaduras y, en concreto de zonas afectadas térmicamente, ZATs, hay variaciones en el módulo elástico y movimientos en el plano de la grieta, que es lo que se pretendía estudiar.

Para llevar un control de la pre-grieta se utiliza un software específico (INSTRON da/dN):

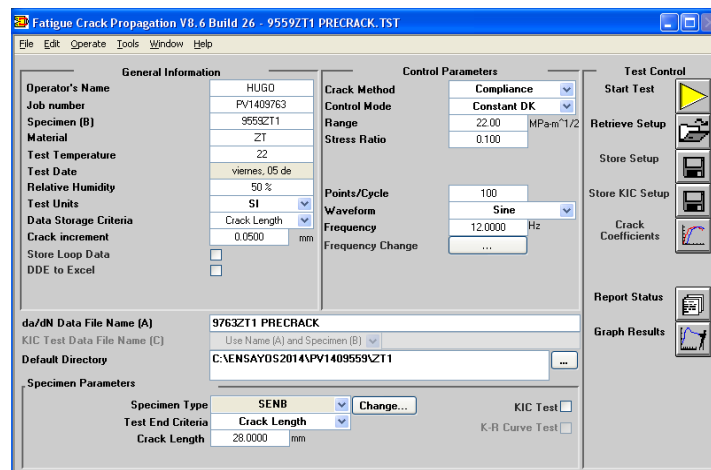


Fig. 13. Software de control de la pre-grieta.

Además, como ya se ha visto en el apartado anterior, en los casos en los que la entalla transcurra a lo largo de la soldadura, o en la zona afectada térmicamente, se requiere de una pre-compresión previa con el objetivo de equilibrar las tensiones residuales de tracción que se producen durante el soldeo mediante la aplicación de tensiones de compresión, de cara a que la pre-grieta crezca lo más recta posible y alcance la microestructura objetivo, lo cual también modifica ligeramente el cálculo geométrico y dimensional, porque la anchura de la probeta en la zona de crecimiento de la misma no es la nominal.

La primera medida de la pregrieta es por tanto la resultante el método de medida de flexibilidad con el extensómetro COD, utilizando como dato de módulo elástico siempre el correspondiente al metal base, o en su defecto 210 GPa para aceros al carbono y la anchura nominal de la probeta, sin tener en cuenta la disminución de la precompresión (que recordemos era alrededor de un 1 %).

La segunda aproximación que se realizó fue la medida de la grieta en ambas superficies de la probeta, tras el final de la etapa de prefatiga, tomando como valor nominal de la grieta en superficie la media de las dos medidas laterales.

El tercer dato es la medida directa del frente de grieta de prefatiga, tras el ensayo, como media ponderada de 9 medidas.

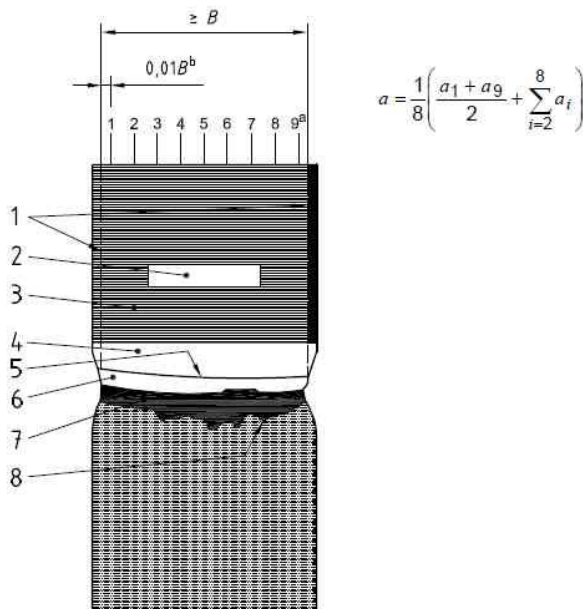


Fig 14. Media ponderada de 9 medidas del frente de grieta real

En la figura siguiente se muestran como ejemplo las medidas realizadas en el frente de grieta de una probeta analizada:



Fig. 15. Medida real del frente de grieta

Del análisis llevado a cabo entre múltiples probetas, el error cometido en la medida de la grieta para materiales de aporte y para ZAT es menor del 1%, entre los valores de medida del frente de grieta real y el aportado por el software a través del extensómetro. Asimismo, se ha comprobado también que, la estricción local que tiene lugar en los laterales de la probeta cuando ésta se comprime antes de la prefatiga es menor, por lo que dichos efectos al final compensan los errores que en un principio cabía suponer por la disminución de la anchura real B.

La medida de la grieta en las caras de la probeta mientras se está en la fase de prefatiga no es adecuado como medida de la grieta real, ya que, en los ensayos para soldadura, nunca se hace entallado de la probeta lateral y el efecto de “forma de ña” es acusado. Sin embargo, esta medida es muy útil para detectar crecimientos desiguales en una y otra cara y desplazamientos del plano de crecimiento de la grieta de la zona objetivo.



Fig. 16. Desplazamiento del frente de grieta del plano objetivo

De esta forma, siempre se puede, si este efecto se detecta antes de la fase de preagrietamiento, compensar dicho desplazamiento girando la probeta 180° alrededor del eje vertical en los dispositivos de ensayo.

Influencia del factor de intensidad de tensiones y del factor R en la prefatiga

Como se ha indicado en el apartado anterior, se realizaron varias pruebas de prefatiga variando la relación entre cargas máximas y mínimas $R=P_{min}/P_{max}$ desde valores típicamente utilizados de 0.1 hasta 0.6, sin efecto en la forma del frente de grieta y por tanto sin efecto en la medida de la misma.

Se realizó un estudio del valor máximo del factor de intensidad de tensiones K , desde los valores más altos que recomienda las normas ASTM (ASTM E399) durante la prefatiga

$$K_{max}/E < 0.0003\sqrt{m}$$

Desde valores históricamente utilizados para prefatiga cercanos a 27 MPa \sqrt{m} hasta valores de 70 MPa \sqrt{m} , para ver la influencia en la prefatiga, por el posible efecto de plastificación local en frente de grieta.

De los resultados obtenidos, se concluye que no se aprecian diferencias mientras que el factor de intensidad de tensiones no supere los 50 MPa \sqrt{m} , en estos casos se ha comprobado, en probetas soldadas de material para offshore, que las propiedades a fractura no varían, aun cuando sí que es cierto que a escala microscópica se observa (en microscopio electrónico de barrido –SEM) que el frente de grieta es más irregular.

Sólo a partir de valores superiores a $K_{max} > 80$ MPa \sqrt{m} se observan valores de tenacidad a fractura superiores, por plastificación del frente de grieta.

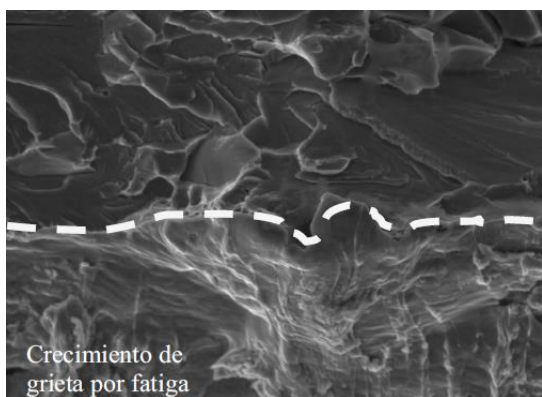


Fig. 17A. SEM - Frente de grieta S355NL para $\Delta K < 20$ MPa \sqrt{m} . Ensayo a -100°C

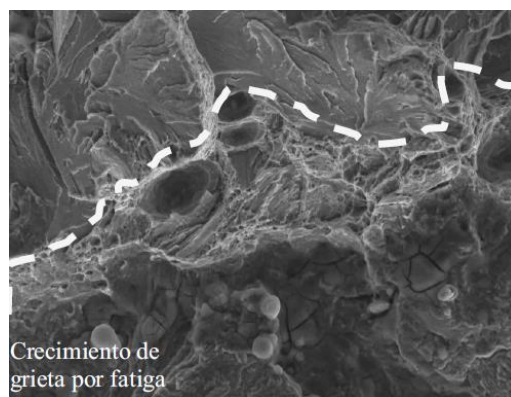


Fig. 17B. SEM - Frente de grieta S355NL para $\Delta K > 80$ MPa \sqrt{m} . Ensayo a -100°C

En cualquier caso, y como buenas prácticas, se propone siempre la utilización de etapas de control de prefatiga en control de ΔK decreciente, para generar grietas de fatiga lo más afiladas posibles, que simulen la generación de grietas reales a partir de defectos por debajo del umbral de detección por medios no destructivos.

Influencia de la frecuencia de la onda de prefatiga

En la medida de la grieta por el método de la flexibilidad, se hicieron pruebas de barridos de frecuencia de la onda sinusoidal aplicada desde los 5 Hz hasta los 40 Hz. Históricamente, en el ITMA nunca se han hecho prefatigas por encima de los 20 Hz, típicamente no más de 15 Hz, ya que anteriormente, era el límite indicado por el fabricante de las máquinas servohidráulicas para un buen control del ensayo en controladores antiguos, los cuales se sustituyeron en años anteriores.

No obstante, la etapa de prefatiga es una de las que más tiempo consumen durante el ensayo y, por tanto una de las más susceptibles de acelerar, sobre todo cuando estamos con probetas de grandes dimensiones.

En la preocupación de que la medida pudiera estar afectada por la frecuencia, en la etapa de prefatiga y con varias probetas de distintos espesores se hizo un cambio de frecuencia durante la prefatiga desde los 5 Hz hasta los 30 Hz. Los resultados son los siguientes:

- Subiendo frecuencia: desde 5 Hz hasta 25 Hz no hay cambios apreciables en las medidas de la grieta, a partir de dicho valor, el valor de grieta calculado por el software comienza a aumentar en pocos ciclos (en valores mayores del 20 % de los de partida), sin que se aprecie aumento de la grieta para después estabilizarse en un mayor valor del anterior al cambio
- Bajando frecuencia. Desde los 30 Hz hasta los 20 Hz, el valor de la grieta calculada cambia (y disminuye) en cada cambio de frecuencia, desde los 22-20 Hz el cambio en la medida calculada es más o menos constante.

Aunque la frecuencia de respuesta del fabricante de extensómetros indica que puede utilizarse hasta los 100 Hz, parece que la propia configuración del ensayo (probetas SENB de flexión en 3 puntos) no es la más idónea para la utilización precisa a frecuencias altas. Es por ello que al final se ha decidido, para ensayos de flexión en 3 puntos y para probetas de gran espesor, no utilizar frecuencias de prefatiga superiores a 15 Hz

T1.3 Métodos de ensayo en zat y soldadura a bajas temperaturas y estudio de problemas del ensayo

Una vez que tenemos la probeta prefatigada, operación que se ha realizado a temperatura ambiente, se procede al ensayo propiamente dicho, a la temperatura de ensayo prefijada. Como se indicaba en la memoria, la mayoría de las caracterizaciones a fractura tienen por objeto demostrar la tenacidad de uniones soldadas a la mínima temperatura de diseño o de certificación del material base.

Para realizar los ensayos a baja temperatura se disponía hasta ahora de una cámara de ensayos acoplable a las máquinas servohidráulicas de dimensiones internas reducidas, pero las necesidades de ensayo de probetas de gran espesor ha hecho que se diseñen cámaras de temperatura modulares y acoplables a las máquinas de ensayo, capaces de albergar probetas de hasta medio metro de longitud.



Fig. 18. Ensayo de fractura a baja temperatura

La realización de estos ensayos requiere:

- Control de la temperatura, de los dispositivos de ensayo y de la velocidad de ensayo
- Control de las medidas del extensómetro COD a baja temperatura
- Criterio de fin de ensayo a partir de la curva Carga - COD

Control de la temperatura, de los dispositivos de ensayo y de la velocidad de ensayo

En los casos de grandes espesores se ha tomado como referencia las referencias de tiempo para estabilidades térmicas que se utilizan en las normas de ensayo a baja temperatura para tenacidad Charpy (ISO 148) y las de los tiempos de tratamientos térmicos de soldadura del código ASME IX.



Fig. 19. Detalle de situación del termopar de contacto

De esta forma, cuando el termopar de medida de la probeta (termopar de contacto, véase figura 19) llega a marcar la temperatura de ensayo, se espera al menos 30 minutos por cada pulgada de espesor, antes de comenzar el ensayo. Esta precaución se realiza para asegurar que todo el espesor de la probeta se encontrará a la temperatura de ensayo $\pm 3^{\circ}\text{C}$ en el momento del ensayo.

La cámara de temperatura está alimentada por nitrógeno líquido vaporizado y se ha diseñado de forma modular, pero de tal manera que el volumen sea al menos 6 veces el volumen de la probeta más los dispositivos de ensayo (que están dentro de la misma para conservar la inercia térmica).

