

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIA E INGENIERÍA DEL TERRENO Y DE
LOS MATERIALES**



TESIS DOCTORAL

***INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE VASIJAS NUCLEARES EN BASE A LA
CURVA PATRÓN OBTENIDA MEDIANTE PROBETAS RECONSTRUIDAS***

Autor:

DIEGO FERREÑO BLANCO

Directores:

IÑAKI GORROCHATEGUI SÁNCHEZ

FEDERICO GUTIÉRREZ-SOLANA SALCEDO

Tesis Doctoral presentada en la Universidad de cantabria para la obtención del Título
de Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Santander, octubre de 2007

Capítulo 3 Materiales y metodología experimental

3.1 Introducción

En este capítulo se describe con detalle la naturaleza y propiedades de los materiales investigados en esta tesis; además, se detallan las actuaciones experimentales llevadas a cabo sobre dichos materiales, de acuerdo con el resumen de actividades y objetivos a satisfacer presentado en el Capítulo 1. La presentación y análisis pormenorizado de los resultados será expuesta en el Capítulo 4.

El objetivo fundamental de este trabajo experimental consiste en obtener una caracterización del comportamiento frente a rotura del acero procedente de una vasija de central nuclear española actualmente en funcionamiento, operando en la ZTDF, de acuerdo con el procedimiento de la Curva Patrón. Teniendo en consideración que el trabajo será desarrollado sobre un material particularmente escaso, y por ello valioso, se decidió añadir una fase preliminar al proceso destinada a la preparación y adiestramiento del equipo humano en los procedimientos empíricos y analíticos, ciertamente novedosos, aquí contemplados. En este sentido, a fin de validar la calidad de los resultados alcanzados, fue seleccionado un acero de referencia cuyo comportamiento en la ZTDF ha sido perfectamente caracterizado en el pasado desde el punto de vista de la Curva Patrón. En lo sucesivo se distinguirá entre los dos materiales analizados en esta tesis: por un lado el acero de referencia, “material complementario”, y, por el otro, el acero procedente de la planta en funcionamiento, “material de interés”.

3.2 Material complementario

Puesto que la vasija a presión del reactor de una central nuclear es el elemento estructural más importante desde el punto de vista de la seguridad, la Agencia Internacional de la Energía Atómica (*International Atomic Energy Agency, IAEA*) ha establecido un grupo internacional de trabajo²⁰ el cual ha desarrollado una serie de Proyectos Coordinados de Investigación (*Co-ordinated Research Projects, CRPs*) y generado una base de datos con información de los programas de vigilancia de diversos países. El objetivo fundamental de los CRPs y de la base de datos consiste en recolectar toda la información disponible de los programas de vigilancia de forma que resulten de utilidad para el caso concreto de un país o de una planta. La base de datos comenzó a elaborarse en 1996 y, hasta la fecha, se han incluido los datos de programas de vigilancia de diez países.

De particular interés en el contexto de esta tesis son los siguientes CRPs:

- CRP-3: “Optimising Reactor Pressure Vessel Surveillance Programmes and their Analysis”
- CRP-4: "Assuring Structural Integrity of Reactor Pressure Vessels"
- CRP-5: “Surveillance Programmes Results Application to RPV Integrity Assessment”
- CRP-7. “Evaluation of Radiation damage of RPV using IAEA DB on RPV materials”
- CRP-8. “Master Curve Approach to monitor the Fracture Toughness of RPV in NPPs”

Como consecuencia de estos trabajos se ha generado una bibliografía específica [93-96] de gran interés para la evaluación de los procesos de degradación así como de las

²⁰ International Working Group on Lifetime Management of NPPs

condiciones de integridad estructural de las vasijas de los reactores nucleares. Tras completarse los CRPs 1 y 2, atendiendo a la amplia variedad de aceros históricamente utilizados, se recomendó el uso de un material de referencia para facilitar la comparación de resultados procedentes de distintos proyectos. El uso del material adoptado como referencia, denominado acero JRQ, ha sido internacionalmente reconocido en el sector nuclear y es empleado actualmente por numerosas organizaciones investigadoras.

Este material, presente en varias vasijas actualmente en operación, se corresponde con un acero laminado cuya especificación ASME es A533 B1 [97]. Sus propiedades resultan perfectamente conocidas como consecuencia de la extensa y detallada caracterización llevada a cabo en el contexto de los CRP-3 y CRP-4. El CRP-3 se concentró en la evaluación del material JRQ mediante ensayos Charpy, es decir, de acuerdo con los procedimientos clásicos; los resultados de tenacidad a fractura constituyeron tan sólo una prioridad secundaria para algunos de los participantes. El CRP-4, por su parte, se orientó hacia la determinación de la tenacidad a fractura del acero JRQ mediante ensayos estáticos sobre probetas Charpy prefisuradas, en la línea de la metodología de la Curva Patrón. La referencia [93] presenta la información generada por todos los participantes en los proyectos CRP-3 y CRP-4. Además, se dispone para el presente trabajo de la información acerca del comportamiento del material JRQ procedentes de los ensayos practicados en el LADICIM²¹-UC²² para la elaboración de la referencia [60].

En este Apartado 3.2 se resume la información desprendida de los CRPs junto con la descripción de los procedimientos experimentales practicados sobre el material complementario en el contexto de esta tesis.

²¹ Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería del Terreno y los Materiales.

²² Universidad de Cantabria.

3.2.1 Descripción del acero JRQ en estado de recepción

En el caso de los ensayos realizados en [60] el acero JRQ se recibió en forma de plancha de dimensiones $1000 \times 330 \times 137 \text{ mm}^3$ acompañadas del correspondiente certificado de fabricación, proporcionado por la compañía siderúrgica *Japan Steel Works*. Los trabajos descritos por la IAEA [93], por su parte, se basaron en planchas de $3000 \times 2000 \times 225 \text{ mm}^3$. En ambos casos, las piezas fueron divididas en bloques más reducidos (en el caso de la IAEA de $150 \times 150 \times 225 \text{ mm}^3$) a partir de los cuales fueron mecanizadas las probetas. La dirección correspondiente a los 225 mm es la que se corresponde con el espesor de la placa.

3.2.1.1 Composición química

La Tabla 3.1 [60] recoge la composición química del acero permitiendo la comparación de la composición en colada, garantizada por el fabricante, con los valores dados por la especificación correspondiente. Como puede apreciarse, todos los valores satisfacen los requisitos de composición.

Tabla 3.1 Composición química del acero JRQ (% en peso) [60]

Elemento	Especificación ASME A533	Colada
C	0,250 máx.	0,200
Si	0,150 / 0,300	0,220
Mn	1,150 / 1,500	1,440
P	0,015 máx.	0,008
S	0,015 máx.	0,007
Mo	0,450 / 0,600	0,490
Ni	0,400 / 0,700	0,590
Al	0,005 / 0,050	0,028
Cu	0,100 máx.	0,040
V	0,050 máx.	< 0,010
Cr	0,300 máx.	0,160

3.2.1.2 Historial térmico

El acero de referencia fue sometido a un tratamiento térmico de temple seguido de uno de revenido considerado como adecuado para obtener las características mecánicas requeridas para su utilización. En la Figura 3.1 se detallan los principales parámetros que describen el tratamiento completo, información proporcionada por *Japan Steel*

Works. El conocimiento del tratamiento térmico recibido es necesario debido a la posible alteración que las propiedades del material pueden experimentar durante el proceso de soldadura necesario para la reconstrucción de probetas.

El tratamiento de los aceros IAEA [93], más complejo, queda desglosado en cuatro etapas: un normalizado a 900°C, seguido de un temple desde 880°C, un revenido a 665°C durante 12 horas para finalizar con un tratamiento atenuador de tensiones residuales a 620°C durante 40 horas.

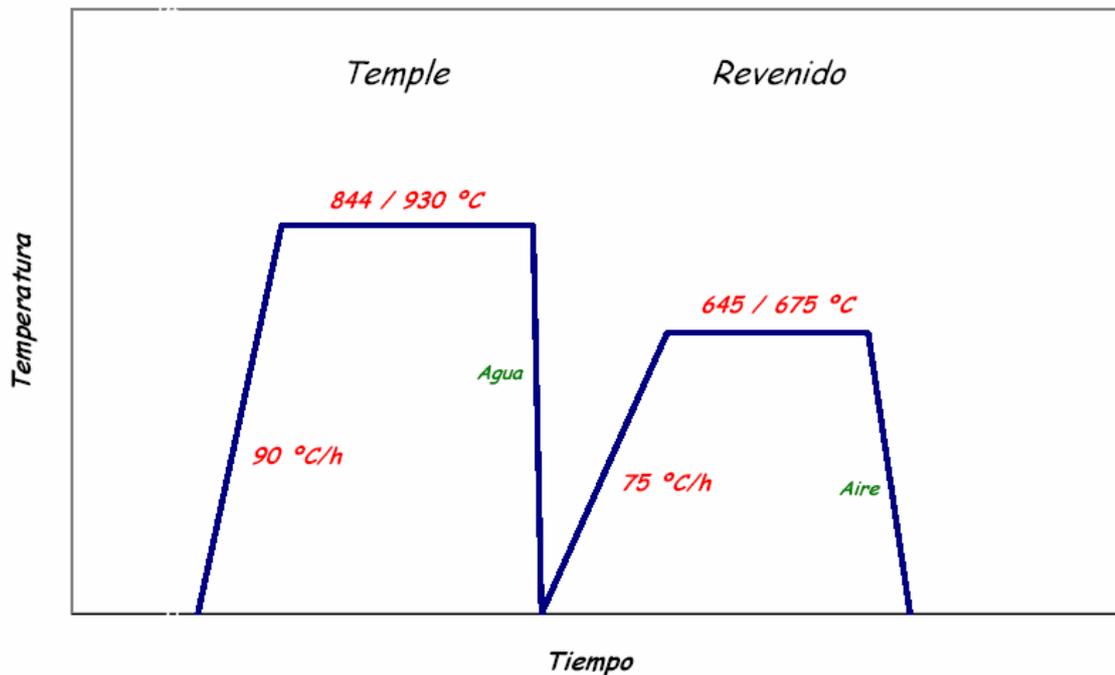


Figura 3.1 Tratamiento térmico recibido por el acero JRQ [60]

3.2.1.3 Despiece y mecanizado

Cada una de las planchas recibidas fue despiezada en chapones de dimensiones manejables con aristas orientadas según las direcciones principales de la lámina, a partir de los cuales se procedió a la obtención de probetas en diversas orientaciones. La Figura 3.2 presenta las denominaciones de dichas direcciones según la normativa ASTM [60, 67]. La profundidad de extracción de las probetas se realizó a 1/4 del espesor total del bloque, siguiendo las recomendaciones hechas por la IAEA [93] (este punto será analizado más adelante).

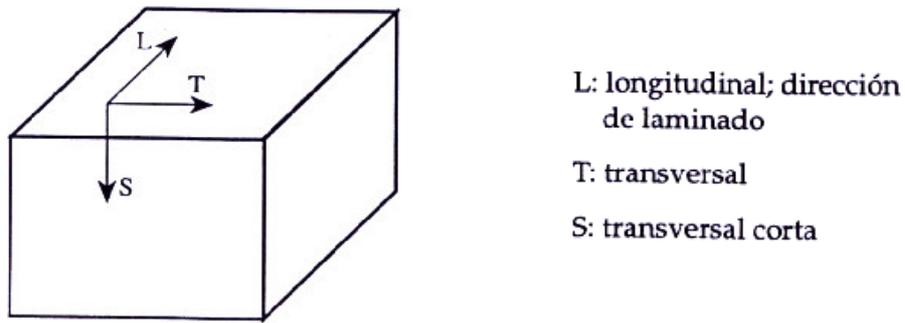


Figura 3.2 Denominación de las direcciones principales las planchas [60, 67]

Análogamente, la orientación final de las probetas fue practicada de acuerdo con las recomendaciones ASTM [67] por medio de un código de dos letras en el cual la primera de ellas indica la dirección principal de tracción, mientras que la segunda determina la dirección de propagación de fisura. En la Figura 3.3 [67] puede apreciarse un ejemplo detallado de nomenclatura de dichas probetas.

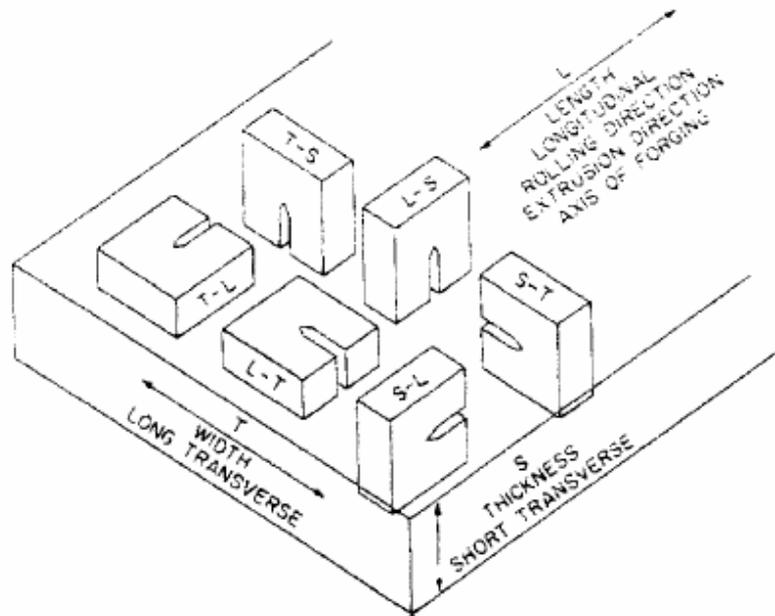


Figura 3.3 Denominación ASTM de la orientación de probetas tipo C [67]

El acero JRQ ha sido caracterizado desde el punto de vista convencional, incluyendo un estudio microestructural y mecánico, así como en sus propiedades de fractura. La caracterización mecánica convencional incluye ensayos de tracción según diferentes direcciones junto con ensayos de microdureza. El análisis en fractura comprende ensayos de impacto Charpy y de tenacidad cuasi-estática en la zona de transición. Estos

últimos servirán como referencia para validar, en el contexto de esta tesis, el proceso de reconstrucción sobre material complementario mediante la comparación de los valores de temperatura de referencia T_0 . De esta forma se completa la etapa preliminar anteriormente mencionada destinada a la validación de las técnicas experimentales y al adiestramiento del personal responsable. El material de los soportes de las probetas reconstruidas ha sido obtenido de chapones del mismo acero JRQ.

3.2.2 *Caracterización convencional*

En este apartado se resumen las características microestructurales y mecánicas del acero JRQ a partir de las fuentes [60] y [93].