Las velocidades de ensayo siempre se calculan en el límite mínimo de la normas de ensayo (BS 7448-2 / ISO 12135), es decir, en la más cercana al límite mínimo en el rango aplicable, desde un valor de $0.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}\cdot\text{s}^{-1}$ hasta $3.0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{0.5}\cdot\text{s}^{-1}$

La utilización de la velocidad mínima implica el aporte mínimo de energía durante el ensayo en el mismo lapso de tiempo, de tal manera que la inercia térmica de la cámara y las masas frías de la probeta y los dispositivos impidan que localmente se eleve la temperatura en el frente de grieta, hecho que además podría no detectarse apreciablemente en el termopar de la cara lateral.

Los dispositivos de ensayo se han calculado de forma que al menos $\frac{1}{4}$ de su longitud esté fuera de la cámara de temperatura de forma que el gradiente sea suave hasta las mordazas y no transmitan calor a la célula de carga que impliquen cambios en la medida de la carga.

Especial atención se ha realizado en el cambio de probetas (porque normalmente siempre se ensayará más de una a la misma temperatura). El cambio de probetas implica la apertura de la cámara y la acumulación de hielo en los apoyos por la humedad ambiental. Por lo tanto, antes de colocar la una nueva probeta sobre los dispositivos fríos, se limpiarán éstos (tanto los rodillos inferiores como el superior) con alcohol, para evitar la presencia de hielo en los contactos que interferirían en la señal de carga.

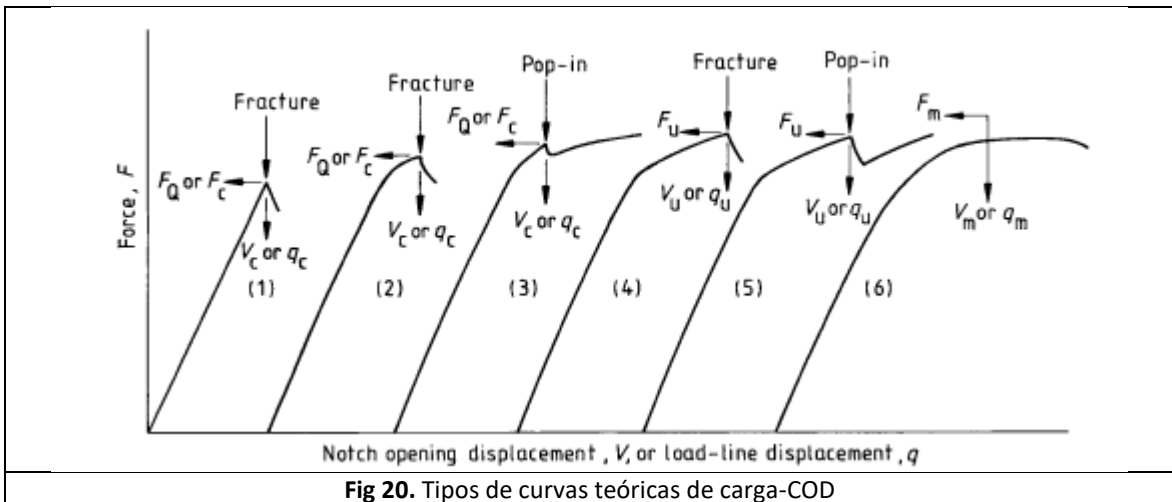
Control de las medidas del COD a baja temperatura

Se ha indicado anteriormente que se ha diseñado el ensayo para que la temperatura de los dispositivos no interfiera en la célula de carga, que siempre se encontrará a temperatura ambiente, no obstante el extensómetro que mide la apertura de la boca de la entalla sí se encuentra en el interior de la cámara, a la temperatura de ensayo. Aunque por construcción y por especificación de los fabricantes (se dispone de extensómetros de Instron y de Epsilon) se indican que pueden trabajar hasta -200°C y el puente de Wheastone que conforman las galgas extensométricas está compensado térmicamente con una galga más en el cuerpo del extensómetro, es necesario incluir un proceso de chequeo de medida del extensómetro a baja temperatura, ya que la calibración del mismo se realiza a temperatura ambiente.

Se ha mecanizado una pieza de material de baja dilatación y contracción INVAR, con varios puntos de medida. Se introducen la pieza y el extensómetro dentro de la cámara de temperatura y cuando se llega a la temperatura de ensayo, se coloca el extensómetro en las diferentes calas de la pieza para comprobar que la medida del mismo no difiere en más de un 0.5% de la medida nominal.

Criterio de fin de ensayo a partir de la curva de carga-COD

Durante el ensayo se va registrando la señal de carga frente a la apertura de boca de la entalla (COD), pero no se tiene una visión en directo de lo que sucede dentro de la cámara de temperatura. Por ello el tipo de curvas que pueden aparecer son:



Dependiendo el tipo de curva se definirá el parámetro CTOD como

CTOD_c → CTOD Crítico: cuando hay un comportamiento frágil o semifrágil del ensayo, de forma que se produce un avance repentino de la grieta en el plano microestructural objetivo

CTOD_u → CTOD último: cuando después de un comportamiento dúctil no despreciable y cierto enroscamiento de la grieta, ésta avanza por el plano de la grieta de forma semi frágil, o con un “pop-in”

CTOD_m → CTOD máximo: Cuando se llega al máximo de carga en la curva y esta llega a decrecer, con un comportamiento dúctil, cercano al colapso plástico

CTOD_{mm} → CTOD máximo (mínimo) cuando, sin alcanzar el máximo de carga, se agota la capacidad de medida del extensómetro COD y el ensayo se para. En este caso, el comportamiento del material es dúctil, pero no puede darse un valor real, pero se puede estimar que el valor es en cualquier caso mayor que el último valor estimado para el último valor medido por el COD.

En los ensayos se realizados se han obtenido curvas de todo tipo, pero sobre todo se han obtenido curvas del tipo frágil (CTOD_c y CTOD_u) cuando la grieta se ha situado en la ZAT, sobre todo a bajas temperaturas, y curvas de tipo dúctil (CTOD_m y CTOD_{mm}) en los casos en que la entalla se ha situado en el material de aporte.

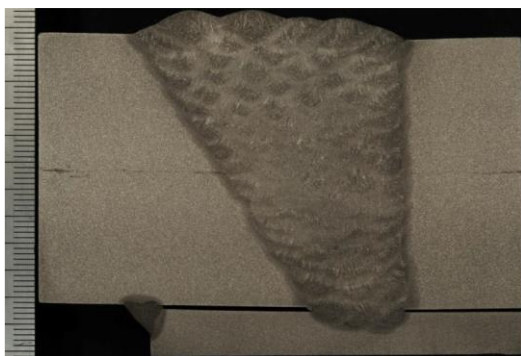


Fig.21A. Soldadura a ensayar



Fig. 21B. Grieta en ZAT

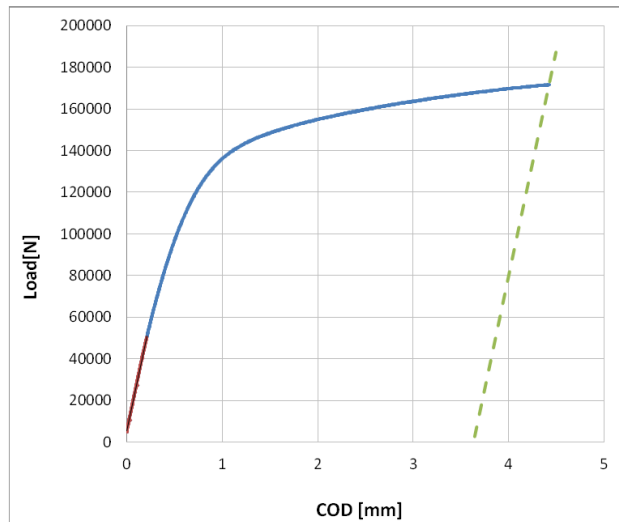


Fig. 22. Gráfica de ensayo – Tipo CTOD_{mm}

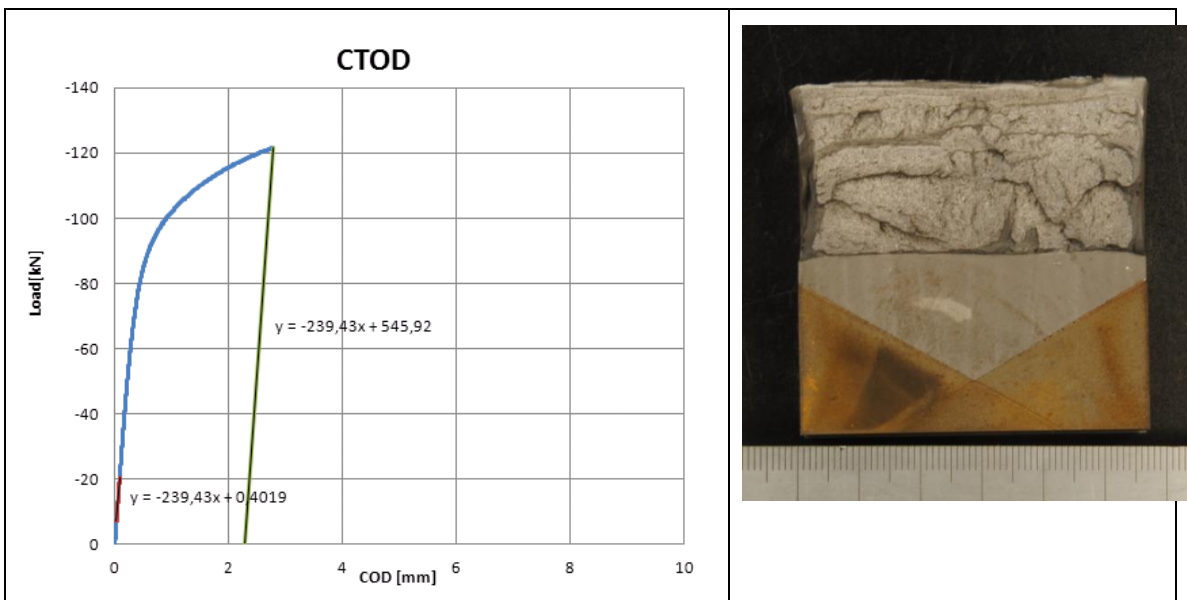


Fig. 23. Gráfica de ensayo – Tipo CTOD_u

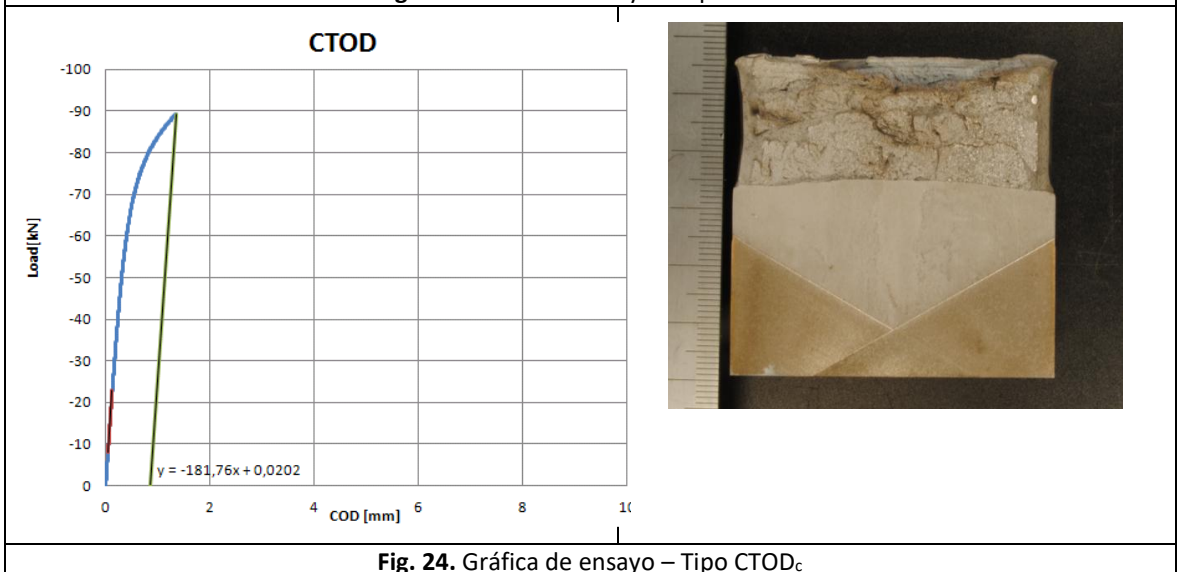


Fig. 24. Gráfica de ensayo – Tipo CTOD_c

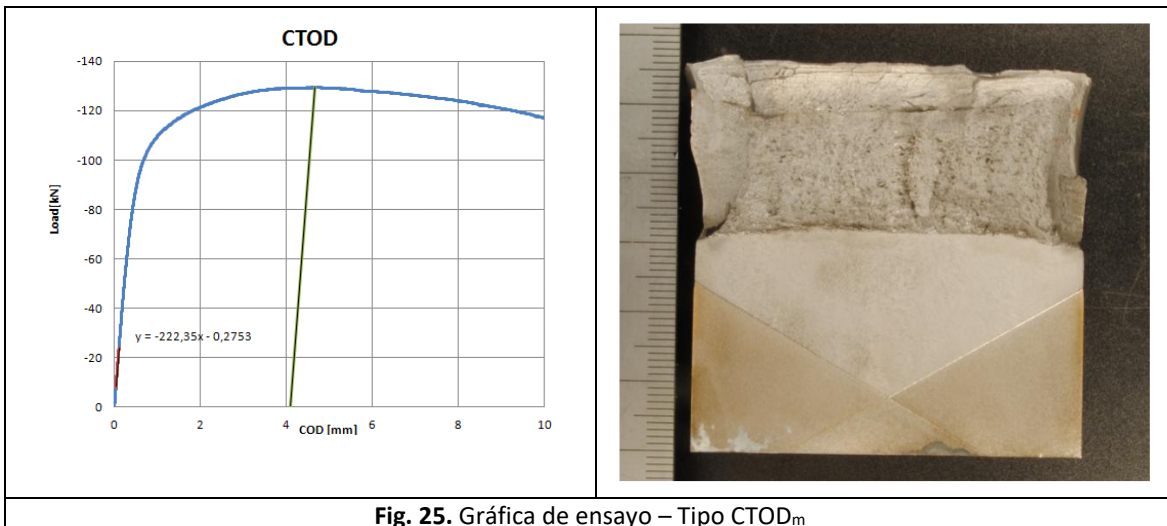


Fig. 25. Gráfica de ensayo – Tipo CTOD_m

T1.4 Evaluación de la interceptación de las grietas con las microestructura objetivo tras ensayo