3.2.2.1 *Caracterización microestructural*

Para la caracterización microestructural se llevó a cabo un estudio metalográfico por técnicas de microscopía óptica y electrónica de barrido (SEM), realizándose micrografías según tres planos perpendiculares, LT, LS y TS. La preparación de las muestras se realizó mediante pulido, comenzando con papel de desgaste de tamaño de grano grueso para continuar progresivamente con otros cada vez más finos hasta finalizar con calidad de alúmina para alcanzar un acabado especlar. Seguidamente se practicó un ataque con Nital 3 (disolución de ácido nítrico en alcohol al 3%) durante 3 segundos.

Las micrografías practicadas revelaron una estructura de bainita revenida sin orientación preferencial marcada de los granos en ninguna de las direcciones. De ello se deduce que el grado de laminación no ha sido intenso. En la Figura 3.4 [60] puede apreciarse, a modo de ejemplo, algunas de las micrografías obtenidas (en los planos LS y TS, respectivamente).

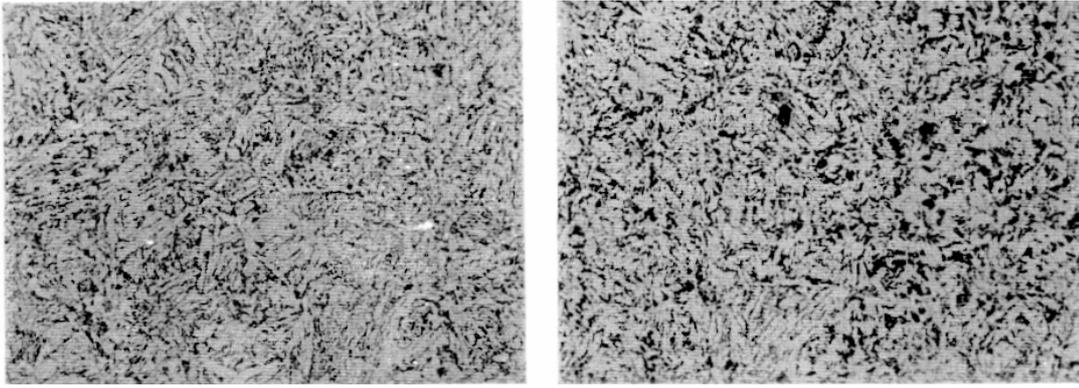


Figura 3.4 Metalografía por microscopía óptica del acero JRQ, orientaciones LS y TS ($\times 400$ aprox.) [60]

3.2.2.2 Caracterización mecánica

Las mediciones de microdureza practicadas se realizaron, de acuerdo con las disposiciones contenidas en [98], en un microdurómetro Vickers aplicando cargas de 200 gramos durante un tiempo de 20 segundos. Tomando medidas en distintas posiciones y según tres planos perpendiculares se obtuvieron valores de dureza que se encuentran entre los 205 y 230 HV, presentando una media y desviación estándar, respectivamente, de 214 ± 5 HV. Estos valores son acordes con la estructura de bainita revenida determinada en el análisis microestructural. La información recopilada por la IAEA [93], tras realizar medidas de dureza Vickers en el material JRQ, ofrece un valor medio de la dureza para dicho material de aproximadamente 206 HV, en franca concordancia con los ensayos mencionados.

Los ensayos de tracción fueron practicados, de acuerdo con [99], sobre probetas de fuste cilíndrico con una sección de 10 mm de diámetro. Se realizaron ocho ensayos a temperatura ambiente en las direcciones transversal (T) y longitudinal (L), respectivamente, obteniendo las correspondientes curvas tensión–deformación y, a partir de ellas, los valores medios del límite elástico convencional del 0,2%, $\sigma_{Y,0.2\%}$, de la resistencia a tracción, σ_U , y de la deformación bajo carga máxima, $\epsilon_{s,max}$, que se reflejan en la Tabla 3.2 [60]. Puede apreciarse una ligera diferencia entre los valores del límite elástico en función de la orientación, siendo superior en la orientación T.

Según la norma ASTM 185 [56] referente a los Programas de Vigilancia en reactores de agua ligera, las probetas deben mecanizarse siempre que sea posible a 1/4 del espesor del bloque por considerar que se trata de la ubicación más representativa. Este extremo ha sido investigado en los trabajos practicados por la IAEA [93] incluyendo para ello probetas extraídas de diferentes profundidades. Los ensayos de tracción llevados a cabo, (con probetas de diámetro comprendido entre 3 y 6 mm), permitieron, además, evaluar el efecto de la orientación de la probeta y de la temperatura de ensayo en las propiedades mecánicas del acero JRQ.

Tabla 3.2 Parámetros mecánicos del acero JRQ [60]

Orientación	$\sigma_{Y,0.2\%}$ (MPa)	σ_U (MPa)	$\epsilon_{s,max}$ (%)
L	486	623	9.1
T	521	636	7.7

Ambas orientaciones, longitudinal y transversal, fueron ensayadas en el CRP-3. En la Figura 3.5 [93] se observa la dependencia de las propiedades mecánicas (límite elástico convencional del 0.2%, $R_{p,0.2}$ y tensión de rotura, R_m , en la notación propia de la IAEA) respecto de la temperatura, para probetas obtenidas a 1/4 de espesor en ambas orientaciones. Como se puede ver, no se apreciaron diferencias significativas entre ambas orientaciones, quedando las existentes comprendidas dentro de las desviaciones estadísticas. Teniendo en cuenta estos resultados pueden asumirse como coherentes los recogidos en la Tabla 3.2, donde las diferencias que se aprecian entre direcciones L y T pueden achacarse a la inevitable incertidumbre experimental.

El ajuste polinómico proporcionado por la IAEA, que define la dependencia del límite elástico del 0.2%, $R_{p,0.2}$, en MPa, en ambas direcciones, con la temperatura, en ($^{\circ}C$), es el que se recoge en la expresión (3.1).

$$R_{p,0.2\%} = 4 \cdot 10^{-8} \cdot T^4 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 + 3.6 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 5.43 \cdot 10^{-1} \cdot T + 490,29 \quad (3.1)$$

Se dispone, además, de otras expresiones para la dependencia del límite elástico del acero JRQ, orientación L, con la temperatura distinguiéndose además entre material irradiado (fluencia de $0.354 \cdot 10^{19} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$, ($E > 1 \text{ MeV}$)) o sin irradiar, como puede observarse en las expresiones (3.2) y (3.3). La fórmula (3.2) fue establecida al comienzo

del CRP-4 como referencia para todos los participantes, mientras que la (3.3) procede de los ajustes realizados en el contexto del CRP-3.

Acero JRQ sin irradiar:
$$\sigma_Y = 291 + \frac{5555}{T + 273} \quad (3.2)$$

Acero JRQ irradiado:
$$\sigma_Y = 457.9 + 110.3 \cdot e^{-\frac{T}{418.2}} \quad (3.3)$$

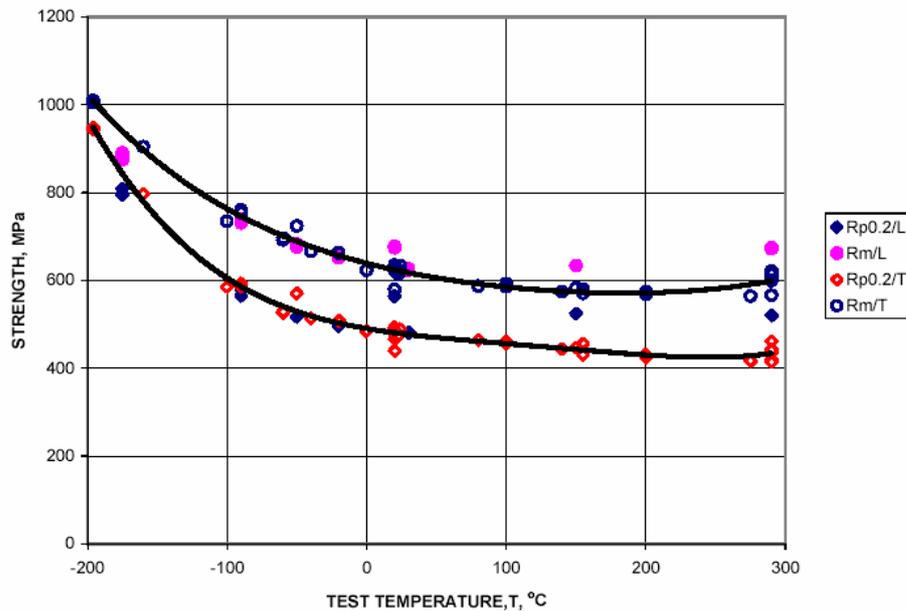


Figura 3.5 Dependencia del límite elástico y tensión de rotura con la temperatura del acero JRQ en las orientaciones T y L, respectivamente [93]

Ambas fórmulas (3.2) y (3.3) proporcionan el valor del límite elástico, σ_Y , en MPa introduciendo la temperatura en ($^{\circ}C$). Sustituyendo $T = 20^{\circ}C$ en (3.2) se llega a $\sigma_Y \approx 481 MPa$, que coincide muy bien con los valores de la Tabla 3.2 [60]. Las expresiones (3.1) y (3.2) se comparan en la Figura 3.6, en la cual se han incluido los puntos experimentales de la Tabla 3.2.

La Figura 3.7 [93] permite cuantificar la capacidad plástica del material, expresada en términos de la elongación sobre 5 diámetros A_5 , y la reducción de área Z , ambos en (%). Los ensayos fueron realizados con probetas en las direcciones L y T, extraídas a

una profundidad de $\frac{1}{4}$ del espesor, no apreciándose tampoco en este caso diferencias significativas en función de la orientación.

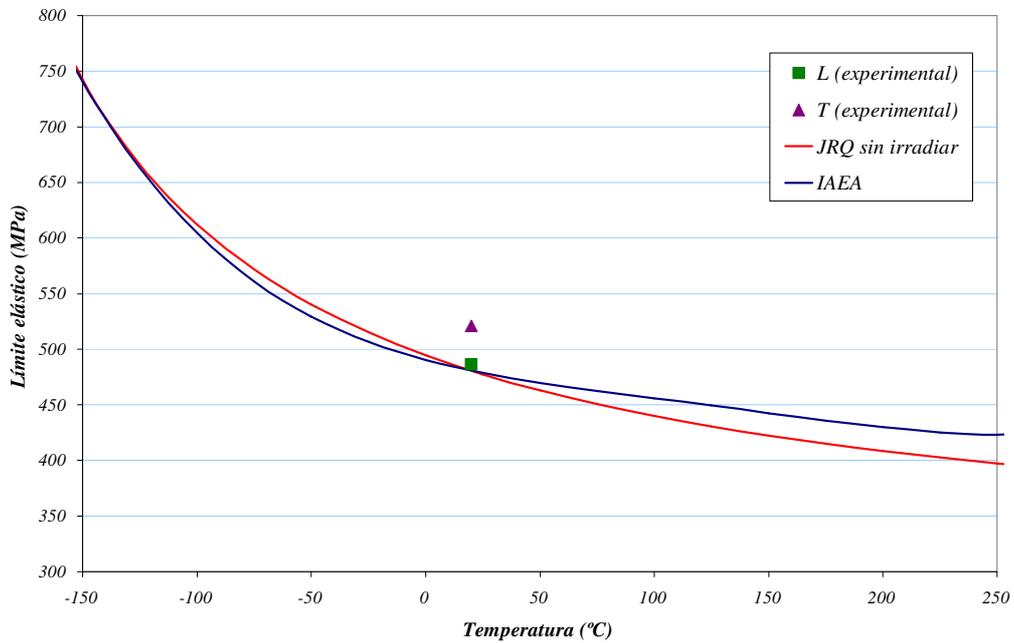


Figura 3.6 Comparación de los ajustes del límite elástico en material no irradiado con los puntos experimentales disponibles [60, 93]

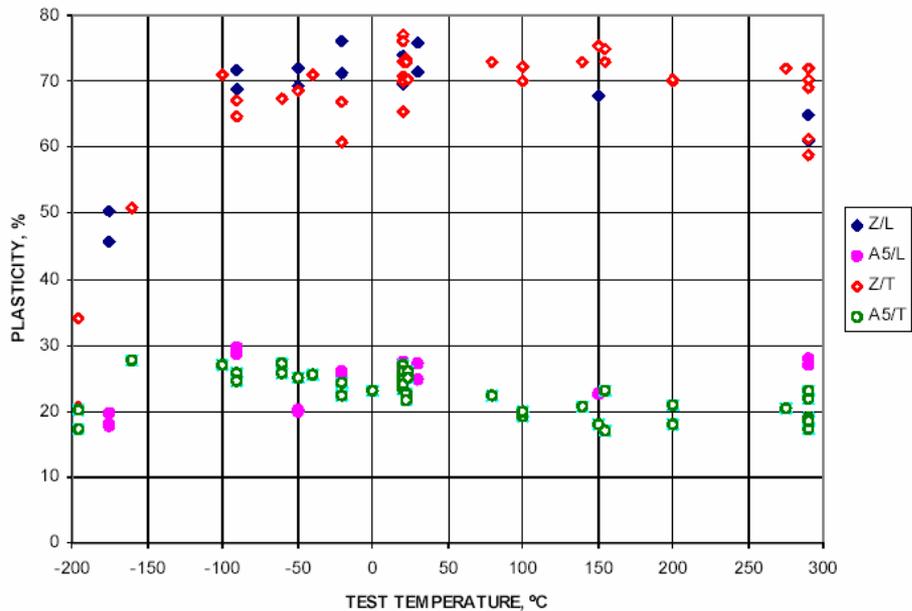


Figura 3.7 Propiedades plásticas del acero JRQ en las orientaciones L y T [93]

Sí que se aprecia, no obstante, una notable influencia de los parámetros mecánicos respecto de la profundidad de extracción de las probetas. Se observa que tanto el límite elástico como la tensión de rotura aumentan a medida que las probetas son extraídas de zonas próximas a la superficie, Figura 3.8 [93], lo que resulta lógico en atención al proceso de laminación aplicado para conformar el material. La capacidad de desarrollar mecanismos plásticos parece verse afectada sólo tímidamente como demuestra la Figura 3.9 [93], donde se representa la elongación sobre 5 diámetros y el coeficiente de estricción.

La naturaleza de estos efectos se justifica como consecuencia del tratamiento térmico de temple en las capas más externas, hasta 1/4 del espesor. Por este motivo se recomienda la obtención de probetas a 1/4 de profundidad del bloque puesto que, de lo contrario, la representatividad en la comparación de resultados quedaría penalizada.