Una vez realizado el preagrietamiento, y el ensayo CTOD a la temperatura de trabajo de la estructura, se procede a evaluar el porcentaje de interceptación de la pregrieta en la zona objeto de estudio. Para ello se preparan las dos superficies de fractura obtenidas de la probeta (véase la figura 26) y se realizan los cortes que se indican en la figura 27.

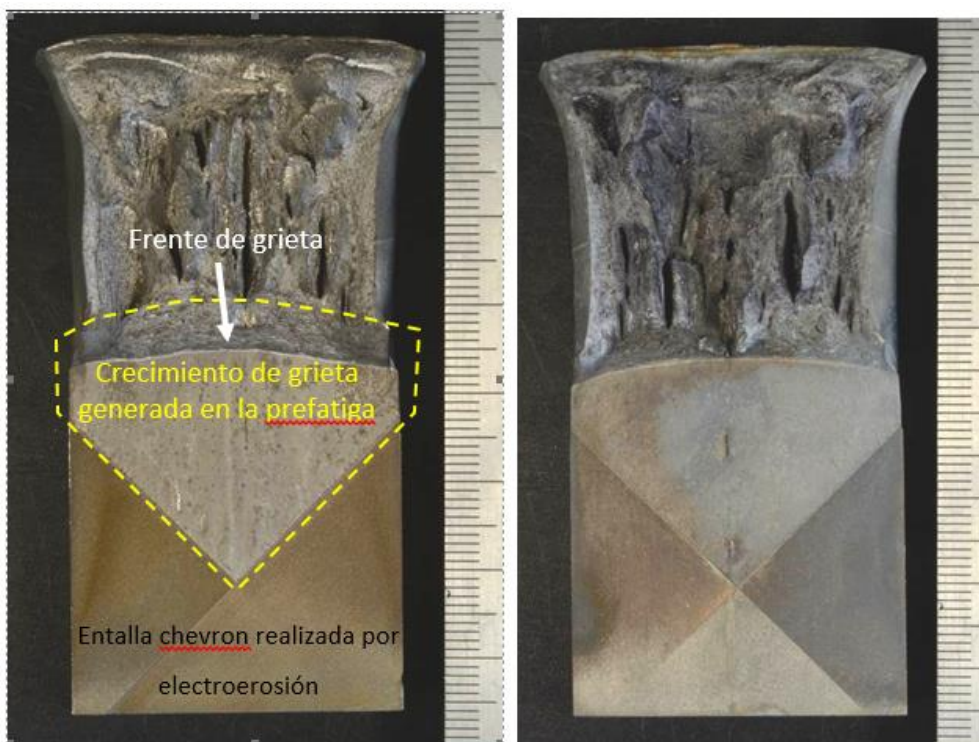


Fig. 26. Ejemplo de las superficies de fractura obtenidas

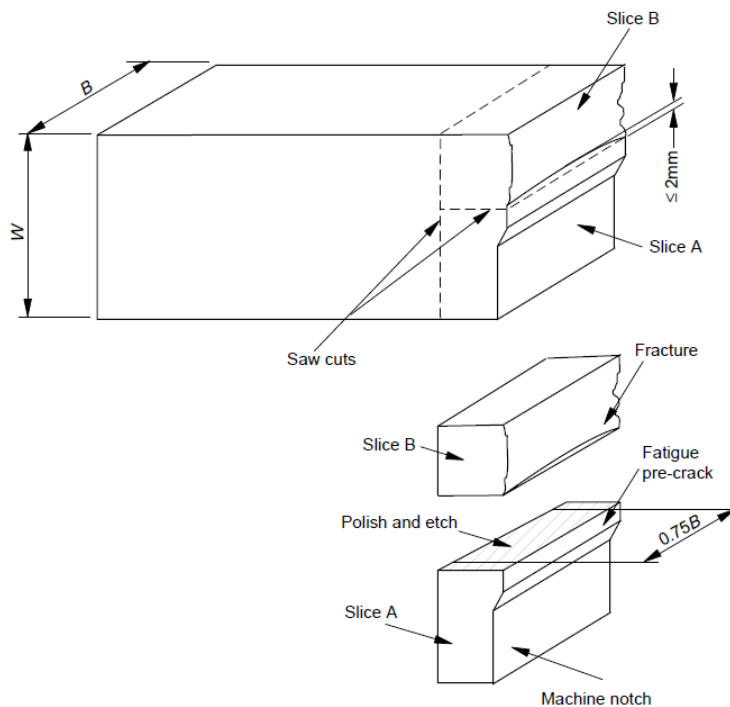


Fig. 27. Cortes de las superficies de fractura para la observación del frente de grieta

Una vez realizados los cortes se pulen y se atacan (con NITAL en el caso de aceros al carbono) las muestras para revelar la microestructura. Ésta se observa en un microscopio óptico con el fin de determinar la proporción de frente de grieta que intercepta la zona objeto de estudio.

En las siguientes figuras (28A-D) se muestran ejemplos de las probetas metalográficas. En la figura 29, se muestra una metalografía donde se indica cómo medir la zona interceptada.

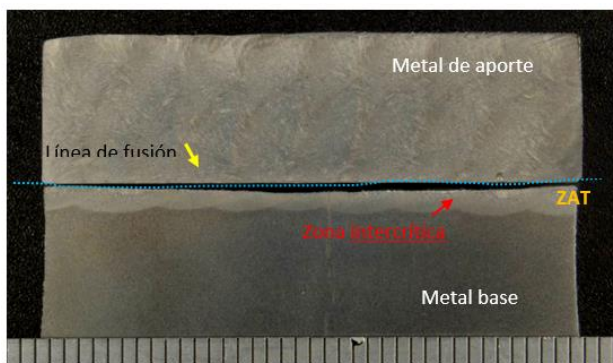


Fig. 28A. Zona interceptada (en azul) en la línea de fusión

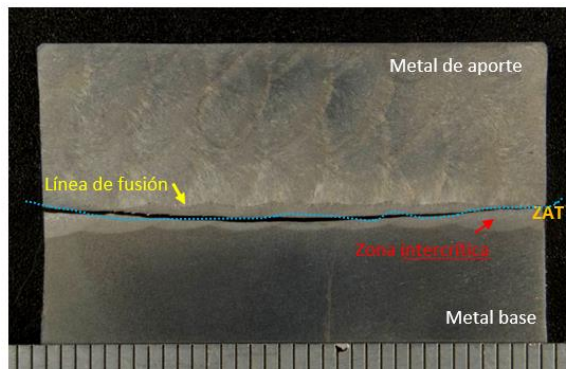


Fig. 28B. Zona interceptada (en azul) en la zona media ZAT

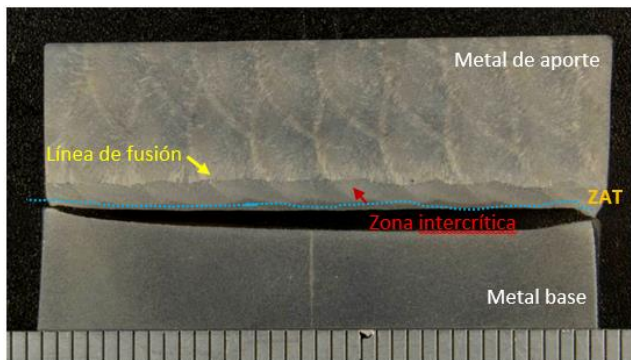


Fig. 28C. Ejemplo de zona interceptada (en azul) zonas de grano intercrítica y subcrítica

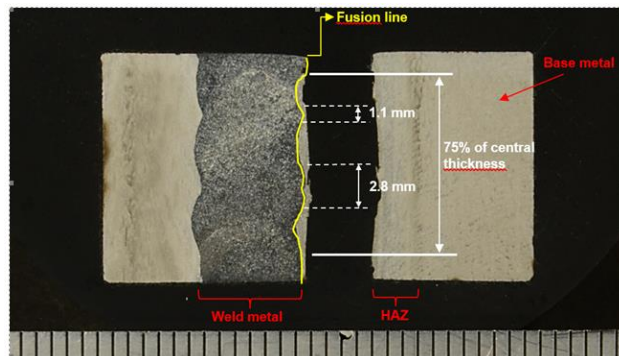
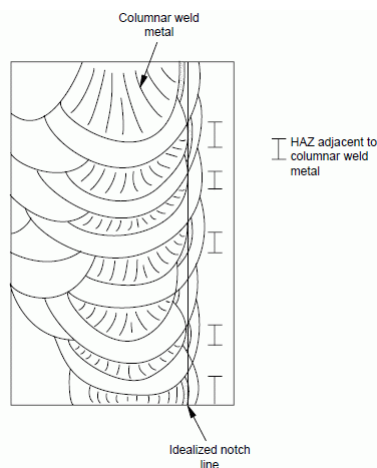


Fig. 28D. Medida de las zonas objeto de estudio interceptadas

El cálculo de la zona interceptada, depende de la norma utilizada pero normalmente se realiza de acuerdo a un % mínimo válido de interceptación que se calcula como el esquema siguiente



$$\% \text{ de microestructura interceptada} = \frac{\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} \lambda}{0.75B} \times 100$$

Normalmente este % varía con el espesor de la chapa B, pero en muchos casos un valor mayor de 15% es suficiente, por las variabilidades de la ZAT, lo cual se ha comprobado que se cumple en los ensayos realizados, como se ve en la figura 28 D.

Solo en los casos en los que la entalla y la grieta tienen por objetivo el metal de aporte, no se hacen evaluaciones metalográficas, cuando el tamaño de la zona soldada es sensiblemente más amplia que el plano de la entalla y de la grieta, como se observa en la figura siguiente:

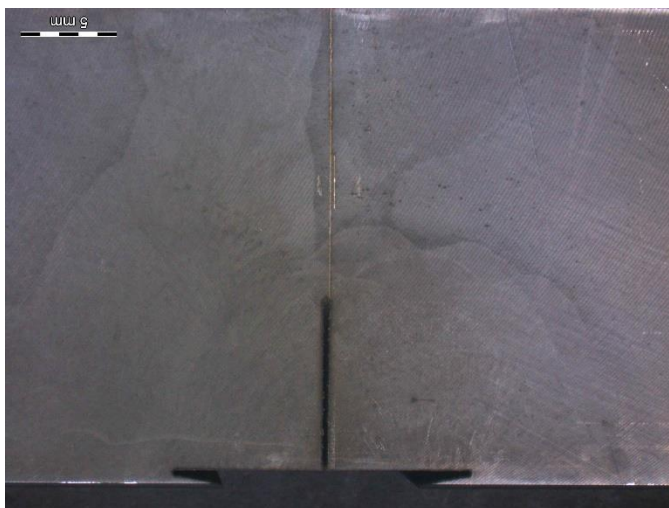


Fig. 29. Ejemplo de grieta objetivo en la zona de metal de aporte

T1.5 Validación de la secuencia de caracterización y de los resultados obtenidos

Los apartados anteriores muestran todas las características y precauciones de los ensayos de fractura para muestras de grandes espesores, sobre todo en soldadura. La evaluación de todos los datos y medidas obtenidas indican si al final el ensayo ha sido válido o no.