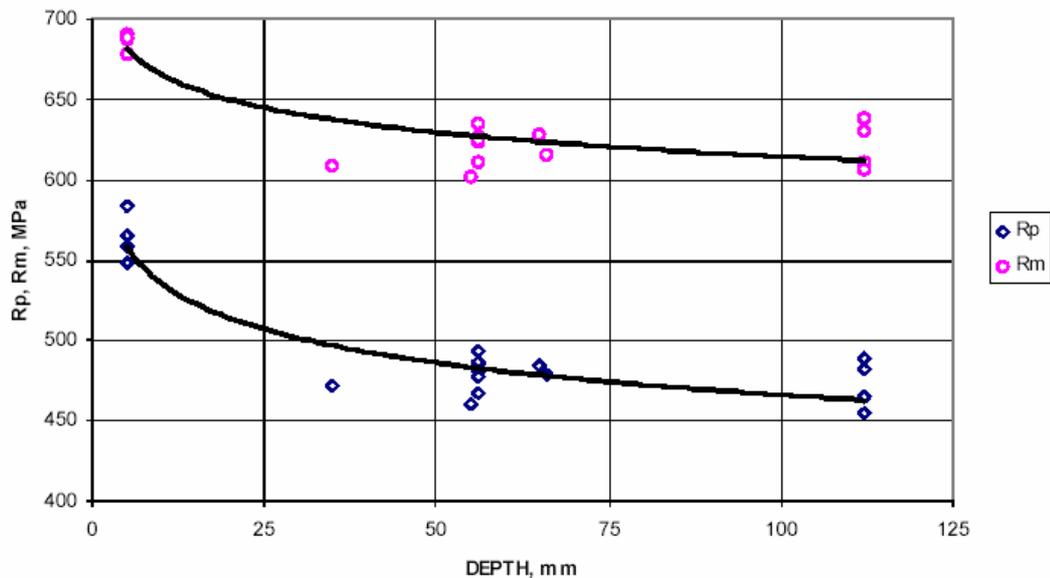


Figura 3.8 Límite elástico, R_p , y tensión de rotura, R_m , del acero JRQ en función de la profundidad de obtención de probeta [93]

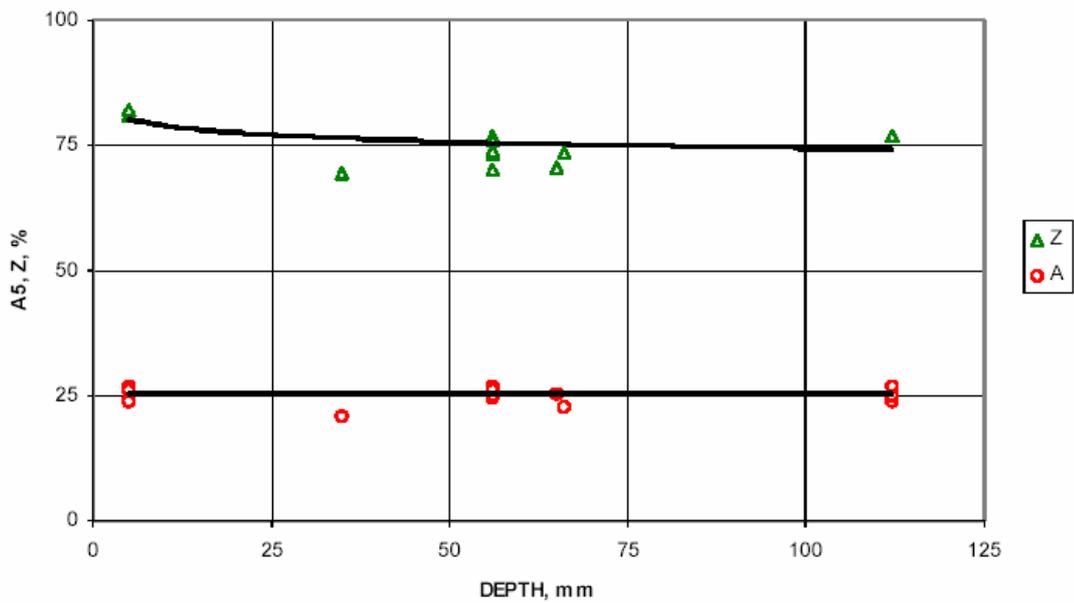


Figura 3.9 Coeficiente de estricción, Z , y elongación sobre 5 diámetros, A , del acero JRQ en función de la profundidad de extracción de la probeta [93]

3.2.3 Caracterización en fractura

La referencia [60] recoge los ensayos de impacto Charpy a diferentes temperaturas, dentro del intervalo $-196/280^{\circ}\text{C}$, realizados con un péndulo tipo Charpy con cuchilla ISO. Los ensayos fueron practicados según cuatro orientaciones de la entalla: LT, TL TS y LS, en denominación ASTM (Figura 3.3 [67]). Los ajustes hiperbólicos de las curvas de resiliencia vienen representados en la Figura 3.10 [60].

De los resultados obtenidos se deduce que la temperatura de transición dúctil-frágil se sitúa entre -60 y -70°C para todas las orientaciones excepto para la TS, que está en torno a los -30°C . En este contexto se entiende que la temperatura de transición, T_{tr} , es aquella que se obtiene tras un ajuste de hiperbólico de la energía absorbida frente a la temperatura de ensayo del tipo (3.4):

$$E = A + B \cdot Th\left(\frac{T - T_{tr}}{C}\right) \quad (3.4)$$

Por otro lado, los valores más elevados de resistencia al impacto obtenidos se corresponden con las orientaciones LT y TL, superando los 200 J, representativos de materiales de alta tenacidad.

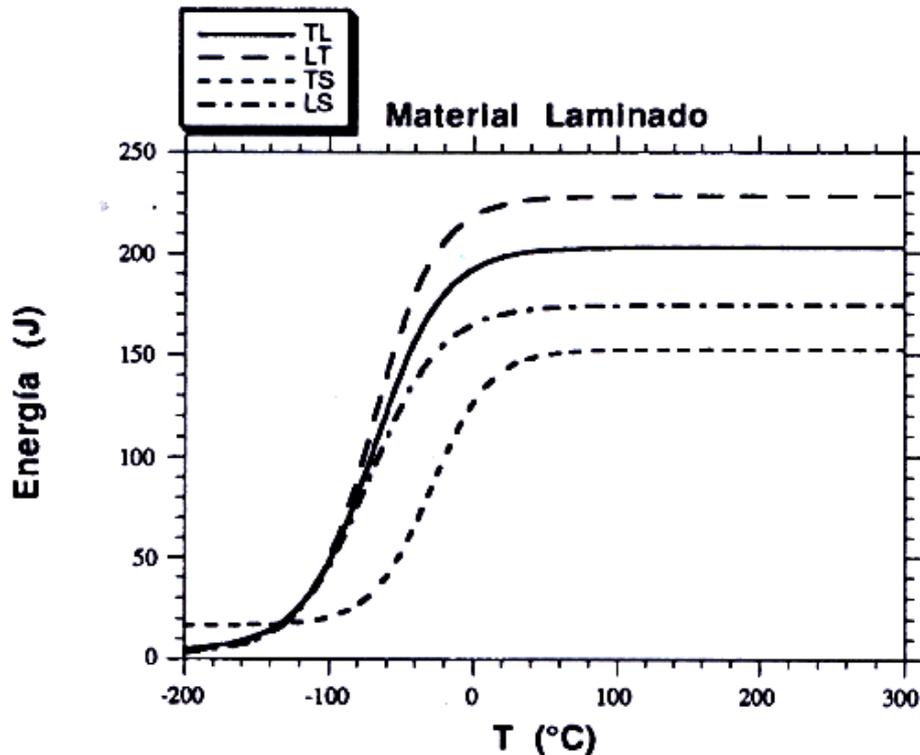


Figura 3.10 Gráfica comparativa de las curvas de resiliencia para el acero JRQ según diferentes orientaciones [60]

La evaluación de la influencia de factores tales como la orientación de la probeta o la profundidad de extracción de la misma sobre los diferentes parámetros de caracterización asociados con el ensayo de impacto Charpy constituyó uno de los objetivos más destacables del CRP-3. Estas investigaciones fueron realizadas en ambas orientaciones, LT y TL. Además, en el CRP-4 se añadió información experimental adicional acerca de la dirección TL.

Los parámetros analizados fueron la energía absorbida en la rotura (Figura 3.11 para la orientación TL y Figura 3.12 para la LT) el porcentaje de fractura dúctil (Figura 3.13 para la orientación TL y Figura 3.14 para la LT) y la expansión lateral (Figura 3.15 para la orientación TL y Figura 3.16 para la LT). En todos los casos los resultados proceden de probetas extraídas a una profundidad de 1/4 del espesor. En estas figuras puede

observarse que los valores de resistencia al impacto más altos, tanto para orientación TL como LT, son del orden de 200 J , al igual que se había obtenido en los ensayos recogidos en [60].

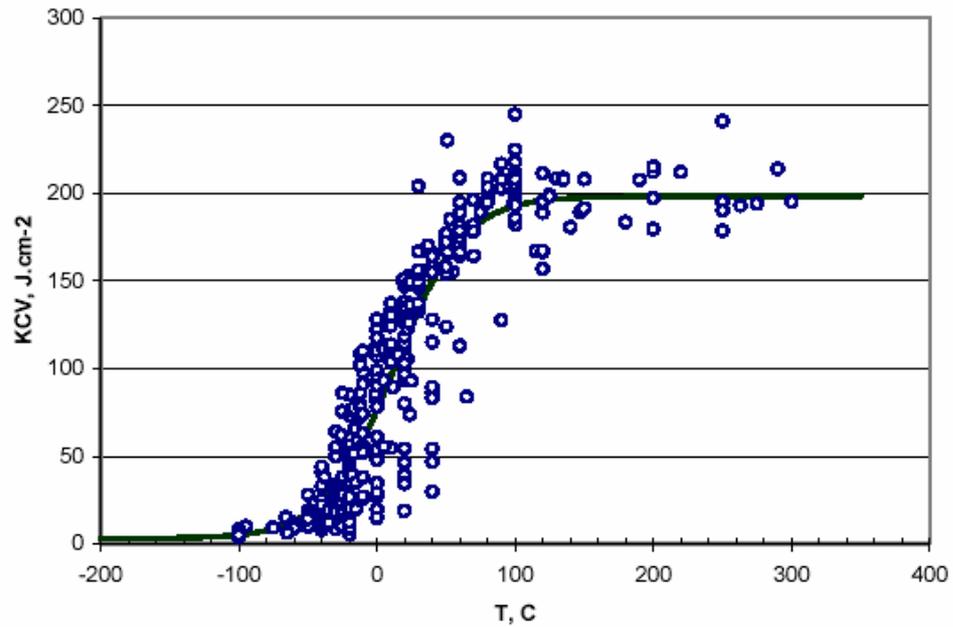


Figura 3.11 Energía absorbida en impacto Charpy, orientación TL [93]

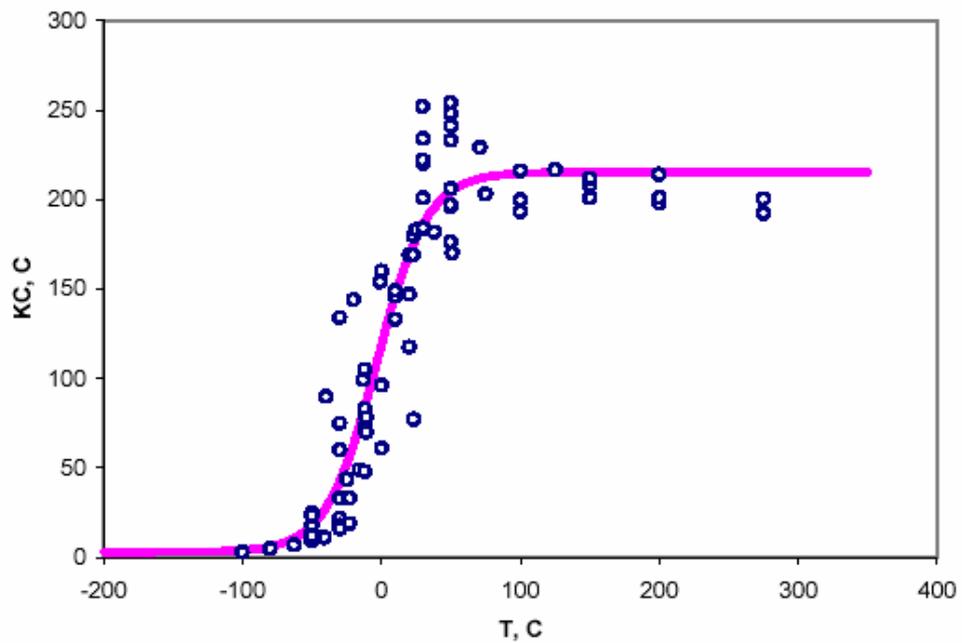


Figura 3.12 Energía absorbida en impacto Charpy en orientación LT [93]

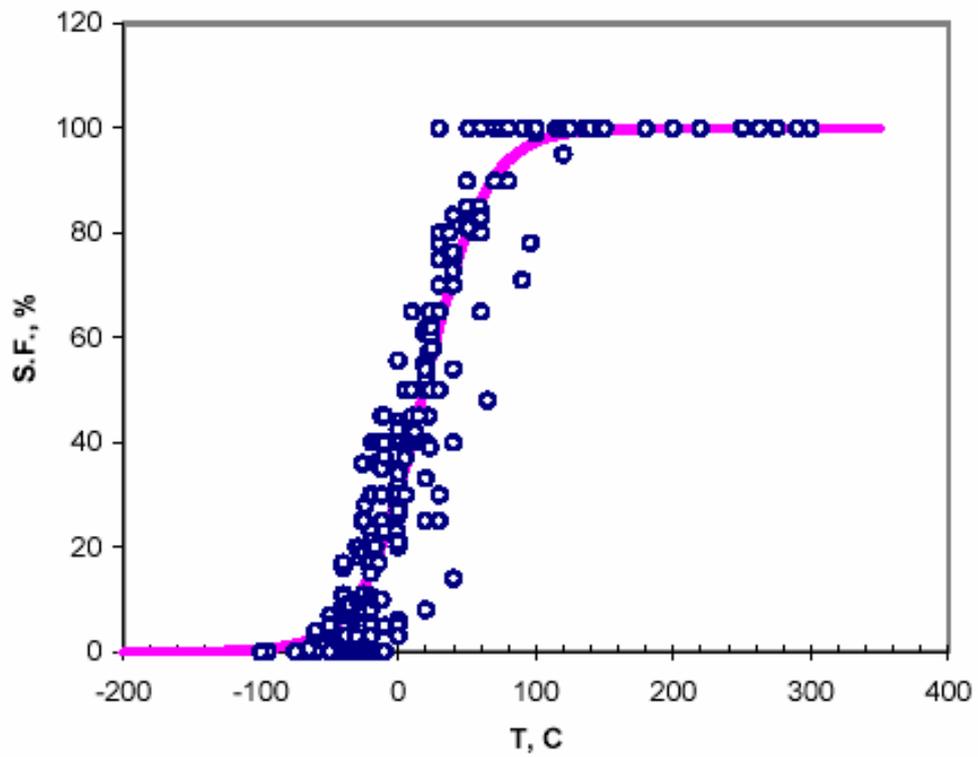


Figura 3.13 Porcentaje de fractura dúctil en orientación TL [93]

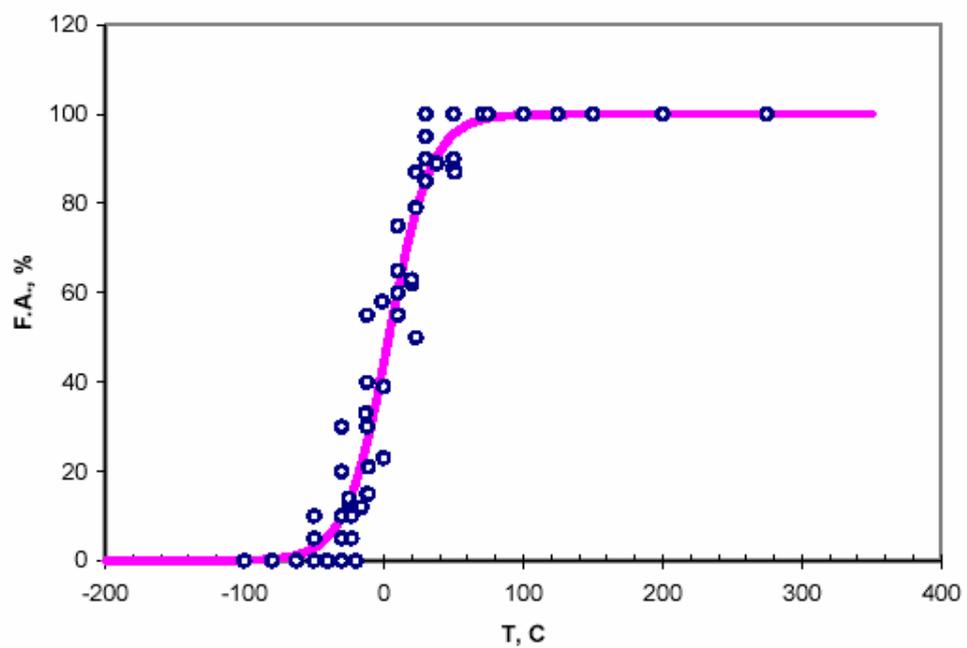


Figura 3.14 Porcentaje de fractura dúctil en orientación LT [93]

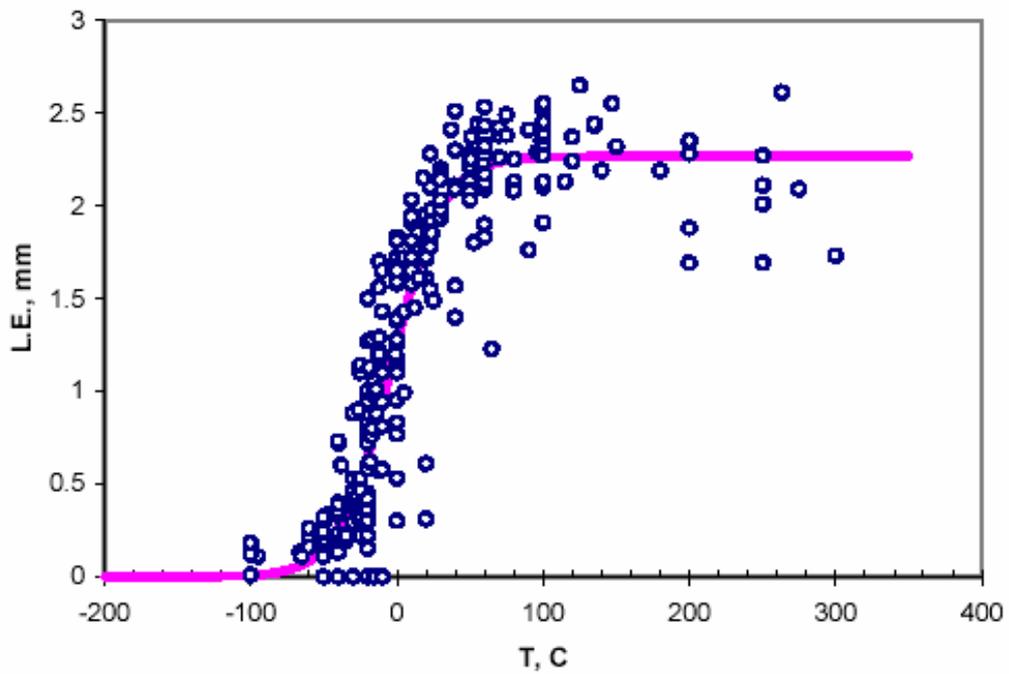


Figura 3.15 Expansión lateral en orientación TL [93]

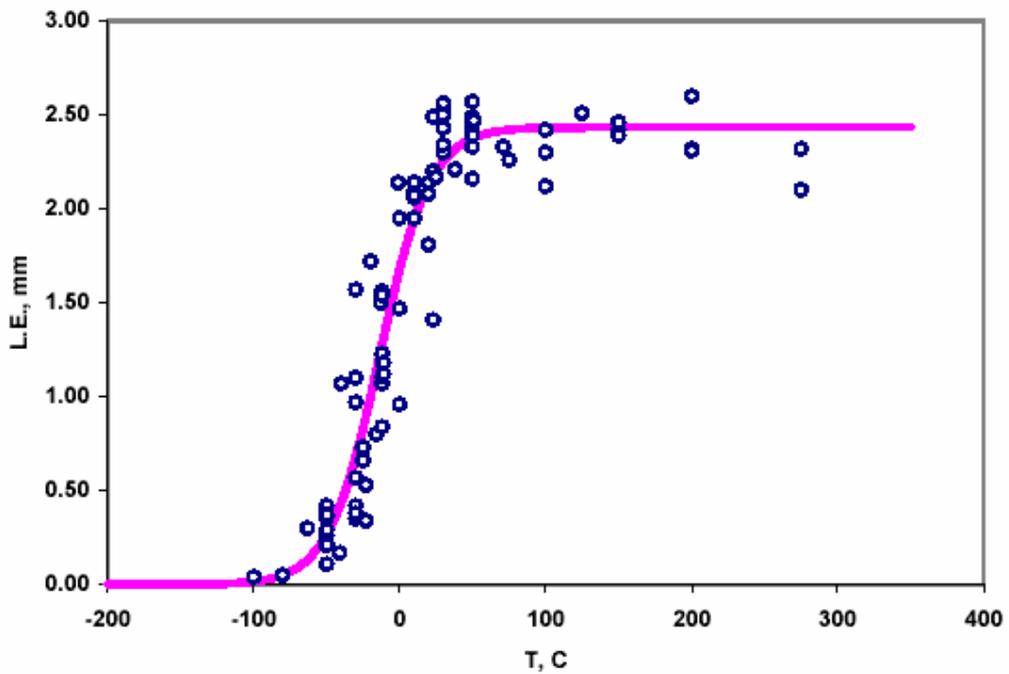


Figura 3.16 Expansión lateral en orientación LT [93]

La Figura 3.17 [93] muestra el efecto que la orientación de la probeta tiene en la temperatura de transición T_{41J} (resultados de los CRP-3 y CRP-4) mediante un

histograma. En la Tabla 3.3 [93] se presentan el valor medio y la desviación para cada caso considerado incorporando, además, los resultados de energía absorbida en la región *Upper Shelf*, USE.

Tabla 3.3 Valores de T_{41J} y valores de USE para cada orientación [93]

	CRP3	CRP4	CRP3
	LT	TL	LT
T_{41J} (°C)	$-23,7 \pm 4,8$	$-15,9 \pm 8,2$	$-23,8 \pm 6,5$
USE(J)	$213,6 \pm 12,2$	$187,8 \pm 11,1$	-----

El histograma de la Figura 3.17 permite apreciar la gran dispersión en los resultados de T_{41J} . Así por ejemplo, para la orientación TL se han registrado en el CRP-4 tanto valores de T_{41J} comprendidos en el intervalo $(-39, -30)^\circ\text{C}$ como en el $(-19, 10)^\circ\text{C}$, lo que supone un rango de la población experimental del orden de 20°C .

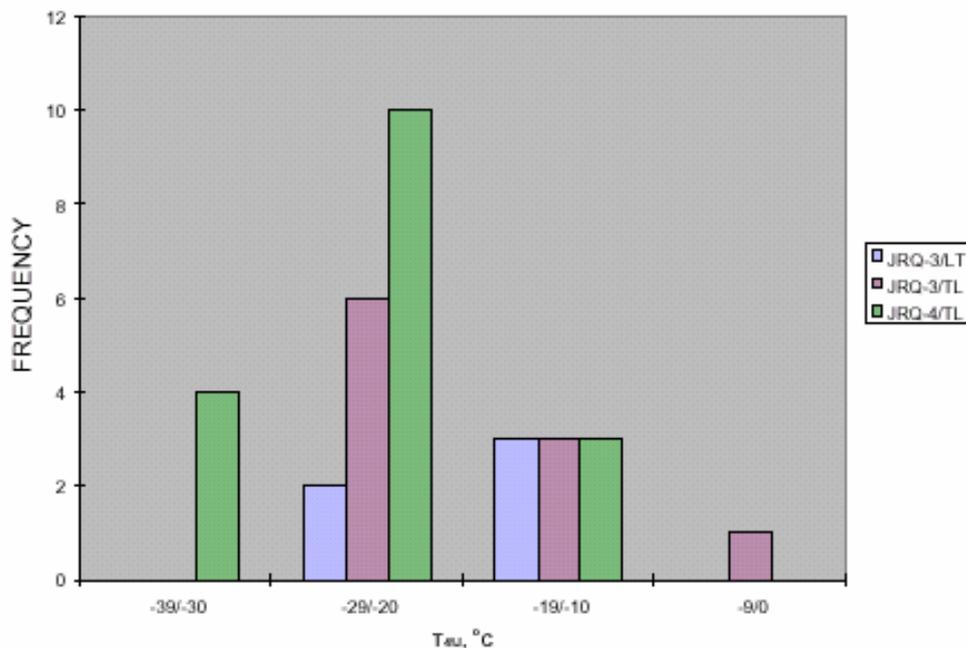


Figura 3.17 Temperatura de transición del acero JRQ, T_{41J} , para una profundidad de extracción de probeta de 1/4 y orientación LT y TL [93]

El efecto que la profundidad de extracción de la probeta supone en la temperatura de transición T_{41J} queda reflejado en la Figura 3.18 [93]. Puede observarse que en este caso la dependencia con la profundidad de extracción es más acusada que en el caso del

límite elástico y la tensión de rotura del material (Figura 3.8 [93]). La pauta de variación refleja el mismo fenómeno subyacente según el cual la fragilización asociada al tratamiento de temple se intensifica en las proximidades de las superficies del bloque, que ha sufrido ya una mayor deformación plástica irreversible. Se aprecia asimismo una dispersión de resultados similar con independencia de la profundidad de extracción, con un rango algo superior a 20 °C. Estos hechos corroboran nuevamente la recomendación de utilizar probetas extraídas a 1/4 de profundidad para poder emplear los datos de referencia.

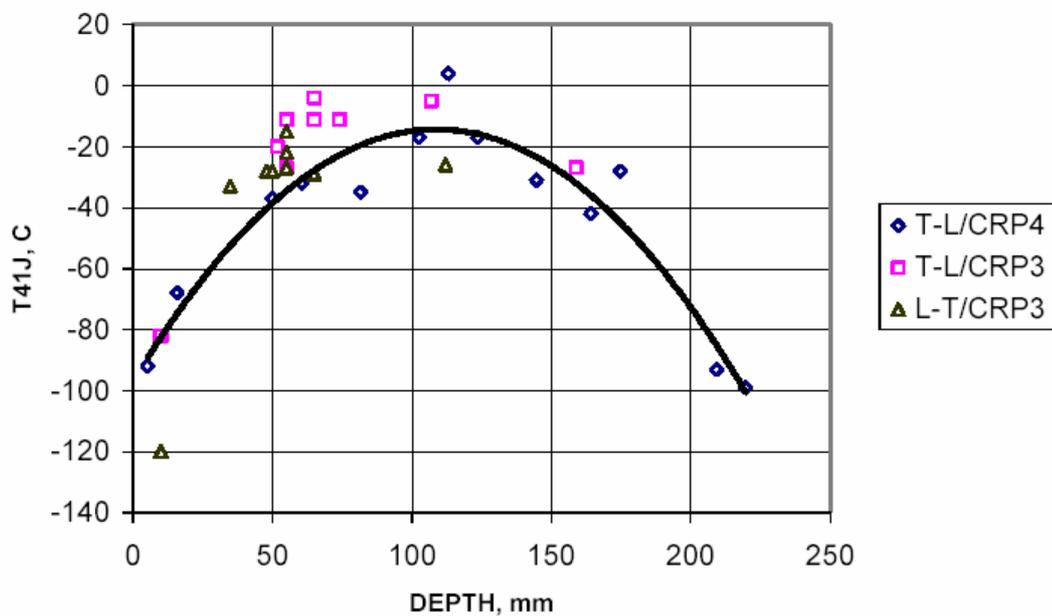


Figura 3.18 Figura 3.18: Temperatura de transición T_{41J} en función de la profundidad de extracción de probeta [93]

De manera similar el efecto de la profundidad de extracción en la energía USE ha sido analizado. Nuevamente, aunque con una dependencia menos acusada, Figura 3.19 [93], se manifiesta una tenacidad más reducida cerca de las superficies exteriores. La orientación LT ofrece valores de mayor energía, en coherencia con lo expuesto en la Tabla 3.3.