La validación de todo el proceso se indica en las tablas siguientes en verde se indica las restricciones a cumplir según norma EN ISO 15653, de forma que se deben cumplir cada una de estas condiciones para los parámetros definidos:

Probeta y geometría			
Longitud (L) - mm	Espesor (B) - mm	Anchura (W) – mm	Zona objetivo (MB/ZAT/MA)
Entalla			
Profundidad	Anchura	Perfil	Precompresión
< 0.45 W	< W/16	Plana / Chevron	≤ 0.01 W
Dispositivos			
Span (distancia entre apoyos)	Diámetro rodillo superior	Diámetro rodillos inferiores	Apertura en boca de la entalla para COD
4 W ± 0.2 W	> 0.5 W	0.5W < Ø < W	10 ± 0.2 mm
Prefatiga			
Kmax	R	Frecuencia	Número de ciclos
< 0.0003 * E	< 0.5	< 20 Hz	>10000
Pregrieta final (a _f)	Diferencia entre caras	Desviación del plano	Plastificación observada en lateral
0.45 W < a _f < 0.7 W	< 20%	NO /SI	NO /SI
Ensayo (preparación)			
Temperatura en superficie	Tiempo de mantenimiento	Comprobación COD a temperatura	Limpieza de apoyos con alcohol entre ensayos
T ± 0.3 °C	> W·1.5 min	SI/NO	SI/NO
Ensayo (ejecución)			
Balace del extensómetro antes de ensayo	Diferencia de temperatura inicio – fin de ensayo	Tipo de curva obtenida	Velocidad de ensayo

SI/NO	< 3 °C	C / U / M / MM	0.2 – 3.0 MPa m ^{0.5} s ⁻¹
Evaluación tras el ensayo			
Medida del frente de grieta	Plano de grieta intercepta a la zona de interés	Medida de la zona interceptada	VALIDACION
Plano(*) / no plano (*) ver restricciones de las 9 medidas en norma	SI/NO	SI/NO	SI/NO

La tabla anterior representa la validación mínima a tener en cuenta, en verde si todos los parámetros medibles cumplen con los valores máximos, mínimos o rangos especificados o cuando la pregunta es cualitativa la respuesta es “SI”. No obstante, dependiendo de la norma de ensayo (BS 7448 / UNE EN ISO -GL15653 / UNE EN 10225 / ESIS P2-92 / DNV-GL, etc.) más restricciones o diferentes casos individuales de las anteriores habrían de satisfacerse.

3.2 PARAMETRIZACIÓN DE LA INTEGRAL J EN PROBETAS SENT PARA LA INDUSTRIA OFFSHORE

T2.1 Establecimiento de montaje de probetas tipo sent

Existen dos opciones para el montaje de las probetas SENT en función de la geometría de las mismas. Por un lado está la opción de usar un agarre mediante mordazas y por otro lado la opción de mecanizar un utillaje para realizar un agarre mediante bulón.

En cuanto a la primera opción mencionada, tiene una limitación importante, debido a la dificultad de colocación de la probeta en la cámara de temperatura para un hipotético ensayo en frío. Es por esto que finalmente se ha optado por el mecanizado de unos dispositivos que nos permitirán, en caso de ser necesario, la colocación de la probeta dentro de la cámara de temperatura (véase la figura 30).

Los dispositivos se diseñaron en acero inoxidable dúplex, que presenta muy buen comportamiento a bajas temperaturas y una elevada resistencia a la tracción, al desgaste y a la corrosión.

Como se puede observar en la figura 30, el diseño de los dispositivos se hizo de tal manera que pudieran adaptarse a las mordazas de la máquina de ensayos universales de 500kN de capacidad de carga. Lo que nos permite una mayor versatilidad a la hora de realizar el estudio.

El material escogido para la mecanización de los dispositivos ha sido un acero inoxidable dúplex, debido a sus propiedades anticorrosión (importantes en caso de llevar a cabo ensayos a baja temperatura) y a sus buenas propiedades mecánicas en comparación con otros aceros inoxidables.

Además de un correcto mecanizado de los dispositivos de agarre, tan importante o más es tener la máquina correctamente alineada. Una alineación deficiente puede dar lugar a esfuerzos de flexión inesperados, que nos falseen los resultados de los ensayos, así como una baja reproducibilidad de los mismos.

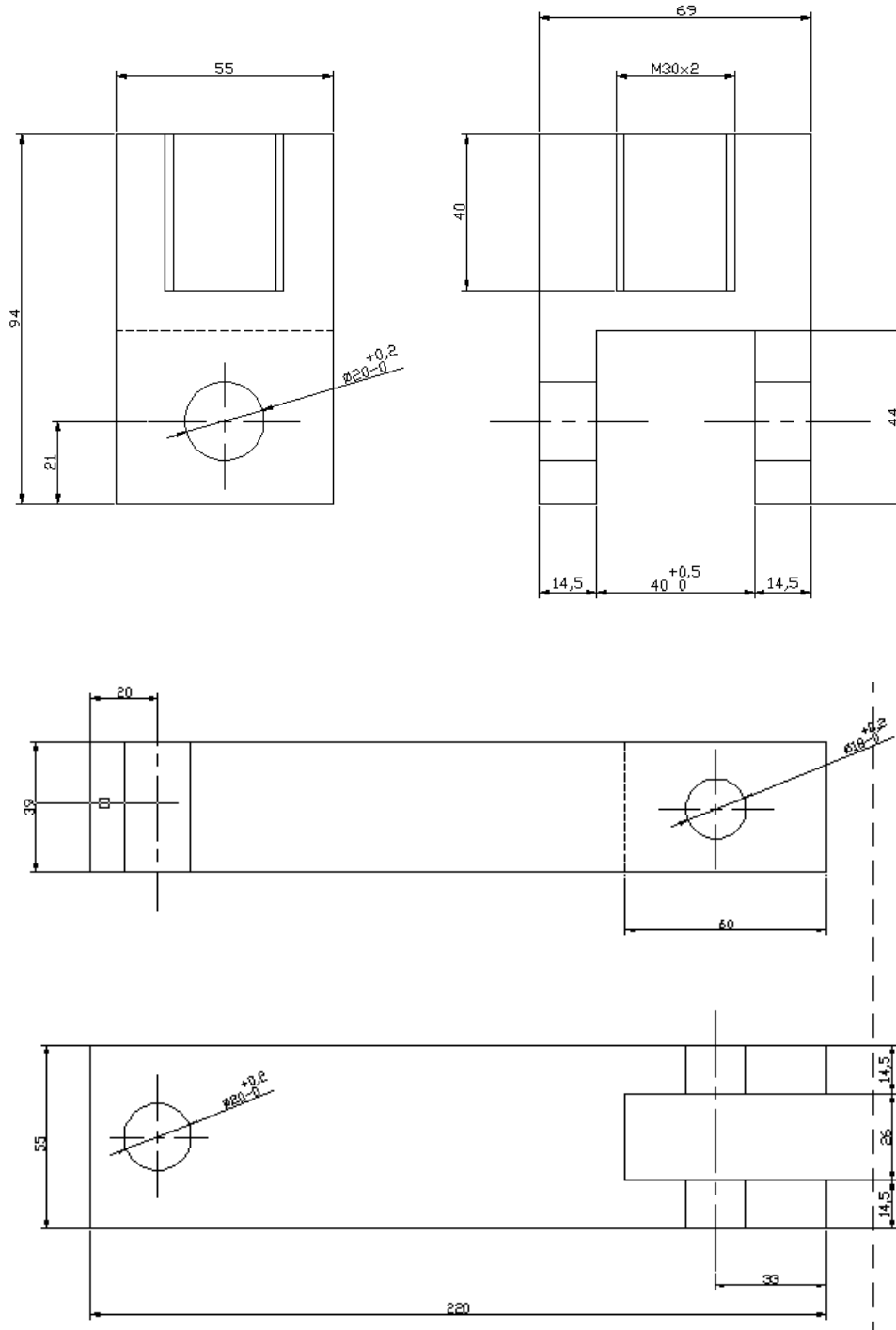


Fig.30 Planos de los dispositivos para probetas SENT

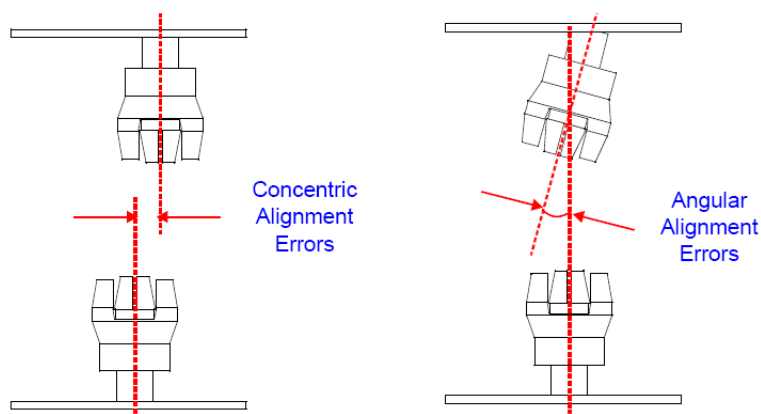


Fig.31. Ejemplo de desalineación de las mordazas

El primer paso es la conexión eléctrica de los equipos de medida del alineamiento, una vez realizada se debe esperar a la estabilización térmica. Con ella nos aseguramos de que las galgas proporcionarán medidas estables a lo largo de la toma de datos.

Al conectar la probeta de alineamiento al equipo amplificador de señal, este suministra una corriente eléctrica que circula por las galgas y el cableado. La resistencia del circuito hace que se eleve ligeramente la temperatura del cable conductor. Por ello, tras alimentar las galgas, se deben esperar unos minutos hasta alcanzar el equilibrio térmico.

Después, se fija la probeta de alineación en ambas mordazas, y aplicamos la carga de alineamiento. La correcta colocación de la probeta es esencial ya que el programa identifica todas y cada una de las galgas, de modo que hemos de colocar la galga 1 al frente y asegurarnos de que siempre está en la misma posición. Esto permite que el software pueda resolver con precisión los ángulos de flexión y los desplazamientos de concentricidad.

Antes de obtener medida alguna debemos proceder a la compensación de la probeta. Consiste en tomar medidas colocando la probeta en distintas orientaciones. Primero se aplica la carga de alineamiento con la galga 1 al frente y se repite la toma de datos girando la probeta 180°, dejando ahora la galga 3 al frente. El software guarda las lecturas en cada orientación y, a continuación, aplica un factor corrector al cálculo de la alineación para contrarrestar la flexión a la que puede estar sometida la probeta por no ser perfectamente recta.

Una vez realizada la compensación de la probeta según el apartado anterior, se fija la probeta en las mordazas y se aplica la carga de comprobación (o verificación).

En caso de que los valores obtenidos no cumplan con la normativa, se procederá a ajustar la cadena de carga en función del procedimiento interno PM90R03.

Tarea 2.2 Implementación de un método de medida del crecimiento de grietas en probetas SENT

En esta tarea se llevó a cabo la selección de la geometría de las probetas sobre las que hacer el ensayo, habiendo sido seleccionadas la de tipo “pin-loaded” al permitir una mayor adaptación y facilidad de uso que la “clamped” o empotrada.



Fig. 1. Probetas empleadas con geometría “pin loaded”.

Siendo el objetivo de esta tarea implementar un método de medida del crecimiento de grietas en probetas SENT, se llevaron a cabo numerosos ensayos aplicando distintas técnicas de generación de grietas sobre diferentes configuraciones de probetas, muchos de los cuales fueron carentes de validez al no generar puntos suficientes como para sacar conclusiones relevantes.

Finalmente, se obtuvieron 6 ensayos válidos, de los cuales dos de ellos se usaron para ensayos CTOD mientras que los 4 restantes se usaron para ensayos J, según se puede observar en la siguiente matriz de ensayos:

Probetas empleadas para los ensayos.

	Codificación de probeta	Tipo de probeta	a/W	B (mm)	W (mm)	Método de ensayo
1	7031-1-SENB1	SENB	0.5	23	46	CTOD
2	7031-1-SENB2	SENB	0.3	23	46	J-cargas y descargas
3	7031-1-SENB3	SENB	0.5	23	46	J-cargas y descargas
4	7031-1-SENT1	SENT	0.5	23	23	CTOD
5	7031-1-SENT2	SENT	0.3	23	23	J-cargas y descargas
6	7031-1-SENT3	SENT	0.5	23	23	J-cargas y descargas
7	7031-1-SENT4	SENT	0.5	23	23	J-cargas y descargas

Dentro de esta sucesión de ensayos (tal y como refleja la tabla anterior), se emplearon dos configuraciones diferentes de probeta: SENB y SENT. El objetivo es el de buscar una comparativa entre los métodos más empleados y normalizados, basados principalmente en el uso de probetas de flexión en tres puntos (SENB), con respecto a los nuevos métodos, aún en desarrollo, basados en el empleo de probetas de tracción (SENT). En la siguiente figura se muestra un esquema con las diferentes aplicaciones de carga en función de la geometría de la probeta.

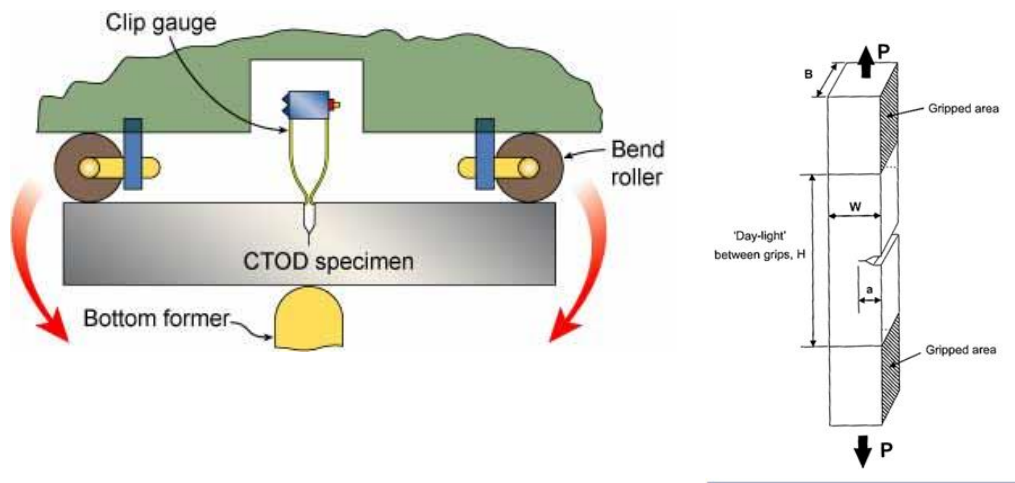


Fig. 2. Configuraciones de probeta SEN(B) y SEN(T)

Al tratarse de una metodología de estudio en fases muy iniciales no está disponible ninguna sistema informático para el cálculo de estas curvas, por lo que el grupo de investigación de ITMA desarrolló un programa en base Excel a partir del cual, a través de la gráfica de cargas y descargas (J-COD) obtenida del ensayo en sí, se determina, de la forma más automatizada posible, los incrementos de grieta y los valores de J respectivamente.

Durante la anualidad 2016 se obtuvo la curva de calibración en la que se observa que el crecimiento de grieta comienza a partir de la descarga número 14, lo que supone que la evolución de la pendiente en la gráfica se mantiene aproximadamente constante, arrojando valores de “a” muy parecidos, hasta el momento en que la pendiente comienza a decrecer, momento en el que los valores de “a” comienzan a aumentar progresivamente.

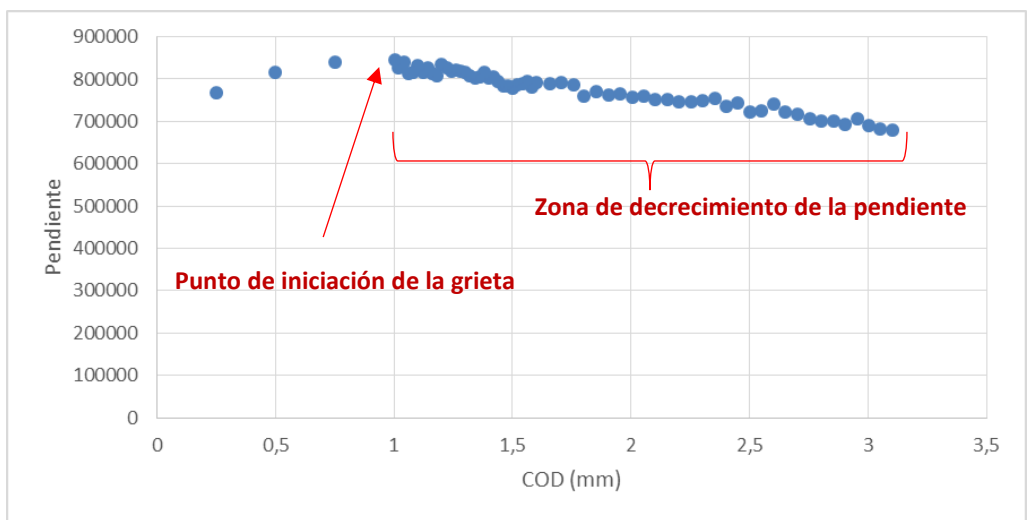


Fig. 3. Evolución de la pendiente a lo largo del ensayo.

Durante 2017, fueron realizados ensayos para llevar a cabo una comparativa entre las curvas de calibración sobre las distintas probetas SENT.

En primer lugar se muestra el efecto de las condiciones del ensayo en la evolución de la pendiente:

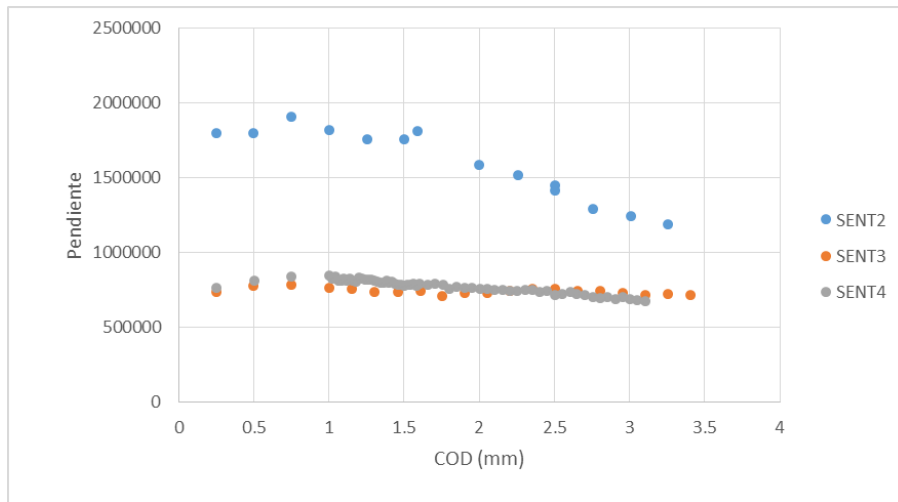


Fig. 4. Comparativa de la evolución de la pendiente a lo largo del ensayo.

Las condiciones de ensayo fueron las siguientes:

- **SENT2:** relación de tamaño de grieta de 0.3, distancia entre descargas 0.15mm.
- **SENT3:** relación de tamaño de grieta de 0.5, distancia entre descargas 0.2mm.
- **SENT4:** relación de tamaño de grieta de 0.5, gran número de descargas en la zona de interés.

De esto se puede concluir que en la probeta con una relación de tamaño de grieta menor se produce una brusca caída del valor de la pendiente, lo cual se traduce en un mayor crecimiento de grieta durante el ensayo.

Por otro lado, en el caso de las probetas con una relación de tamaño de grieta de 0.5, se observa un descenso más progresivo cuanto mayor es el número de descargas realizadas. En la probeta SENT3 podemos ver que se mantiene estable, mientras que en la probeta SENT4 se puede observar con más claridad una tendencia descendente.

En la gráfica que se muestra a continuación, se puede ver la evolución de la pendiente con respecto al crecimiento de grieta en las probetas SENT2 y SENT4. Se deduce que cuanto menor es la pendiente de la descarga, mayor crecimiento de grieta se va produciendo, dando lugar a una evolución completamente lineal. Además se observan grandes diferencias en la rigidez de ambas probetas, dando lugar a pendientes muy diferentes, debido a las dispares relaciones de tamaño de grieta.

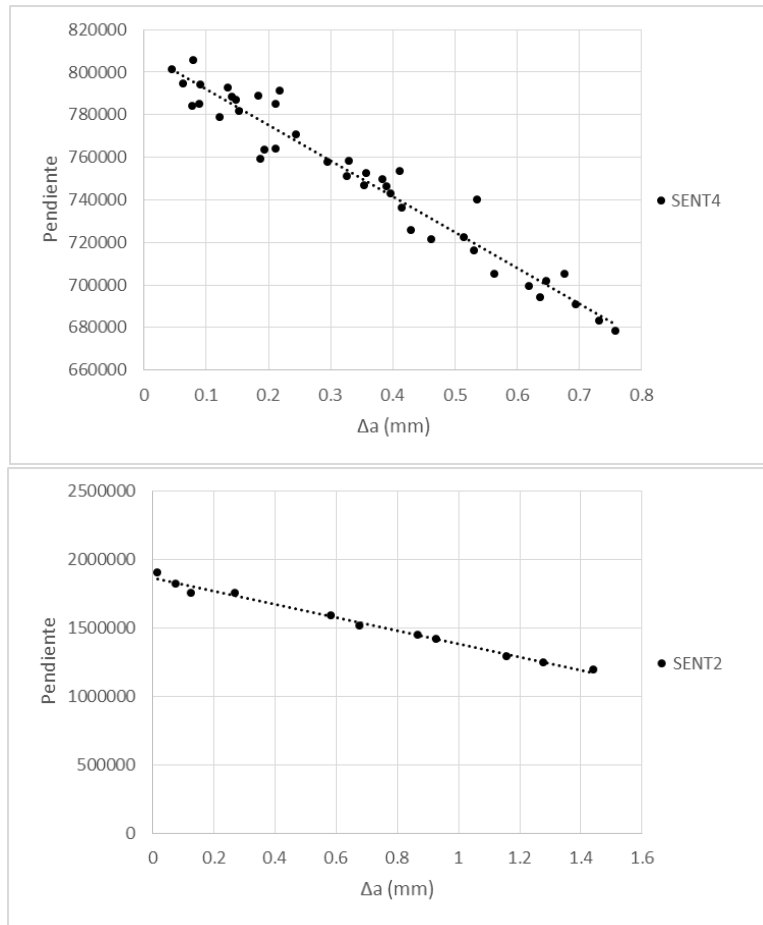


Fig. 5. Comparativa de la evolución de la pendiente a lo largo del ensayo en la probeta SENT4 y SENT2.

Tarea 2.3. Estudio de la Relación entre los Valores CTOD Calculados en Probetas SEN(B) y SEN(T)

En esta tarea se llevó a cabo un estudio del efecto de apertura de grieta como consecuencia de la plastificación mediante el cálculo la tenacidad a través del parámetro fracto-mecánico CTOD crítico (Crack Tip Opening Displacement).

Con la matriz de ensayos referida en el apartado anterior se llevaron a cabo los ensayos CTOD comparativos entre el ensayo nº1 en probetas SEN(B) y nº4 en las de geometría SEN(T):

Probetas empleadas para los ensayos CTOD.

	Codificación de probeta	Tipo de probeta	a/W	B (mm)	W (mm)	Método de ensayo
1	7031-1-SENB1	SENB	0.5	23	46	CTOD
4	7031-1-SENT1	SENT	0.5	23	23	CTOD

En lo que respecta a los ensayos CTOD, de las gráficas obtenidas se puede observar claramente un aumento de la carga para las probetas SEN(T), manteniéndose una elevada ductilidad, dando lugar a un consiguiente aumento del valor numérico de CTOD.

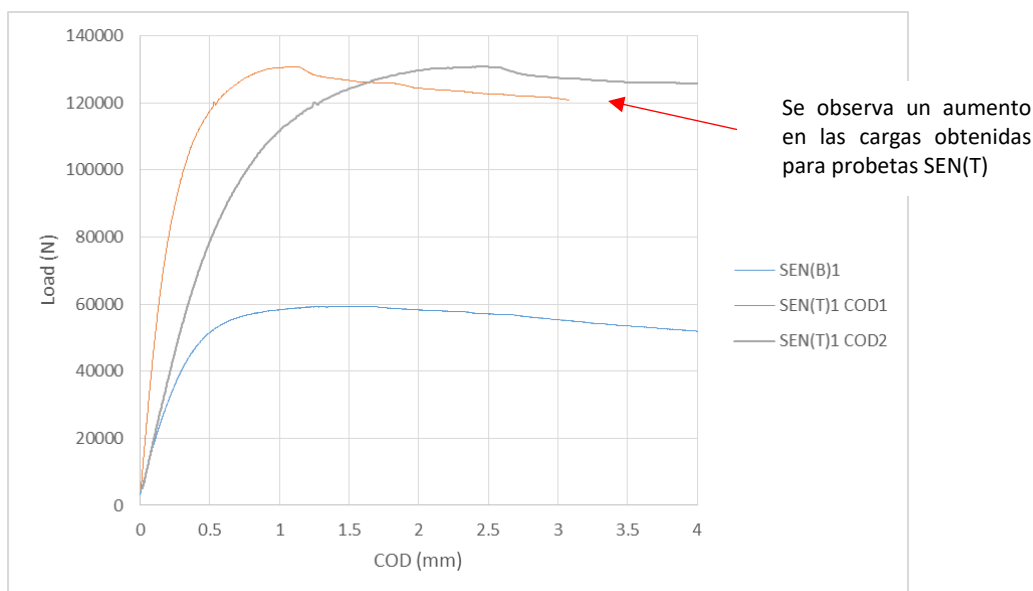


Fig. 6. Gráfica comparativa entre los CTOD para las probetas SEN(T) y SEN(B).