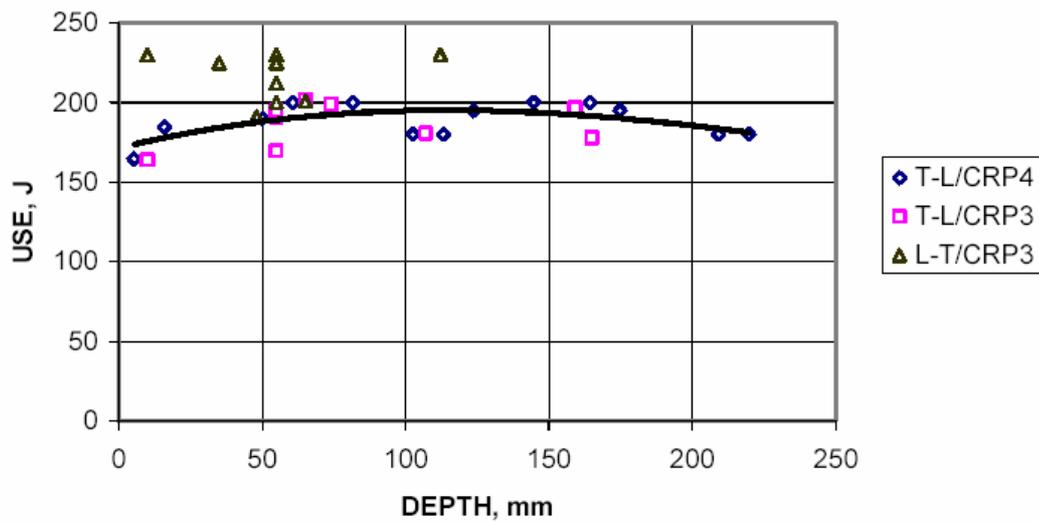


Figura 3.19 Valores de USE en función de la profundidad de extracción de probeta [93]

Los resultados de la medida de tenacidad del acero JRQ en la región de transición tienen su origen en el CRP-4 en el cual se analizó únicamente la orientación TL, con probetas extraídas a 1/4 de la profundidad (a 55 mm de la superficie exterior). La tenacidad a fractura obtenida con ensayos de naturaleza cuasi-estática constituye el parámetro de mayor relevancia para la evaluación de la integridad estructural y de la vida operativa residual de las vasijas a presión de los reactores. Mediante probetas de reducidas dimensiones, tipo Charpy prefisuradas, ensayadas a diferentes temperaturas se ha obtenido la nube de puntos que se recoge en la Figura 3.20 [93]. La dispersión estadística inherente al proceso, justificada en el Capítulo 2 de esta tesis, se pone particularmente de manifiesto en esta figura. El conjunto de datos fue evaluado de acuerdo con el procedimiento ASTM [25] para determinar la temperatura T_0 . La Figura 3.20 [93] muestra los valores de tenacidad ajustados a un espesor normalizado de una pulgada ($\approx 25\text{ mm}$), $K_{Jc(25\text{ mm})}$, en función de la temperatura normalizada $(T - T_0)$, incluyendo la mediana de tenacidades junto con las correspondientes bandas de tolerancia del 1, 5, 95 y 99%.

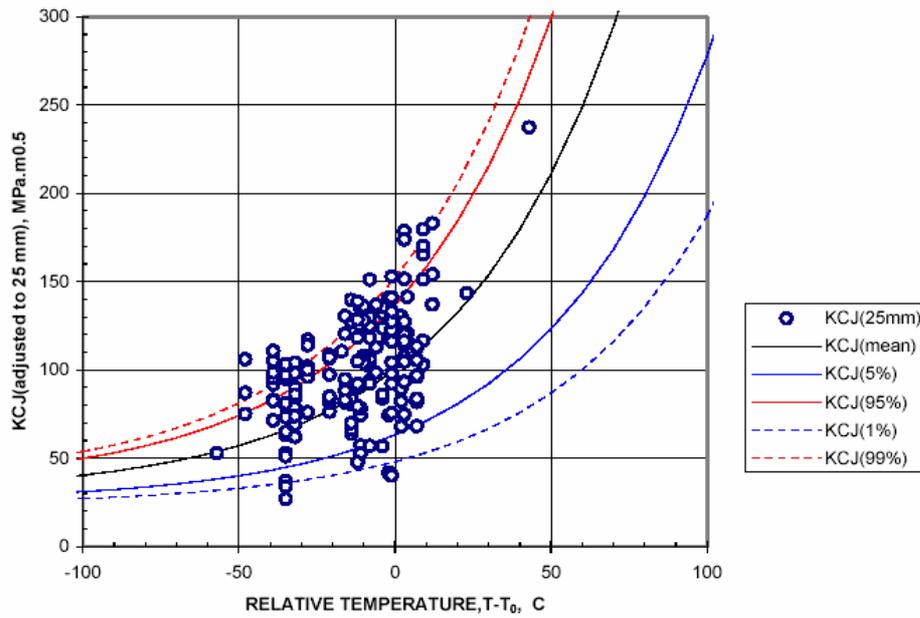


Figura 3.20 Tenacidad a fractura del acero JRQ, orientación TL [93]

La Figura 3.21 [93] proporciona un histograma que recoge todos los valores de temperatura T_0 . El valor promedio de la temperatura de referencia T_0 junto con su desviación estadística es -71 ± 10 °C. Este resultado fue obtenido ensayando fundamentalmente probetas PCCv y sólo ocasionalmente algunas CT.

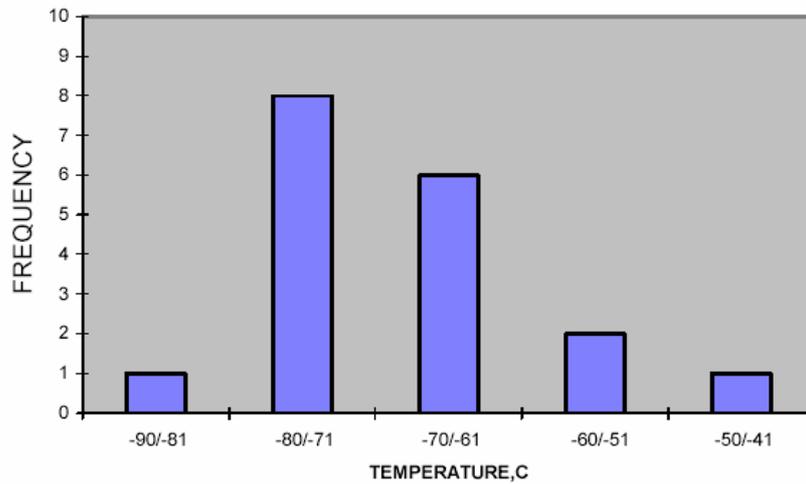


Figura 3.21 Temperatura de Referencia T_0 del acero JRQ en orientación TL [93]

La dependencia de T_0 con la profundidad de obtención de la probeta se muestra en la Figura 3.22 [93], la cual manifiesta el mismo efecto delatado por los ensayos mecánicos y de impacto Charpy, que justifica nuevamente la recomendación de extraer probetas a $\frac{1}{4}$ del espesor.

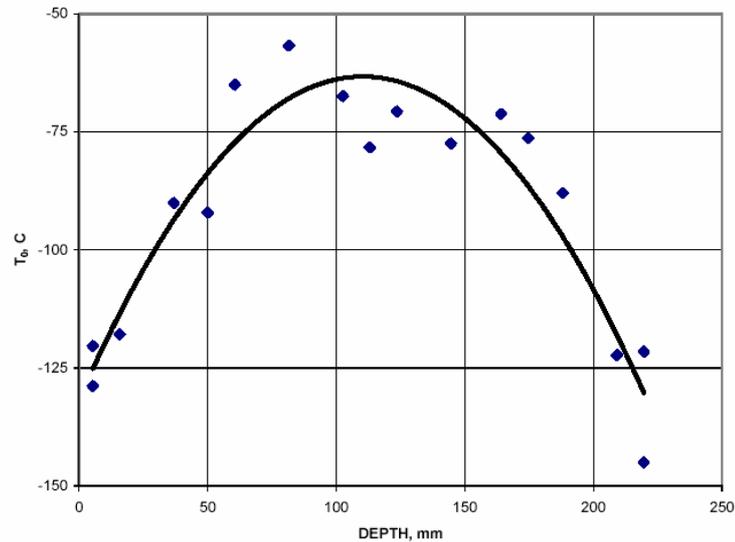


Figura 3.22 Temperatura de Referencia T_0 del acero JRQ, orientación TL, en función de la profundidad de extracción de probeta [93]

Puede concluirse, en atención a la información presentada en este apartado, que el acero JRQ puede emplearse como material de referencia siempre que se garantice que las probetas mecanizadas hayan sido extraídas a $\frac{1}{4}$ del espesor total del bloque puesto que las propiedades mecánicas y en fractura se ven severamente afectadas por este factor. Por otra parte, si se va a emplear el acero JRQ como material de referencia, se recomienda, además, emplear la orientación TL, por ser la más intensamente caracterizada (CRP-3 y CRP-4).

3.3 *Material de interés*

En este apartado se recoge la información disponible sobre el material de interés originada en el contexto del Programa de Vigilancia de la planta. Esta fuente constituye la herramienta por medio de la cual las centrales nucleares pueden practicar el seguimiento de las propiedades de los materiales que conforman la vasija.

3.3.1 Normativa de los Programas de Vigilancia

Las características fundamentales del Programa de Vigilancia de los reactores de agua ligera, LWR (denominación que incluye los de agua en ebullición, BWR, y los de agua a presión, PWR) se recogen en la norma ASTM E 185 [56]. Allí se establecen tanto las pautas de obligado cumplimiento como aquellas recomendaciones basadas en la experiencia acumulada, tendentes a una correcta evaluación de la evolución del estado de la vasija. Seguidamente, se resumen los aspectos más reseñables de la versión vigente de este documento, aprobada en 2002 [56]. Debe mencionarse que esta norma ha experimentado numerosas modificaciones desde su primera publicación, en 1961 (las cuales, por otra parte, vienen resumidas en el documento actual) estando regulado el Programa de Vigilancia de cada vasija concreta por la normativa vigente en el momento de su puesta en funcionamiento.

Un primer requisito contenido en [56] tiene como finalidad garantizar la representatividad de los resultados empíricos que se vayan obteniendo. En este sentido, los materiales escogidos para su ensayo dentro del programa deberán ser aquéllos que constituyen la vasija en la región *beltline*, es decir, la zona de la vasija que rodea al núcleo en su altura efectiva y que, en consecuencia, experimenta la mayor intensidad neutrónica. Deberán ser incluidas muestras de todos los materiales constituyentes tanto del material base como de las soldaduras. De cada uno de estos materiales se exige el conocimiento del historial termo-mecánico completo así como de su composición química. Además de la cantidad de material estrictamente precisa para satisfacer las exigencias de la norma, se recomienda el almacenamiento de material adicional en previsión de futuras contingencias no contempladas inicialmente.

Se indica en la norma, asimismo, la naturaleza de las probetas a ensayar distinguiendo entre probetas de impacto Charpy, de carácter obligatorio, y de probetas de tracción y de fractura, cuya presencia únicamente se recomienda. Las dimensiones geométricas y características de las mismas serán concordantes con las expuestas en las correspondientes normas de ensayo ASTM (de tracción y de fractura así como para la determinación de T_0). Las probetas de material base serán extraídas a 1/4 del espesor mientras que las de soldadura procederán de todo el espesor salvo de las zonas próximas a las superficies externas y a la raíz de soldadura, por considerarse regiones poco

representativas. En cuanto a su orientación, véase la Figura 3.23 [56], se establecen las siguientes pautas (exigencias para el material base y recomendaciones para la soldadura):

- Todas las probetas, sean de material base o de soldadura, de tracción o de impacto Charpy, presentarán su eje principal (coincidente con la mayor dimensión de la probeta en ambos casos) paralelo a la superficie externa.
- El eje principal en las probetas de material base se dispondrá perpendicular a la dirección principal de laminado, para placas, o a la dirección de trabajo, para forjas (de acuerdo con la Sección III del Código ASME, [48]).
- En las probetas de soldadura, el eje principal será perpendicular al espesor de la soldadura (*Thickness* en la Figura 3.23). Se admiten dos orientaciones para las probetas de tracción, siempre que sea posible disponer el extensómetro completamente en la región de soldadura.
- En las probetas de impacto Charpy (base o soldadura) el eje de la entalla resultará perpendicular a la superficie exterior.

La cantidad de probetas para una correcta caracterización de los diferentes estados de interés de irradiación viene también indicada en la normativa [56]. En el caso de material no irradiado se recomienda ensayar un mínimo de 15 probetas de impacto Charpy para cada material, permitiendo así la obtención de una curva de resiliencia en función de la temperatura con calidad suficiente para determinar y caracterizar las zonas de transición y la región *Upper Shelf*. Asimismo, se sugiere el ensayo de, al menos, seis probetas de tracción, dos a temperatura ambiente, dos a temperatura de irradiación y el resto a temperaturas intermedias, junto con 8 ensayos de fractura que permitan, ya sea la determinación de la temperatura de referencia, T_0 , de acuerdo con E1921 [25], u otros ensayos de fractura según E1820 [40].

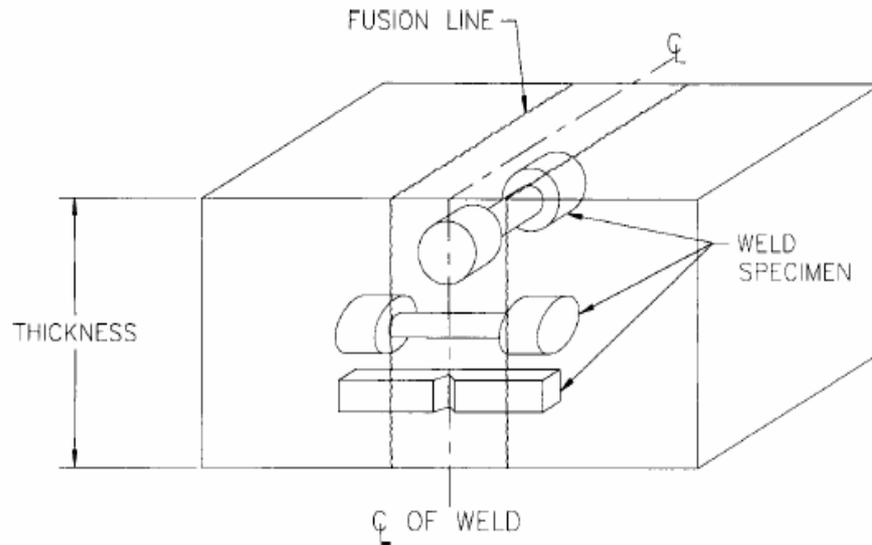


Figura 3.23 Orientación de las probetas Charpy y tracción de soldadura [56]

Las cápsulas donde se alojan las probetas deberán ubicarse en posiciones estratégicas en las proximidades de la pared interior de la vasija de forma que las probetas reciban un historial de irradiación lo más parecido posible al experimentado por la vasija tanto desde el punto de vista del espectro neutrónico como de la temperatura de irradiación. Se recomienda que el factor de adelanto (relación entre la tasa de fluencia neutrónica recibida por las probetas contenidas en el cápsula y la tasa máxima de fluencia en la pared interior) sea mayor que 1 y menor o igual que 3. En caso de superar el valor 5, la planta deberá justificar la representatividad de los valores de fluencia acelerada.