Como se puede ver en la gráfica comparativa, para el ensayo de la probeta SEN(T) se empleó la técnica del doble extensómetro (doble COD), lo cual implica la obtención de dos gráficas diferentes. Para calcular el valor numérico de CTOD a partir de estas gráficas se emplea la siguiente fórmula establecida por la norma BS 8571: 2014:

$$\delta = \frac{(1 - \nu^2)K_I^2}{2R_{p0.2}E} + \nu_{p1} - \frac{a_0 + z_1}{z_2 - z_1}(V_{p2} - V_{p1})$$

Los valores V_{p2} y V_{p1} serán extraídos de cada gráfica, mediante la colocación de dos extensómetros a diferentes alturas, como se puede ver en la siguiente figura.

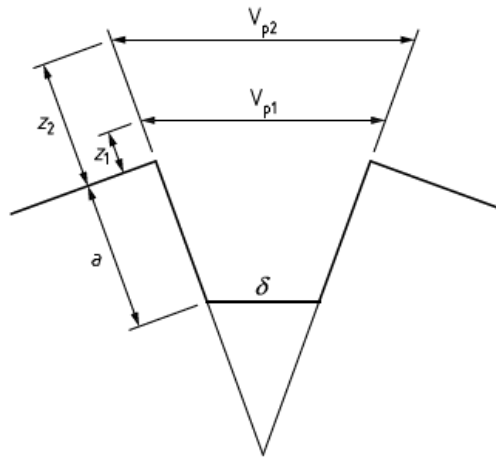


Fig. 7. Geometría de cálculo del CTOD con el método del doble extensómetro.

De cara al cálculo en probetas SENB se simplifica bastante el proceso, ya que no es necesario incluir dos extensómetros, de ahí que sólo aparezca una gráfica. La norma de referencia para el cálculo del CTOD en SENB es la ISO 12135, y la fórmula se muestra a continuación:

$$\delta_0 = \left[\frac{S}{W} \cdot \frac{F}{(BB_N W)^{0,5}} \cdot g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \cdot \frac{1 - \nu^2}{2R_{p0,2} E} + \frac{0,4(W - a_0)}{0,6a_0 + 0,4W + z} \cdot V_p$$

Los resultados obtenidos de esta comparativa se muestran en la siguiente tabla.

Probetas empleadas para los ensayos.

Codificación de probeta	Tipo de probeta	CTOD (mm)
7031-1-SENB1	SENB	0.42
7031-1-SENT1	SENT	0.84

El valor obtenido en el caso de la probeta SENT es del doble al obtenido en la probeta SEN(B). Esto quiere decir que, en caso de que este tipo de probetas reproduzcan con mayor fidelidad el comportamiento en servicio de las estructuras, esto dará lugar a un mejor ajuste a la hora del diseño, permitiendo usar espesores más finos, repercutiendo esto directamente en los costes de la obra.

A continuación se muestran las dos probetas empleadas en estos ensayos.

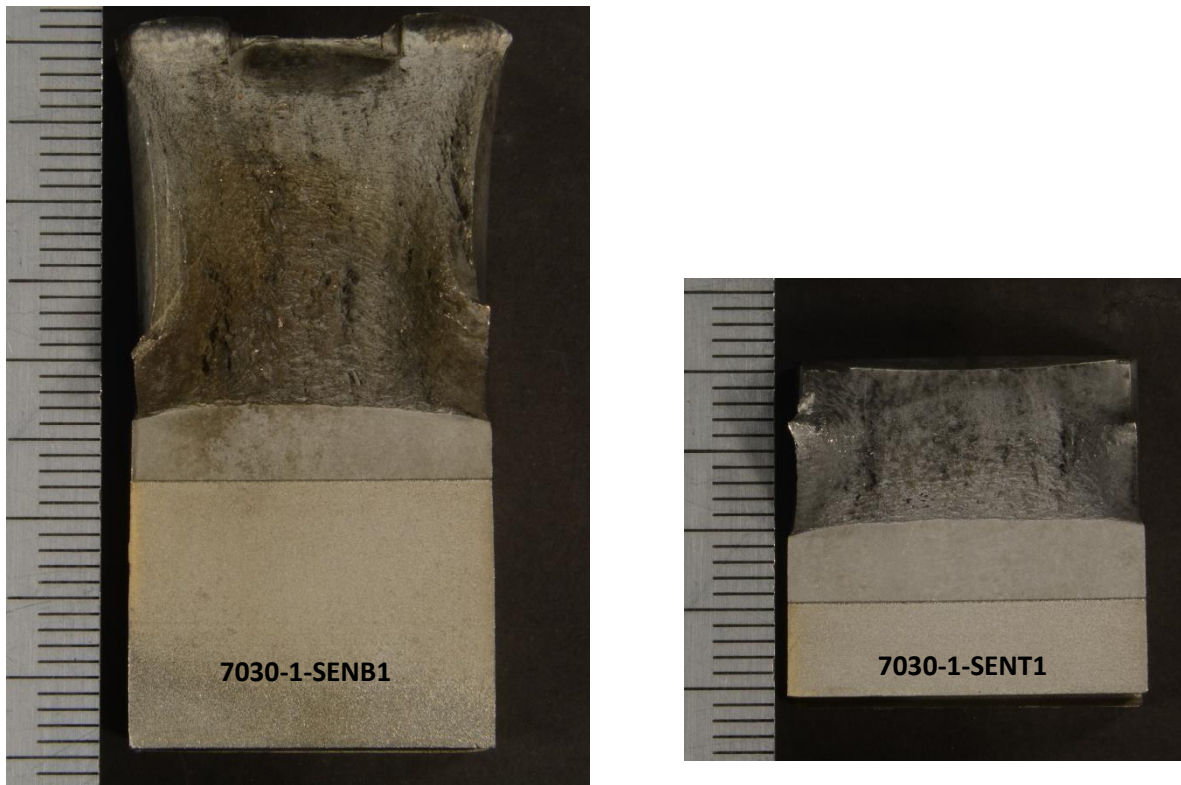


Fig. 8. Superficies de fractura ensayo CTOD.

Tarea 2.4. Cálculo de la J0.2BL y relación con los valores obtenido de la J0.2

En la primera fase de esta tarea se llevó a cabo la obtención de la curva de datos Carga-COD, tanto para geometrías SENB como SENT. Según los siguientes ensayos:

Probetas empleadas para los ensayos.

	Codificación de probeta	Tipo de probeta	a/W	B (mm)	W (mm)	Método de ensayo
2	7031-1-SENB2	SENB	0.3	23	46	J-cargas y descargas
5	7031-1-SENT2	SENT	0.3	23	23	J-cargas y descargas
6	7031-1-SENT3	SENT	0.5	23	23	J-cargas y descargas
7	7031-1-SENT4	SENT	0.5	23	23	J-cargas y descargas

Gracias a los ensayos CTOD llevados a cabo con anterioridad ya tenemos pistas sobre cuál será la diferencia principal entre ambas geometrías, permitiendo alcanzar la SENT unas cargas netamente mayores que la probeta SENB.

En esta tarea se lleva a cabo un estudio similar, ensayando en primer lugar la probeta SENB de cara a poder realizar un estudio comparativo más detallado.

Posteriormente se ensayaron probetas SENT, de cara a tratar de definir las condiciones óptimas para el ensayo de este material.

Se muestran a continuación las gráficas obtenidas en todos los casos:

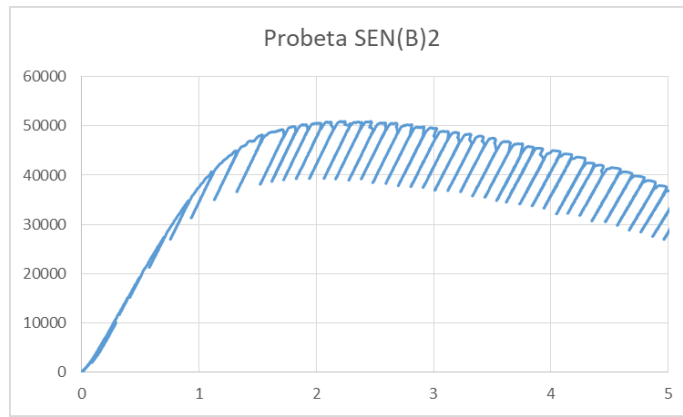


Fig. 9. Gráfica cargas-descargas SENB2.

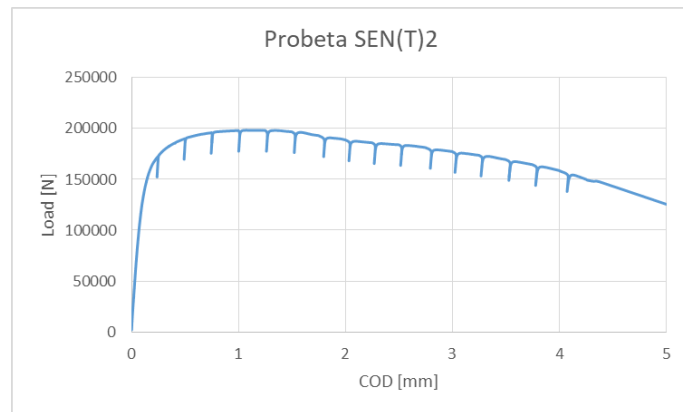


Fig. 10. Gráfica cargas-descargas SENT2.

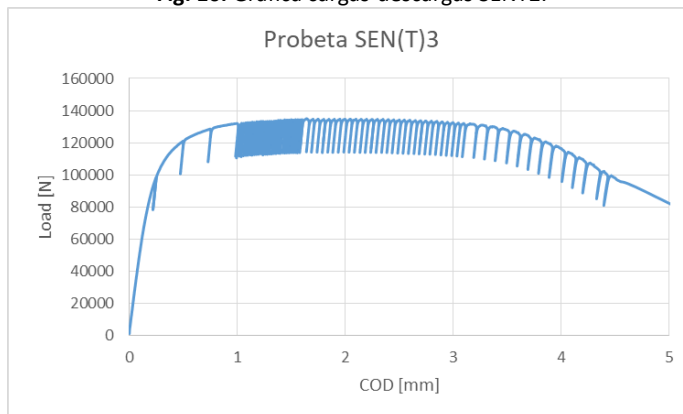


Fig. 11. Gráfica cargas-descargas SEN(T)3.

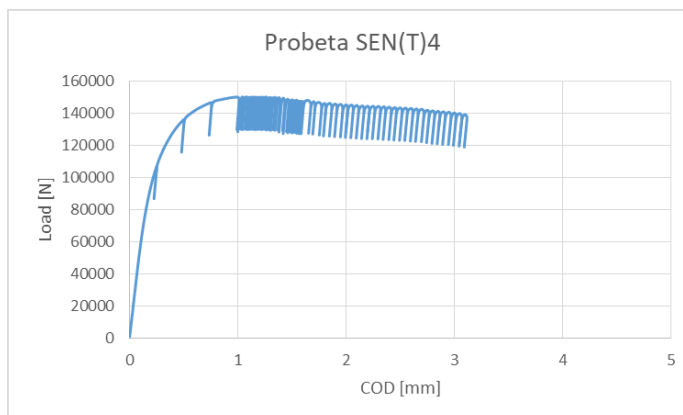


Fig. 12. Gráfica cargas-descargas SEN(T)4.

Se puede observar, de las gráficas anteriormente mostradas, un comportamiento ligeramente distinto. Mientras que en las SENT el gráfico pasa por una zona relativamente “estable” previa al crecimiento de la grieta, en las SENB se produce una caída en la carga nada más alcanzar su carga máxima, sin pasar por una zona “estable” (véase figura 9).

En la figura 13 se refleja con más detalle, para la probeta SENB y la SENT3, la diferencia de comportamiento de ambos tipos de geometría, según se explica en el párrafo anterior.

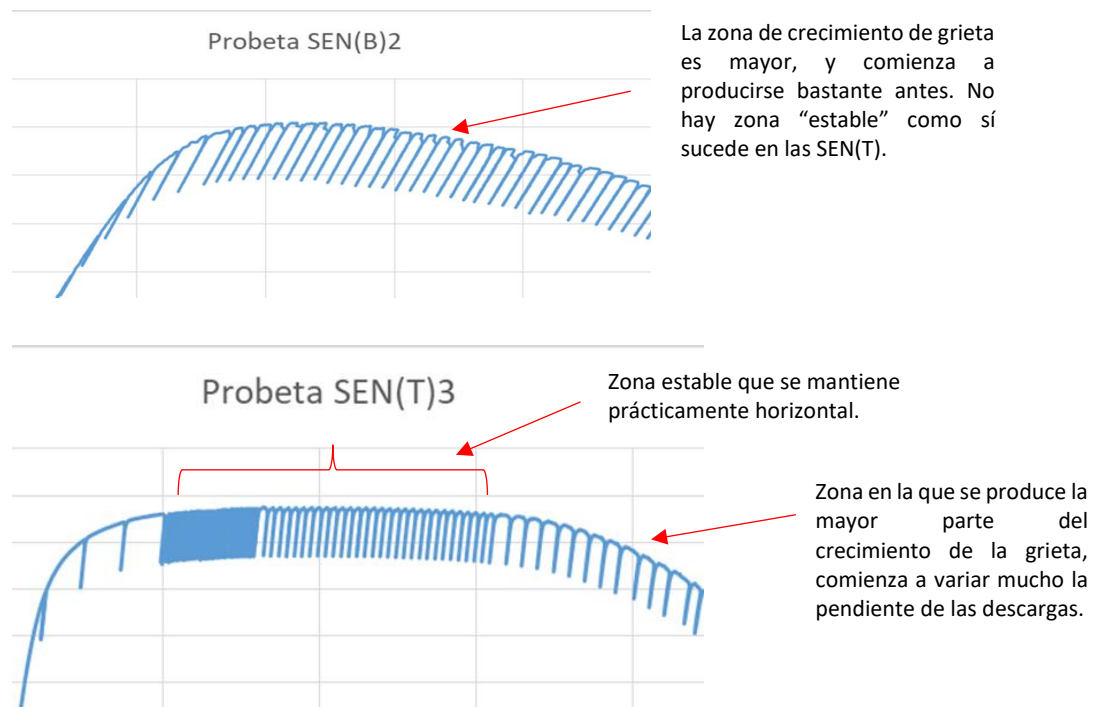


Fig. 13. Comparativa entre las gráficas obtenidas en probetas SEN(B) y en SEN(T).

Una vez se ha calculado la curva de datos Carga-COD, de acuerdo con el apartado 7 de la norma BS 8571: 2014 (“Determination of resistance curves δ - Δa and J- Δa ”) se determinaron las correspondientes curvas J- Δa para probetas SEN(T), según la siguiente fórmula:

$$J = J_{el} + J_{pl} = \frac{K^2}{E'} + \frac{\eta_p U_p}{B(W - a_0)}$$

En el caso de las probetas SEN(B) es el propio software el que obtiene las curvas J- Δa a partir de las correspondientes gráficas de cargas y descargas. Sin embargo, la fórmula dispensada para el cálculo de J se obtuvo de la norma ISO 12135:

$$J = J_{el} + J_{pl} = \left[\frac{FS}{(BB_N)^{0.5} W^{1.5}} g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \right]^2 \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1.9 U_p}{B_N (W - a_0)}$$

En la figura 14 se muestran las curvas J- Δa que se obtuvieron en aquellas probetas ensayadas durante el tiempo suficiente como para obtener el número necesario de descargas que den lugar a un crecimiento de grieta amplio. Los valores de J, calculados en este caso para las probetas SEN(T), se determinaron mediante la fórmula previamente citada, mientras que los valores de Δa se determinaron empleando el método desarrollado por Cravero y Ruggieri (“compliance method”).

El método de Cravero y Ruggieri permite la determinación del tamaño de la grieta durante el ensayo, en base a la variación de la pendiente de las sucesivas descargas.

Es conocido como “método de la flexibilidad” o, en inglés, “compliance method”, y se basa en la siguiente ecuación.

$$\frac{a}{W} = c_0 + \mu c_1 + \mu c_2 + \mu c_3 + \mu c_4 + \mu c_5$$

Donde los coeficientes están tabulados según la configuración de la probeta, y el valor de “ μ ” depende directamente del parámetro de flexibilidad “C”, obtenido de las pendientes de las descargas.

$$\mu = \frac{1}{1 + \sqrt{E'BC}}$$

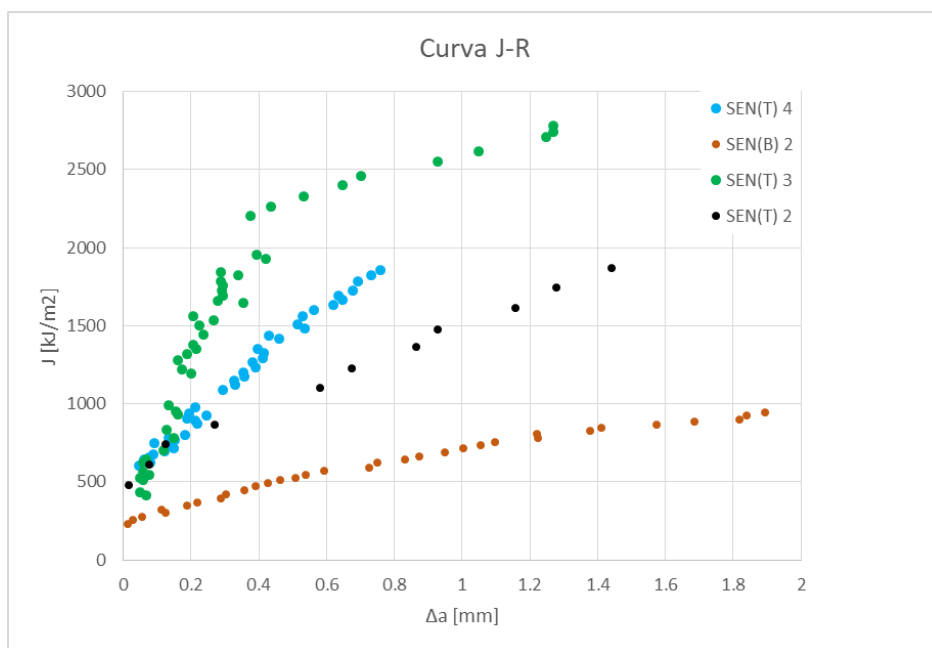


Fig. 14. Comparativa entre las gráficas J- Δa obtenida en probetas SENB y en SENT.

De las curvas representadas en esta gráfica se concluye que en la probeta SENT4 no se produce un crecimiento de grieta tan alto como en la SENT2 y la SENT3. Esto viene a confirmar que en los gráficos de cargas y descargas el principal crecimiento de grieta se produce cuando la carga comienza a descender de una forma más brusca.

No obstante, de cara a conocer el valor característico de tenacidad a fractura, no es necesario tener un número tan grande de puntos.

En el caso de la geometría SENT, de acuerdo con el apartado 7.6 de la BS 8571: 2014 (“Definition of the R-curve”), para conocer el valor $J_{0.2}$, es necesario trazar una paralela al eje Y en el punto 0.2 del eje X, siendo $J_{0.2}$ el punto de corte entre esta paralela y el gráfico J- Δa original.

Para el caso de las probetas SENB, en lugar de trazar una vertical en el punto 0.2, se traza una paralela a la pendiente, con lo cual el punto de intersección entre esta paralela y la curva definirá el valor conocido como $J_{0.2BL}$.

En las siguientes figuras extraídas de las respectivas normas se puede observar claramente el método de cálculo.

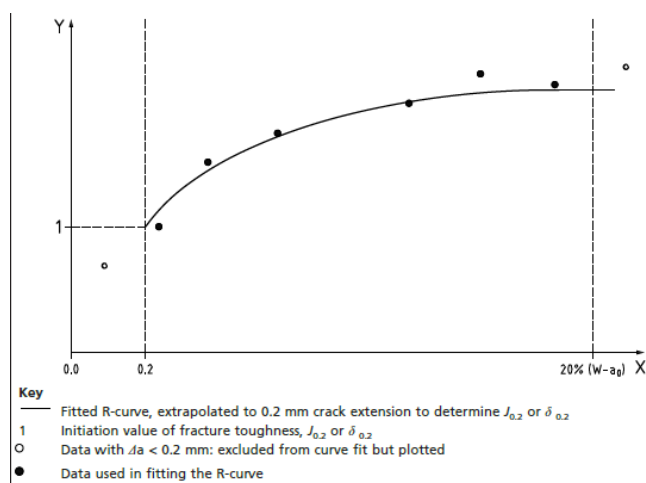


Fig. 15. Cálculo de $J_{0.2}$ según la norma BS 8571.

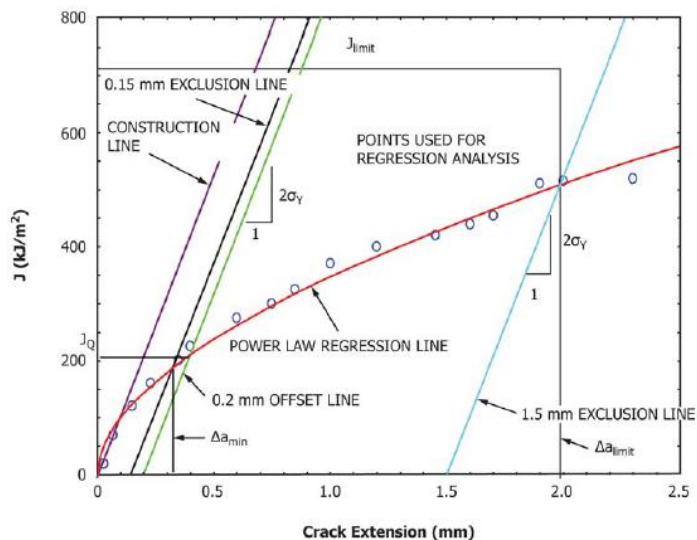


Fig. 16. Cálculo de $J_{0.2BL}$ según la norma ASTM E1820.

Tarea 2.5. Relación de los valores obtenidos de la integral J con los obtenidos del cálculo del CTOD.

Finalmente se ha llevado a cabo un estudio comparativo de los resultados obtenidos para los ensayos CTOD y los J.

Se debe tener en cuenta que, con respecto a las comparativas realizadas en ensayos J, al tratarse de un nuevo método de cálculo requiere de la realización de un mayor número de ensayos de cara a poner completamente a punto el proceso de cálculo. No obstante se han extraído resultados bastante fiables que nos dan una idea inicial de las diferencias existentes entre diferentes configuraciones de probeta. En esta gráfica se muestra la comparativa aplicando ensayos J.

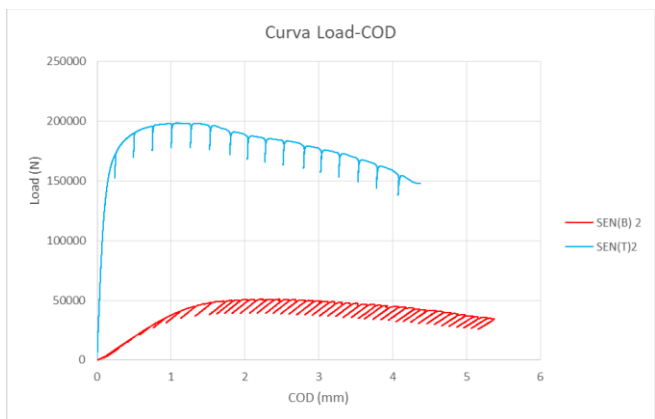


Fig. 17. Gráfica comparativa entre los gráficos carga-COD para las probetas SENT y SENB.

A continuación se muestra la comparativa entre los valores de $J_{0.2}$ obtenidos tanto en probetas SEN(B) como en SEN(T).

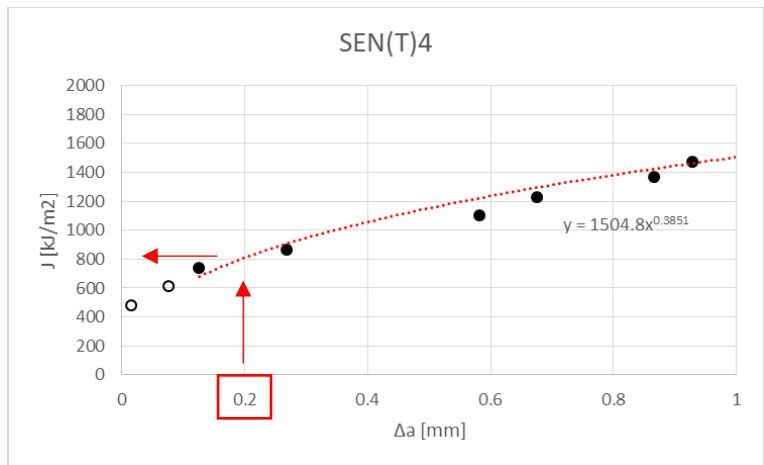


Fig. 18. Ejemplo de cálculo de $J_{0.2}$ en probetas SEN(T).