La normativa [56] recoge también una propuesta de agenda de extracción de las cápsulas. Para su aplicación se requiere, previamente, de las predicciones de las fluencias a fin de vida tanto en la pared interior de la vasija, $\Phi_{EOL,IS}$, como a una profundidad desde la pared interior de 1/4 del espesor, $\Phi_{EOL,1/4-T}$. Para este fin se sugiere la utilización de la norma ASTM E 900 [57], véase el Apartado 2.5.5.2. Si la previsión del desplazamiento en la temperatura de referencia RT_{NDT} a fin de vida, $\Delta RT_{NDT,EOL}$, es inferior a $100^{\circ}F$ ($56^{\circ}C$), únicamente se exige la extracción de las dos cápsulas denominadas “de prioridad 1” en los instantes en los cuales las probetas de dichas cápsulas hayan recibido dosis equivalentes a las de fin de vida de la planta a una profundidad de 1/4 del espesor, $\Phi_{CAPS} = \Phi_{EOL,1/4-T}$, y en la superficie interior,

$\Phi_{CAPS} = \Phi_{EOL,IS}$, respectivamente. Cuando la previsión en $\Delta RT_{NDT,EOL}$ supere los $100^\circ F$ ($56^\circ C$), una cápsula adicional, denominada “de prioridad 2”, deberá ser analizada. Se trata de una cápsula de extracción temprana destinada a la verificación de las predicciones del daño por irradiación en el material. Una fluencia en las probetas para esta primera cápsula -en orden cronológico- de valor $\Phi_{CAPS} = \Phi_{CAPS,1} = 5 \cdot 10^{18} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ se considera como adecuada para el caso de vasijas PWR. Finalmente, se estipula la presencia de una cuarta cápsula, “de prioridad 3”, cuando $\Delta RT_{NDT,EOL} > 200^\circ F \approx 111^\circ C$, para ser extraída cuando se alcance un valor de fluencia equivalente a $\Phi_{CAPS} = (\Phi_{EOL,1/4-T} - \Phi_{CAPS,1})/2$. Su finalidad no es otra que la de mejorar la calidad del seguimiento de propiedades cuando las previsiones de fragilización sean de importancia.

Estas características aquí resumidas deben permitir el entendimiento de la planificación del Programa de Vigilancia de la vasija objeto de estudio en esta tesis y de los resultados que se exponen en los siguientes apartados.

3.3.2 Origen del material de interés

La finalidad de cualquier Programa de Vigilancia consiste en proporcionar un seguimiento fidedigno de la modificación que las propiedades mecánicas y en fractura del material que constituye la vasija experimentan con la irradiación. Para ello deben darse las dos condiciones que se han desarrollado previamente: en primer lugar, el material de las probetas contenidas en las cápsulas debe ser idéntico al de la vasija, con la misma composición química y tratamiento termo-mecánico de conformado y, por otra parte, el espectro neutrónico recibido por las probetas y la vasija debe ser lo más parecido posible. Esta segunda condición se satisface de manera muy aproximada con diseños de la ubicación de las cápsulas que impliquen factores de adelanto comprendidos entre 1 y 3, como se estipula en la norma ASTM E 185 [56].

La solución adoptada para cumplir el primero de los condicionantes, el de representatividad del material alojado en las cápsulas, en el caso de la vasija analizada en esta tesis se describe a continuación. La Figura 3.24 representa una instantánea del momento de la colocación de la vasija en su posición definitiva, durante la construcción

de la planta. La altura total de la vasija, incluyendo elementos de cierre, supera los 18 m. La fotografía permite constatar que el cuerpo del recipiente está constituido por una serie de elementos, con forma de anillo cilíndrico, unidos por medio de soldaduras circunferenciales²³. De esta forma, la vasija estudiada contiene dos materiales: el material base que forma los cilindros y el material de soldadura por medio del cual éstos se unen solidariamente. Las regiones extremas del cilindro, presentan un interés menor dentro de los trabajos de esta tesis por cuanto se encuentran alejadas de la zona *beltline*.



Figura 3.24 Perspectiva de la vasija en el momento de su colocación

Durante la fabricación de la vasija, el anillo 5, perteneciente a la región *beltline* fue recortado en su dimensión vertical para obtener un anillo adicional de 360 mm de altura. Se trata, por lo tanto, de una pieza del mismo material constitutivo, con el mismo

²³ Se evita por medio de este proceso constructivo la presencia en la vasija de soldaduras paralelas al eje del cilindro, las cuales son desaconsejables desde el punto de vista de la Integridad Estructural del componente.

trabajo de forja y tratamiento térmico; consecuentemente, el historial termo-mecánico del material base de la vasija y del anillo complementario resultan análogos, además, también resultan idénticas las dimensiones geométricas, radio y espesor. Las probetas ensayadas dentro del Programa de Vigilancia fueron extraídas de este anillo, en lo sucesivo denominado “anillo de vigilancia”. La Figura 3.25 permite apreciar la estructura final de la vasija, incluyendo la presencia del anillo 5 (cuya longitud es ligeramente más reducida que la del resto de elementos).

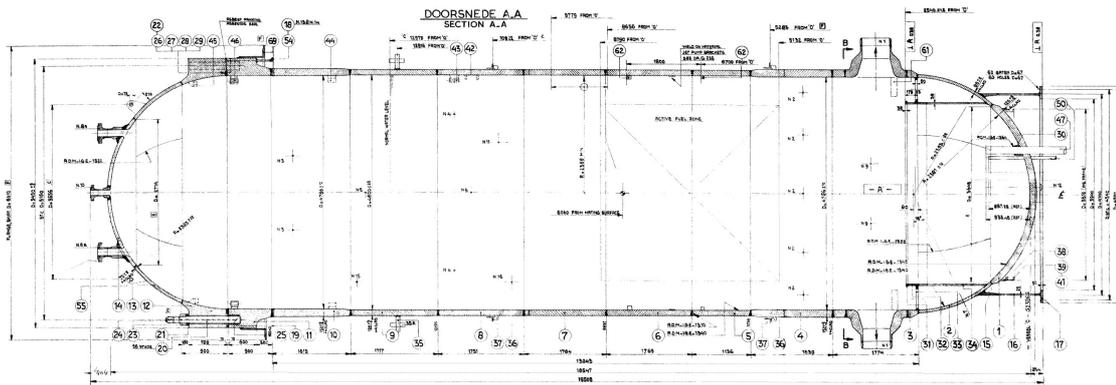
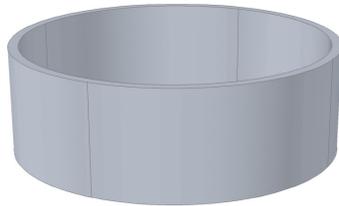


Figura 3.25 Esquema de la disposición de anillos y soldaduras en la vasija

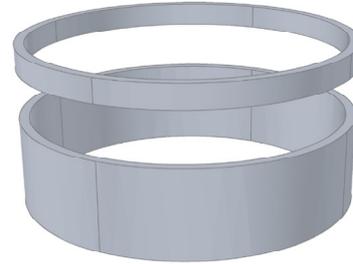
La obtención de material representativo de las soldaduras circunferenciales se solventó dividiendo el anillo de vigilancia en dos piezas según un plano de corte conteniendo a su eje para, seguidamente, soldar los dos semi-anillos resultantes con un protocolo de soldadura idéntico al seguido con los elementos constituyentes de la vasija. La Figura 3.26 esquematiza en cuatro etapas la secuencia de actuaciones desarrollada para la fabricación del anillo de vigilancia.

La Figura 3.27, también suministrada por la planta, ofrece un plano del anillo de vigilancia, previo al proceso de división y soldadura, que permite apreciar sus dimensiones físicas; se trata de un cilindro de 4778 mm de diámetro interior (aproximadamente 188”), 360 mm de altura y 150 mm (5.90”) de espesor. Puede apreciarse la posición de los cortes (*cut* en la figura) según un plano conteniendo al eje del cilindro que divide el anillo en dos piezas simétricas, cuya unión constituye una réplica de las soldaduras circunferenciales de la vasija.

Anillo 5 original de la vasija



Separación del anillo de vigilancia, de 360 mm de altura



División simétrica del anillo de vigilancia



Soldadura circunferencial de las dos mitades



Figura 3.26 *Proceso de fabricación del anillo de vigilancia a partir del anillo 5 de la vasija*

La Figura 3.28 recoge, a modo de ejemplo, una imagen representativa del despiece practicado sobre el anillo para la obtención de probetas destinadas al Programa de Vigilancia. Se aprecia claramente en la parte central la región correspondiente a la soldadura descrita en los párrafos anteriores. Pueden apreciarse, asimismo, probetas Charpy de material base (familia “9” en la figura) y de soldadura (familia “1”), extraídas a diferentes profundidades así como una probeta de tracción de gran espesor (familia “8A”). Ese patrón se repite en todo el desarrollo del semi-cilindro, con probetas de diversa naturaleza y orientación.

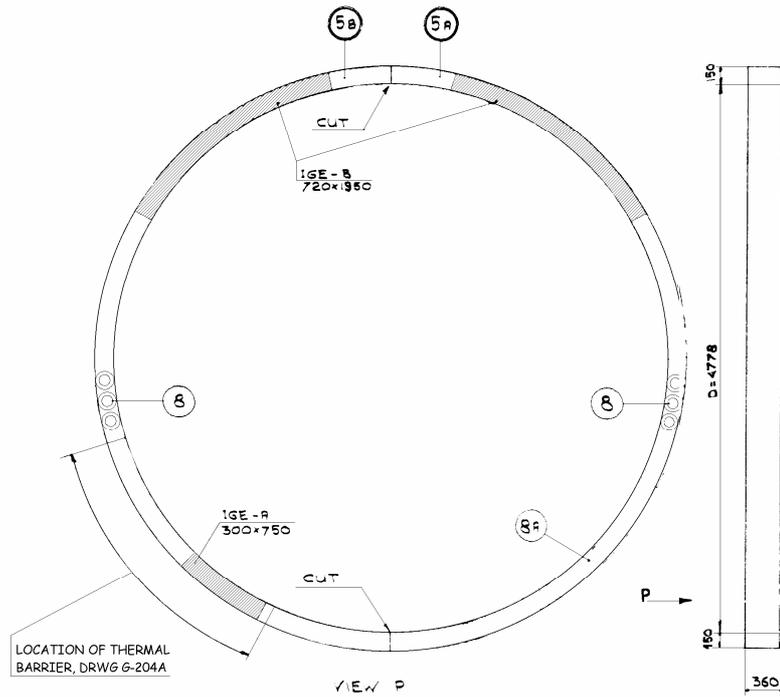


Figura 3.27 Esquema del anillo-réplica

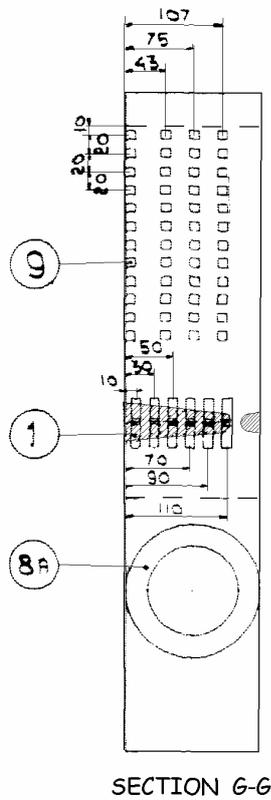


Figura 3.28 Ejemplo del despiece en una sección del anillo

3.3.3 Descripción del material en estado de recepción

El material de interés analizado en esta tesis se corresponde con el material base de la vasija descrita en el apartado anterior. Las técnicas que serán aquí presentadas son perfectamente extrapolables al material de soldadura lo mismo que a cualquier otro tipo de material procedente de otras vasijas. En este Apartado 3.3.3, en el 3.3.4 y en el 3.3.5 se detalla la información disponible sobre el material de interés correspondiente con el estado del material en su condición inicial, previa a irradiación, así como la generada tras analizar las dos cápsulas de vigilancia ya ensayadas hasta fecha presente. A continuación se ofrece la información referente a la composición química e historial térmico.

3.3.3.1 Composición química

El material base empleado en la vasija se corresponde con un acero SA-336 según la denominación ASME [97] cuya composición química, de acuerdo con la información proporcionada por la planta, es la que se reproduce en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4 Composición química del material de interés (% en peso)

C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	Cu
0.181	0.580	0.012	0.013	0.350	0.720	0.320	0.610	0.100

3.3.3.2 Historial térmico

La Figura 3.29 resume las diferentes etapas del tratamiento térmico completo recibido por el material base del anillo de vigilancia.

3.3.4 Caracterización convencional del material de interés

La información desprendida del Programa de Vigilancia de la vasija estudiada contiene valores correspondientes a la condición inicial del material, estado no irradiado, y a las cápsulas 1 y 2, con fluencias de valor $\Phi_1 = 0.057 \cdot 10^{19} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ y $\Phi_2 = 0.126 \cdot 10^{19} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$, respectivamente. Por otra parte, el material analizado en esta tesis procede de una cápsula experimental dedicada a las tareas de investigación que aquí se presentan. La fluencia recibida por este material asciende a $\Phi_{\text{exp}} = 0.0355 \cdot 10^{19} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$, es decir, un valor comprendido entre el estado inicial y el de las cápsulas de vigilancia. Cabe

destacar que en los tres casos se trata de dosis reducidas en comparación con los valores típicos de fluencia a fin de vida, por lo que no son esperables efectos acusados de fragilización.

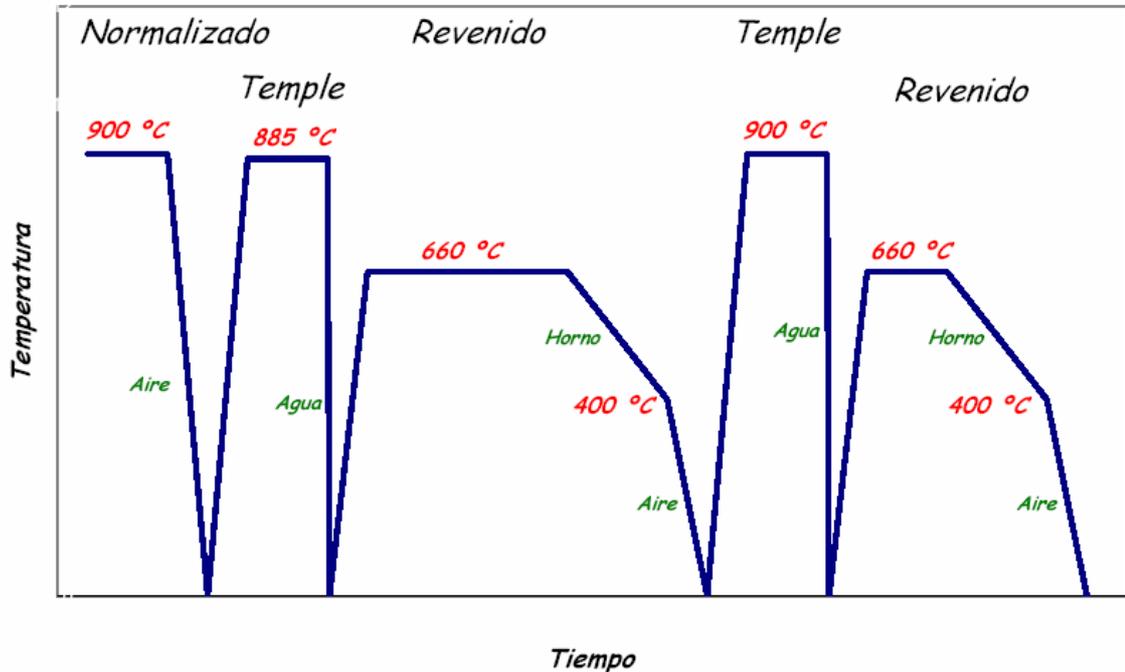


Figura 3.29 Tratamiento térmico recibido por el material de interés

La información que se presenta seguidamente comprende los resultados de la caracterización microestructural así como de los ensayos de tracción practicados para el material no irradiado y el procedente de las cápsulas 1 y 2.

3.3.4.1 Caracterización microestructural

Para la caracterización microestructural se ha llevado a cabo un estudio metalográfico por técnicas de microscopía óptica y electrónica de barrido, SEM. La preparación de las muestras se ha realizado mediante pulido, comenzando con papel de desgaste de tamaño de grano grueso para continuar progresivamente con otros cada vez más finos hasta finalizar con calidad de alúmina para alcanzar un acabado especular. Seguidamente se ha practicado un ataque con Nital 3 (disolución de ácido nítrico en alcohol al 3%) durante 3 segundos.

La Figura 3.30 presenta dos micrografías por microscopía óptica y otras dos por microscopía electrónica de barrido, SEM, del material de interés. La escala de fotografía está sobreimpresa en cada imagen. Como puede apreciarse, se corresponde con una microestructura fundamentalmente ferrítica con presencia de bainita revenida, con estructura ligeramente degenerada y carburos en borde de grano. Estos resultados son coherentes con los valores de microdurezas Vickers [98] obtenidos en este material, que dan valores de $210 \pm 15 HV$. Consecuentemente, puede esperarse que su comportamiento en fractura en la ZTDF venga perfectamente descrito por la Curva Patrón.

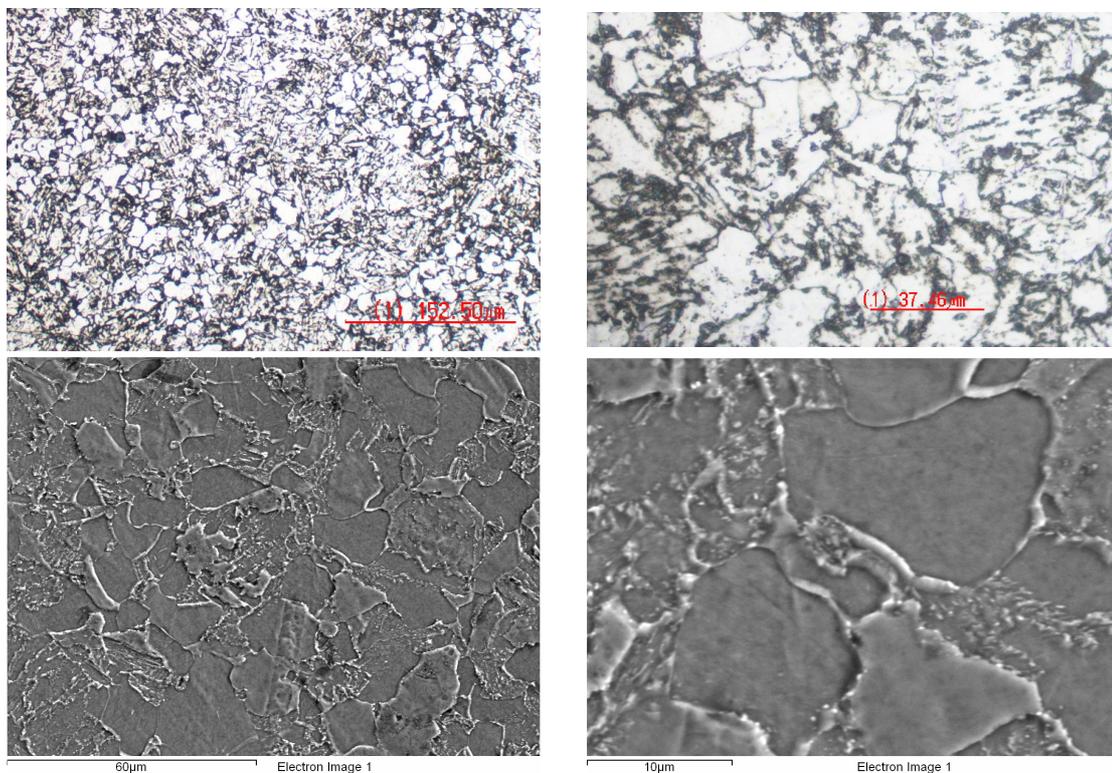


Figura 3.30 Metalografía por microscopía óptica y electrónica (SEM)

3.3.4.2 Caracterización mecánica

En la Tabla 3.5 se resumen los valores más representativos correspondientes al material base en estado no irradiado. Fueron realizados doce ensayos para cada una de las tres temperaturas analizadas (20, 288 y 343 °C) sobre probetas cilíndricas de 12.83 mm de diámetro, con orientación L. En la Tabla 3.6, por su parte, se incluyen los cinco ensayos de tracción sobre material irradiado del Programa de Vigilancia. El análisis de estos

datos se pospone hasta el Capítulo 4 donde se incluirán, además, los ensayos de tracción realizados (tanto en material virgen como irradiado) en el contexto de esta tesis.

Tabla 3.5 Parámetros mecánicos del acero en estado no irradiado (orientación L)

T (°C)	$s_{Y,0.2\%}$ (MPa)	s_U (MPa)	Elongación (%)	Reducción área (%)
20	426 ± 17	580 ± 11	30.9 ± 1.1	69.8 ± 0.6
288	358 ± 19	541 ± 14	23.2 ± 0.6	64.8 ± 0.9
343	347 ± 6	547 ± 7	26.0 ± 1.6	66.4 ± 1.1

Tabla 3.6 Parámetros mecánicos del acero en estado irradiado (orientación L)

Fluencia ($10^{19} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$)	T (°C)	$s_{Y,0.2\%}$ (MPa)	s_U (MPa)	Elongación (%)	Reducción área (%)
0.057	288	410	606	24.2	57.8
0.057	288	356	603	26.1	57.9
0.126	20	415	586	23.4	69.9
0.126	66	408	573	21.0	70.4
0.126	280	382	564	17.9	64.7

3.3.5 Caracterización en fractura

3.3.5.1 Ensayos de resiliencia

La Figura 3.31 resume los resultados de ensayos de impacto Charpy realizados sobre probetas de material base en orientación LT en estado no irradiado y para las fluencias correspondientes a las cápsulas 1 y 2. Se puede apreciar un moderado efecto de la irradiación sobre las curvas Charpy. Más que desplazarse en el eje de temperaturas (que es el efecto esperable por la irradiación), las curvas modifican su forma, lo que justifica la variación “anómala” en los valores de T_{41J} (puesto que $\Delta T_{41J} < 0$). Por otra parte, la energía absorbida en la región *Upper Shelf* se ve sólo ligeramente modificada. Estos resultados resultan coherentes con los bajos niveles de fluencia para ambas cápsulas y con la composición química del material.

La Figura 3.32, por su parte, ofrece una comparativa de las respuestas del material en estado no irradiado en función de la orientación, LT y TL, respectivamente. Se pone de manifiesto que la capacidad de absorción de energía está fuertemente influenciada por la orientación del material lo cual, por otra parte, es un hecho conocido y bien documentado. Nótese, sin embargo, que este efecto es reducido en las regiones correspondientes a T_{41J} y, particularmente, a T_{28J} (ambos valores están incluidos en la

propia figura). Por otra parte, en las regiones *Upper Shelf* sí que se aprecia un efecto importante, que se corresponde con una diferencia de 84 J entre ambas orientaciones.

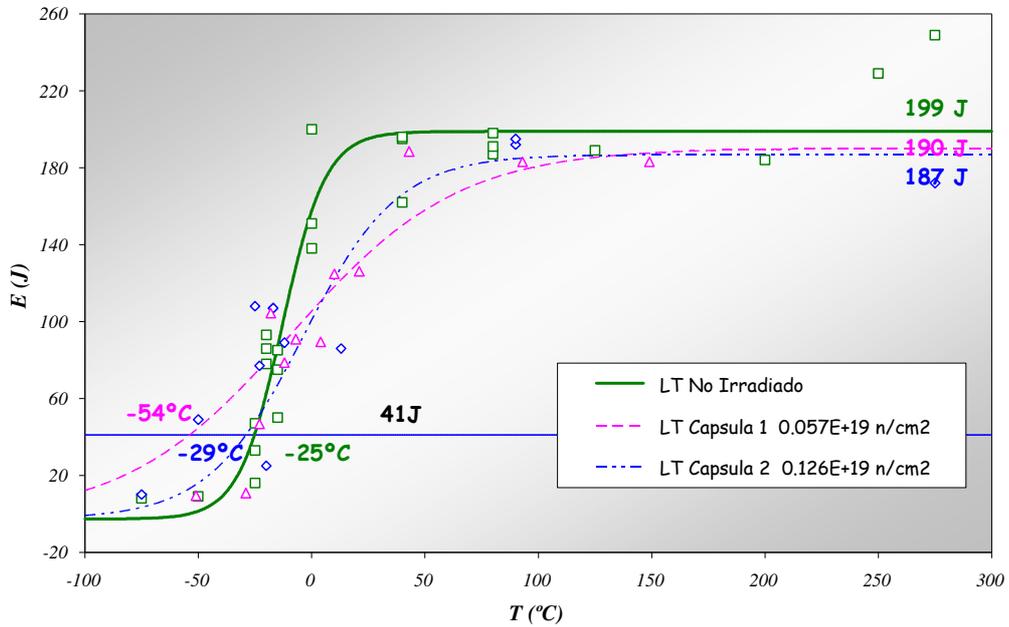


Figura 3.31 Efecto de la irradiación en el material base, orientación LT

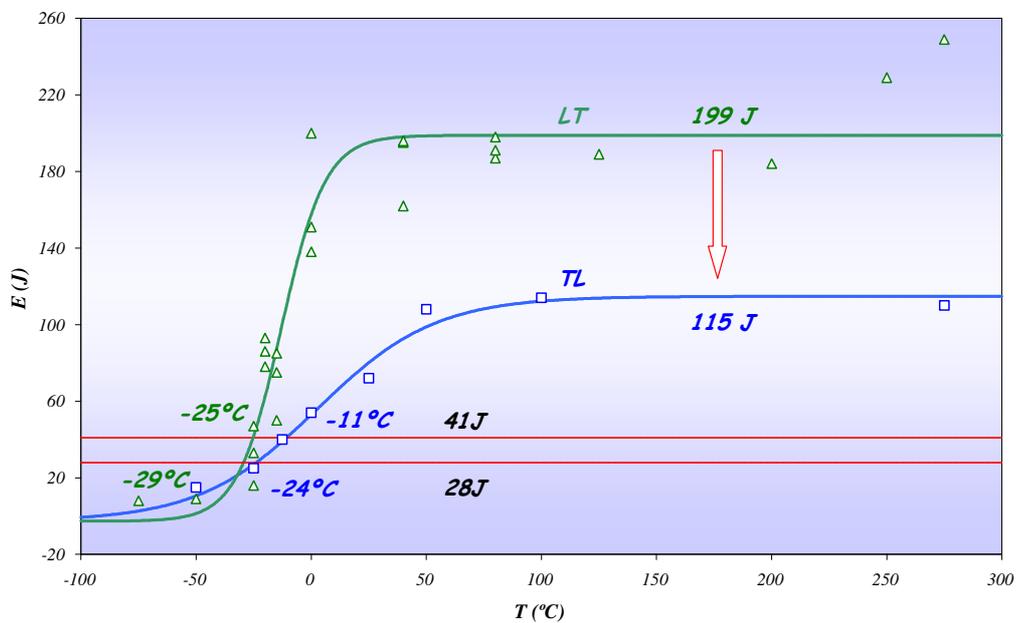


Figura 3.32 Comparación de la orientaciones LT y TL en estado no irradiado

3.3.5.2 Temperatura de referencia RT_{NDT}

Un dato de gran relevancia también proporcionado por la Central Nuclear que aloja la vasija estudiada en esta tesis, es el de su temperatura de referencia RT_{NDT} , que, en este caso, adopta el valor $RT_{NDT} = 16^\circ C$. Como se expuso en el Capítulo 2, Apartado 2.3.1, esta temperatura compendia resultados del ensayo *Pellini-Drop Weight* junto con los de impacto Charpy convencionales. La importancia de RT_{NDT} radica en el hecho de que, de acuerdo con las metodologías clásicas [2, 48], define completamente el comportamiento en fractura de los aceros de vasija, representado por las curvas ASME, (2.1) a (2.4). En consecuencia, el conocimiento de esta información va a permitir cuantificar el conservadurismo implícito en los procedimientos tradicionales de análisis, en comparación con la reciente perspectiva que supone el concepto de Curva Patrón y de Temperatura de Referencia T_0 , lo cual supone uno de los objetivos marcados en esta tesis, según fue expuesto en el Capítulo 1.

3.4 *Proceso experimental*

En los diferentes apartados de esta sección se describen todas y cada una de las etapas del proceso experimental realizado tanto sobre el material complementario como sobre el de interés. Se detalla primeramente el alcance experimental en cada caso así como los procesos de reconstrucción llevados a cabo. En el caso del material de interés se presentan, además, los criterios seguidos para una selección representativa de las probetas así como los ensayos realizados para la validación del proceso reconstructivo. Los resultados experimentales se presentan en el Capítulo 4 del presente documento²⁴.

²⁴ Si bien, se incluyen aquí algunos resultados experimentales de menor trascendencia asociados, por ejemplo, al proceso de validación de los trabajos de reconstrucción.