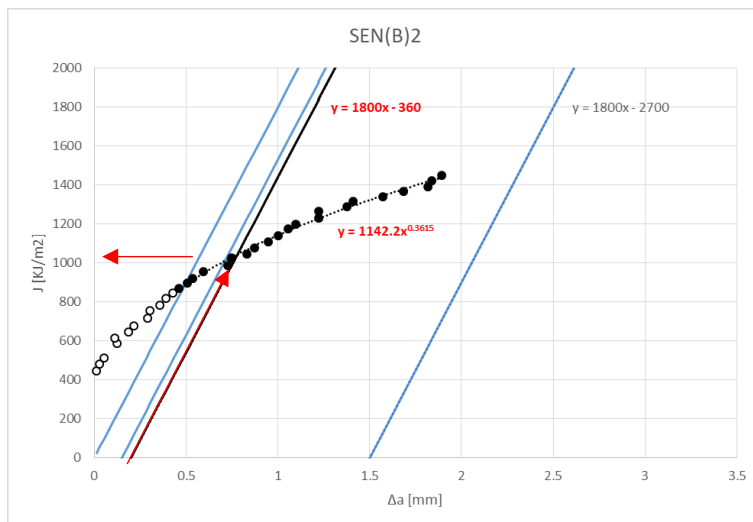


Fig. 19. Ejemplo de cálculo de $J_{0.2}$ en probetas SEN(B).

En la tabla siguiente se muestra la matriz de resultados para los 6 ensayos realizados:

Tabla 2. Probetas empleadas para los ensayos.

Codificación	$J_{0.2}$ [kJ/m ²]	CTOD [mm]	a/W
SEN(B)1	-	0.42	0.5
SEN(B)2	519	-	0.3
SEN(T)1	-	0.84	0.5
SEN(T)2	810	-	0.3
SEN(T)3	1472	-	0.5
SEN(T)4	883	-	0.5

En la bibliografía consultada, se pudo observar como para las probetas SENT los valores de tenacidad son más elevados que en las probetas SENB. Estos ensayos sirven para confirmar que, efectivamente, las probetas SENT arrojan unos valores de tenacidad mucho más altos, del orden del doble.

En las siguientes gráficas se representan los valores medios tanto de J como de CTOD obtenidos en los ensayos, en los que se puede ver de forma muy clara las diferencias entre distintas geometrías de probeta.

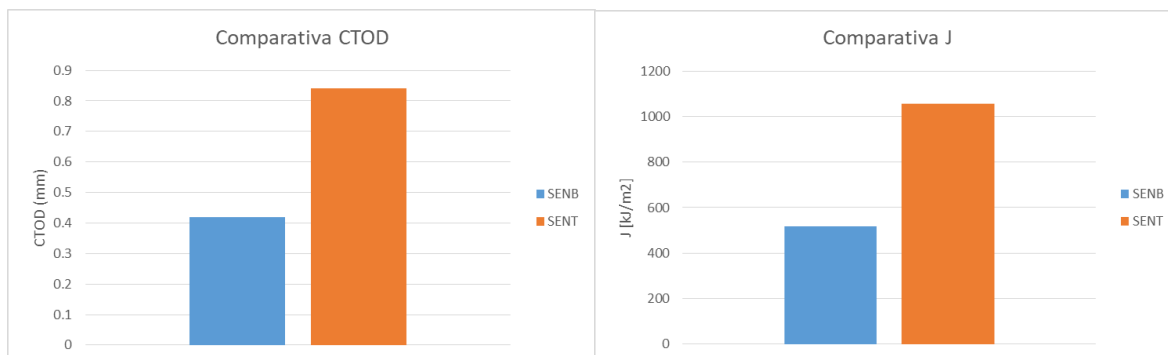


Fig. 20. Comparativa entre los valores de J y CTOD para ambas geometrías

A continuación se pueden observar las gráficas Carga-COD de todas las probetas SEN(T) ensayadas, tratando de analizar posibles diferencias que hayan derivado en resultados posiblemente relativamente dispersos.

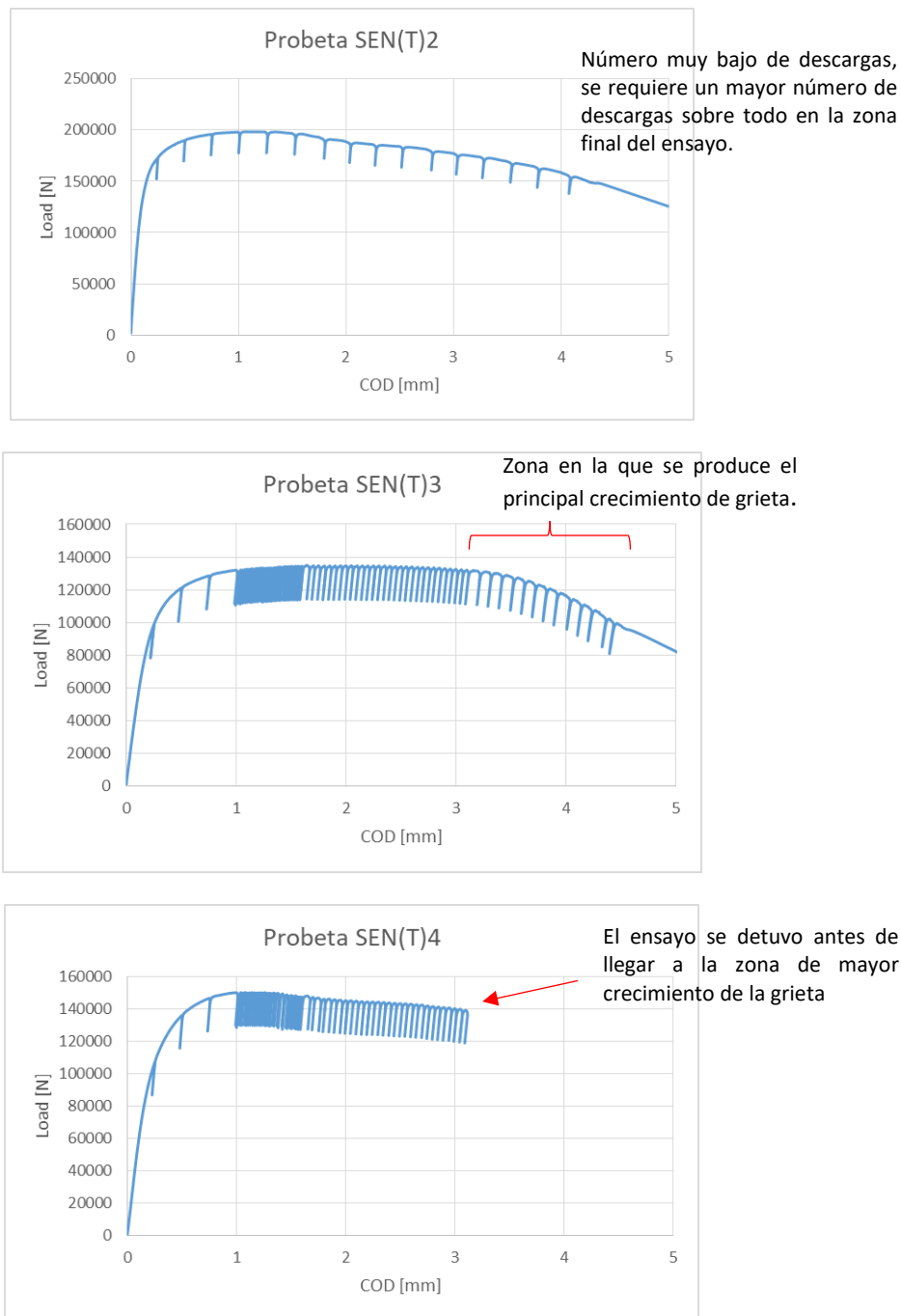


Fig.13. Ejemplo de cálculo de J0.2 en probetas SEN(B).

En primer lugar, se observa claramente que la probeta SEN(T)2 alcanza cargas notablemente superiores que el resto. Esto es debido a que la relación de tamaño de la grieta (a/W) es de 0.3, mientras que en las otras probetas se empleó una relación de 0.5.

Curiosamente la probeta SEN(T)3, en la cual se realizó gran número de descargas y se aguantó hasta la rotura completa de la probeta, es donde se obtienen unos resultados más lógicos.

A priori la probeta SEN(T)4 se realizó exactamente de la misma forma, pero en este caso se detuvo el ensayo sin dejar que se produjera la rotura completa de la probeta.

De cara al futuro, será interesante ceñirse a los resultados de este estudio de cara a afinar lo máximo posible en la realización de estos ensayos. Lógicamente la estructura empleada en la probeta SEN(T)3, con gran número de descargas y dejando la probeta ensayar hasta la rotura, parece ser la más orientativa, por lo que los estudios a realizar en un futuro se basarán en estos resultados obtenidos.

Será interesante, además, observar el comportamiento de una probeta SEN(T) con relación de grieta de 0.3 con un número de descargas similar al empleado en la SEN(T)3 y SEN(T)4, y observar así el efecto del tamaño de grieta en la tenacidad obtenida. Muchas normas dan rangos de relación de grieta que teóricamente no deberían influir en el resultado obtenido en un porcentaje excesivamente alto.

Por tanto, como conclusiones se puede destacar:

- Los valores de tenacidad, tanto de CTOD como de J, son muy superiores en el caso de las probetas SENT. Esto permite un mejor ajuste de diseño, teniendo en cuenta que esta geometría SENT reproduce mejor el comportamiento en servicio de la estructura para un gran número de casos.
- Un gran número de descargas en la zona correcta del ensayo son beneficiosas de cara a la obtención de resultados fiables.
- Parece ser que un mayor número de descargas modifican el comportamiento de la probeta, ya que en la gráfica de la probeta SEN(T)2 se observa un descenso de la carga nada más alcanzar su valor máximo, mientras que en las probetas restantes, en las que se realizaron mayor número de descargas, se observa una zona de estabilización de la carga una vez que se alcanzó la carga máxima.
- El número de descargas al principio del ensayo se puede limitar bastante, ya que no se está produciendo crecimiento alguno de la grieta, dando lugar así a una importante reducción en los tiempos de ensayo.
- No parece existir una gran diferencia debida al tamaño de grieta (0.3 vs. 0.5), aunque esto habría que corroborarlo con la realización de más ensayos.
- Se tratará, próximamente, de buscar la mayor repetibilidad posible en el resultado de los ensayos, estableciendo unas bases de realización de los mismos, así como tratando de obtener las mejores condiciones posibles de desarrollo de dichos ensayos.

De cara a continuar con estos estudios, se recomendaría seguir la vía establecida en la probeta SEN(T)3, con un gran número de descargas y dejando que el ensayo continúe hasta el fallo de la probeta, con el objetivo de asegurar un suficiente crecimiento de grieta. Una vez obtenida cierta similitud en los resultados, se podrá ir modificando diferentes parámetros como la relación a/W entre otros.

4. CONCLUSIONES

En relación con la primera fase del proyecto, en la que se han desarrollado nuevos métodos de caracterización a fractura para uniones soldadas de gran tamaño se ha desarrollado un procedimiento para entallado en ZAT de aplicación en la industria offshore.

Tras los trabajos realizados se ha concluido en el método más adecuado para la generación de grietas en la aplicación de este procedimiento es la técnica de electroerosión. Determinando, a su vez, que el uso de una combinación de entalla Chevron y compresión local generan las tensiones adecuadas en este proceso.

En relación con la medición del avance de grieta, mediante la aplicación de este procedimiento se ha determinado:

- Las diferencias de los valores reales con los aportados por el software INSTRON da/dN son menores al 1%.
- La intensidad de tensiones no influye mientras el factor de intensidad de tensiones no supere los 50 MPavm.
- La frecuencia de onda no puede superar los 15 Hz en la fase de prefatiga.
- La de interceptación de la pregrieta en la zona de entalla no se ve afectada por el espesor de la chapa.

En lo que respecta a la segunda fase del proyecto en la que se busca desarrollar un procedimiento para el cálculo de la integral J y el parámetro CTOD en probetas SENT se ha concluido que es necesario:

- Establecer un procedimiento de montaje de las probetas basado en el mecanizado del utillaje que permita un agarre por bulón para poder hacer pruebas en la cámara de temperatura.
- Asegurar un perfecto alineamiento de la máquina para alcanzar resultados reproducibles.

En lo que respecta al tipo de probetas para llevar a cabo los ensayos comparativos se han seleccionado probetas tipo "pin-loaded" ya que permiten una mayor adaptación y facilidad de uso respecto a las "clamped".

Como trabajo inicial, antes de comenzar con los ensayos CTOD se llevó a cabo el diseño de un programa básico para obtener el valor de la integral J y el incrementos del tamaño de la grieta en probetas tipo SEN(T).

Con la determinación del valor de integral J para las distintas geometrías estudiadas SEN(B) y SEN(T) se concluye que las tipo SENT ofrecen una zona de estabilidad previa al crecimiento de grieta respecto a las SENB lo que supone que el crecimiento de grieta tendrá lugar más avanzado el ensayo, lo que implica mayores tiempos de ensayo y un nuevo ajuste de la localización de las descargas (cabe destacar que las descargas realizadas antes de que se comience a producir el crecimiento de grieta carecen de validez alguna, por lo que lo ideal es eliminarlas).

En lo que respecta a los estudios comparativos entre las distintas probetas tipo SENT, como se explica en la T2.5, parece que lo más adecuado es aplicar un gran número de descargas hasta el fallo de la probeta para asegurar un adecuado crecimiento de grieta con resultados reproducibles.