3.4.1 Selección del material. Proceso de reconstrucción

3.4.1.1 Material complementario

El alcance de las investigaciones realizadas sobre el material complementario JRQ comprende un objetivo primordial como es el de validar la técnica de reconstrucción de probetas. En este sentido, se pretende comparar los resultados de temperatura de referencia T_0 obtenidos a partir de probetas reconstruidas, con implantes de acero JRQ, con aquéllos que provienen de probetas normalizadas, cuyos resultados fueron expuestos en el Apartado 3.2.3 (proporcionados por la base de datos del IAEA).

Para esta etapa del proyecto de investigación se decidió ensayar 12 probetas reconstruidas tipo CT, de 10 mm de espesor, es decir 0.4T CT según la denominación propuesta en las diferentes normativas ASTM (donde “0.4” indica el espesor de la probeta en pulgadas). Este número de probetas es suficiente para la determinación de la temperatura de referencia T_0 , procedimiento que en la mayoría de los casos requiere un volumen de ensayos comprendido entre 6 y 10. Para la reconstrucción se ha utilizado el método de soldadura de haz de electrones (EBW), a partir de implantes prismáticos de $10 \times 10 \times 24 \text{ mm}^3$ extraídos de mitades de probetas Charpy previamente ensayadas. Este tipo de soldadura permite obtener, como ya se expuso anteriormente, las dimensiones de cordón de soldadura y zona afectada térmicamente más reducidas de entre las posibilidades técnicas disponibles.

La Figura 3.33 muestra un esquema de la configuración de las probetas CT empleadas en este estudio, denominadas, “tipo B” (véase [60] o el Apartado 2.6.3.2) para una justificación de esta nomenclatura). En ellas el implante, de 24 mm de longitud, se extiende en toda la altura de la probeta, H . La imagen se corresponde con una de las probetas CT posteriormente ensayadas. La reconstrucción se realiza mediante la soldadura de un material soporte al implante de material objeto de estudio, como la propia figura permite comprobar. Ambos materiales, soportes e implante, son aceros ferríticos de vasija de características y propiedades mecánicas muy similares. En la figura se ha representado, asimismo, la fisura inicial de fatiga, cuya longitud medida desde la línea de carga vale a_0 , la anchura de la probeta desde línea de carga, W , y una banda que se corresponde con la región de material afectada por el proceso de unión,

cordón de soldadura y zona afectada térmicamente (ZAT en adelante), de grosor Δ . Los valores nominales de las diferentes dimensiones, incluyendo el espesor de probeta, B , han sido también incluidos.

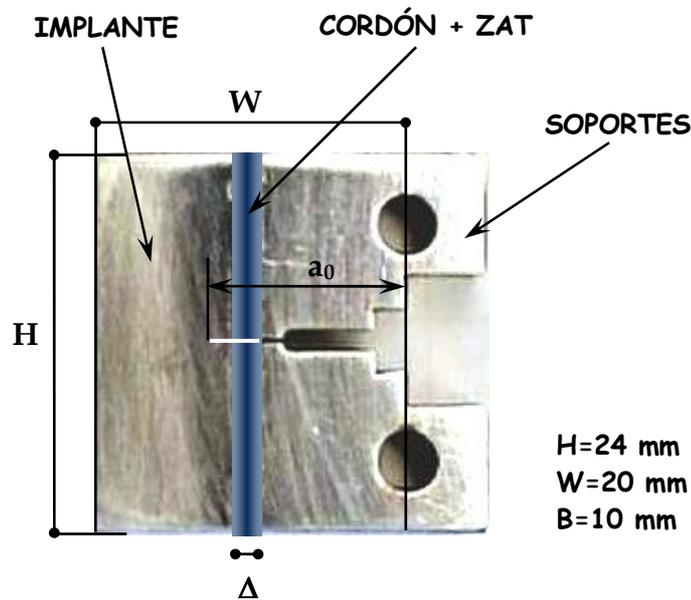


Figura 3.33 Esquema de una probeta reconstruida CT tipo B

El proceso de reconstrucción se describe esquemáticamente en la Figura 3.34. En ella puede observarse la probeta original de impacto Charpy que suministra el implante. La primera tarea consiste en eliminar aquellas zonas plastificadas durante el impacto, tanto en la sección de rotura como en los apoyos. De cada semi-probeta Charpy ensayada convencionalmente puede obtenerse una probeta compacta tipo B. Las longitudes iniciales de las 12 semi-probetas, una vez eliminadas las zonas plastificadas, oscilaban entre los 25.00 mm, para la más pequeña, y los 25.76 mm para la mayor, por lo cual el proceso posterior de mecanizado hasta los 24 mm no ofreció mayores dificultades.

Previamente a la reconstrucción de las 12 probetas para ser ensayadas, en una primera fase operativa fue verificada la soldabilidad de los aceros de baja aleación tanto de las semi-probetas como de los implantes. Fueron determinados, además, los valores óptimos de los parámetros del proceso de soldadura mediante la realización de varias pasadas de prueba con EBW. La soldadura se realiza en un solo paso en el espesor B ,

avanzando el haz en la dimensión H de la probeta; al ser un solo paso el proceso se simplifica.

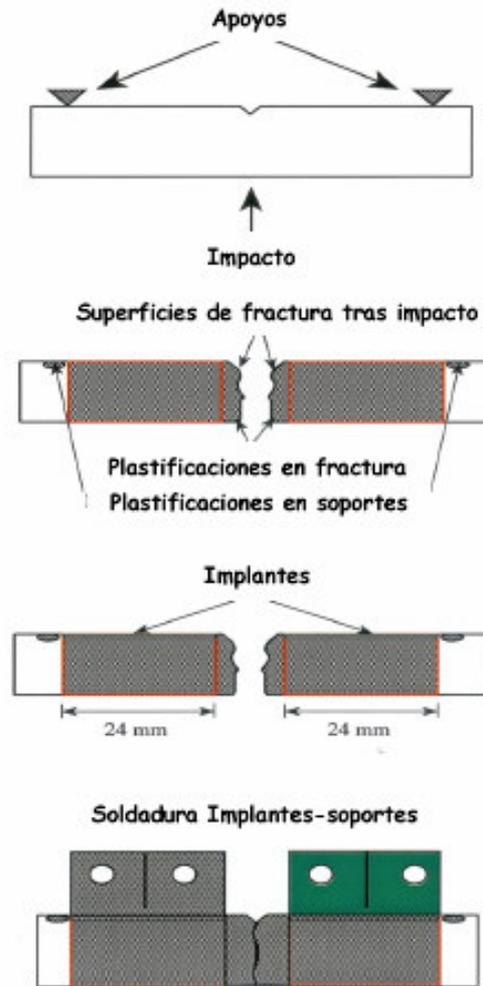


Figura 3.34 Esquema del proceso de reconstrucción de probetas 0.4T CT tipo B

3.4.1.2 Material de interés

El volumen de probetas disponibles para la confección de los trabajos sobre el material de interés fue proporcionado por la central nuclear propietaria del mismo. Se dispone tanto de material no irradiado como irradiado, procedente éste de la cápsula experimental acondicionada para este proyecto de investigación, cuyo valor de fluencia es $\Phi = 0.0355 \cdot 10^{19} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$, $E > 1 \text{ MeV}$. Dado que el proyecto se concentra en la obtención de la temperatura de referencia T_0 , las probetas Charpy disponibles serán

ensayadas en fractura para la obtención de la tenacidad K_{Jc} , de ahí su denominación PCCv (*Pre-Cracked Charpy V*). Seguidamente se enumera el material proporcionado:

- 31 probetas Charpy, PCCv, en orientación LT, material base no irradiado.
- 11 probetas Charpy, PCCv, orientación LT, material base irradiado.
- 1 probeta Charpy adicional, de las mismas características -LT, irradiado-, dañada durante el proceso de extracción de la vasija.
- 4 probetas CT reconstruidas con anterioridad a la ejecución de este proyecto, orientación LT, material irradiado, contenidas en la cápsula experimental.

La Figura 3.35 permite apreciar una sección transversal y una vista lateral de la región del anillo de vigilancia de donde se extrajeron las probetas Charpy de material base, orientación LT. Las probetas están dispuestas simétricamente en los 150 mm de espesor del anillo, en dos familias, a 43 (material irradiado) y 107 mm (material no irradiado) de la pared exterior, respectivamente. Puede apreciarse cómo tanto la profundidad de extracción (muy aproximadamente a 1/4 del espesor), como la orientación de las probetas es coherente con las recomendaciones IAEA (véase el Apartado 3.2.3 de esta tesis) así como con lo estipulado por [56].

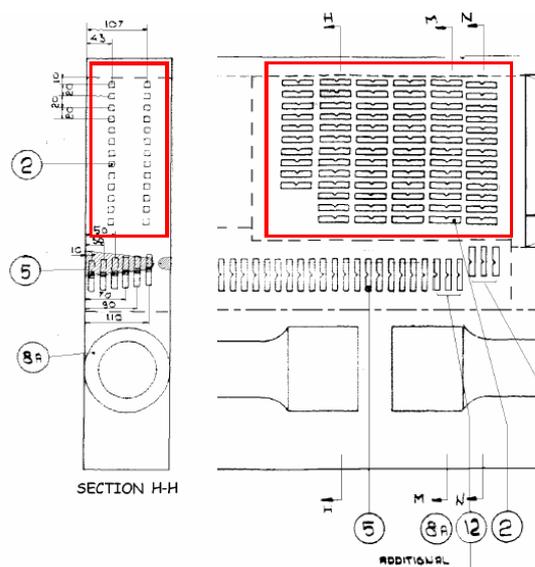


Figura 3.35 Ubicación de las probetas de material base en el anillo de vigilancia

El alcance experimental del proyecto ha sido optimizado para garantizar un aprovechamiento máximo del material. En este sentido se decidió utilizar implantes de tan sólo 10 mm en la reconstrucción de probetas PCCv. De esta forma, además, resulta posible fabricar probetas reconstruidas según varias orientaciones. Puesto que el material original presenta una orientación LT, resulta factible reconstruir probetas PCCv, no sólo con esta orientación, sino también con la TL, tal y como demuestra la Figura 3.36.

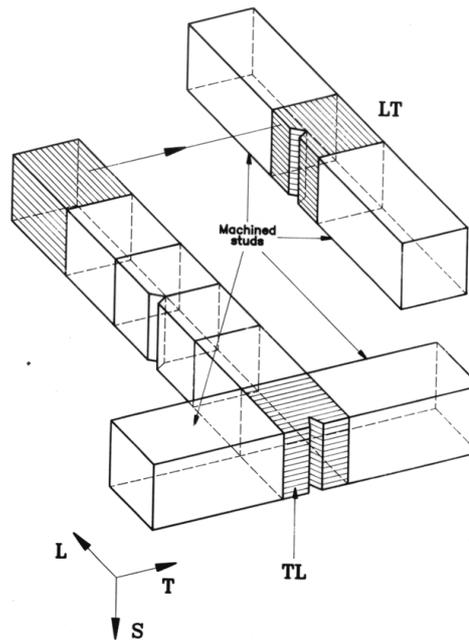


Figura 3.36 Reconstrucción de probetas PCCv en orientaciones LT y TL a partir de probetas con orientación LT

3.4.1.3 Programa experimental sobre el material de interés

La confección del programa experimental se ha elaborado atendiendo a una serie de objetivos de carácter general que se resumen a continuación:

- Caracterizar el comportamiento en fractura del material de interés en la zona de transición, tanto en estado virgen como irradiado, ($0.0355 \cdot 10^{19} \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2}$), por el procedimiento de la Curva Patrón previa obtención de los respectivos valores de Temperatura de Referencia, T_0 .

- A partir de los resultados anteriores, cuantificar la fragilización del material por irradiación neutrónica; comparando este resultado con los resultados empíricos de tipo convencional (impacto Charpy) disponibles así como con los modelos predictivos, de naturaleza semi-teórica.
- Validar las técnicas de reconstrucción de probetas más habituales, PCCv y CT, por comparación de los valores de T_0 obtenidos con estas tipologías experimentales, tanto en estado virgen del material como irradiado, frente a configuraciones normalizadas.
- Comparar los resultados entre ambas tipologías, PCCv y CT, y el posible sesgo existente.
- Analizar el efecto de la orientación del material, LT y TL, en su respuesta en fractura en la zona de transición.
- Evaluar las consecuencias de la velocidad de sollicitación sobre la tenacidad en la zona de transición.

Seguidamente se detallan resumidamente las actividades experimentales desarrolladas así como la justificación de su presencia en este trabajo:

- Primeramente, se han ensayado 15 de las probetas PCCv de material base no irradiado. Estos ensayos permiten obtener el valor de temperatura de referencia, T_0 , en material no irradiado, con probetas normalizadas, orientación LT.
- Con las mitades de probetas ya ensayadas se ha reconstruido un número adecuado de probetas de las familias que se presentan a continuación para la obtención de las respectivas temperaturas de referencia, T_0 :
 - 15 probetas PCCv, orientación LT: su presencia posibilita la validación del proceso de reconstrucción empleado con las probetas PCCv.
 - 15 probetas PCCv, orientación TL: permiten analizar el efecto de la orientación en la tenacidad del material en la zona de transición.

- 13 probetas CT, orientación LT: para validar el proceso de reconstrucción utilizado con probetas CT así como el estudio de cualquier sesgo asociado a la configuración.
- Las 11 probetas PCCv de material irradiado proporcionan el valor de temperatura de referencia, T_0 , en material irradiado, orientación LT, con probetas normalizadas.
- Con las mitades de estas 11 probetas, una vez ensayadas, se ha seguido un proceso similar al del material no irradiado, reconstruyendo:
 - 15 probetas PCCv orientación LT: para la validación del proceso de reconstrucción de probetas PCCv en material irradiado, así como para la cuantificación del efecto de la irradiación, en términos de T_0 .
 - 15 probetas PCCv, orientación TL: permiten la cuantificación del efecto de la orientación del material en su comportamiento en la zona de transición.
 - 7 Probetas CT, tipo B (debiendo considerarse, además, las 4 ya disponibles): con el fin de analizar el efecto de la tipología experimental y validar la reconstrucción.
- 15 probetas PCCv material base no irradiado, orientación LT, fueron destinadas a ensayos de fractura en régimen de impacto dinámico, permitiendo así analizar las consecuencias que la velocidad de sollicitación suponen sobre T_0 .
- La PCCv restante de material base no irradiado, orientación LT, permitió la extracción de 8 probetas de tracción miniatura, orientación L, proporcionando una caracterización mecánica en tracción, material no irradiado, en función de la temperatura.
- La PCCv de material irradiado dañada durante la extracción permitió extraer 4 probetas de tracción miniatura con la misma finalidad que en el caso anterior.

La Tabla 3.7 clarifica la enumeración anterior y resume el conjunto de las principales actividades experimentales desarrolladas para la elaboración de esta tesis. La

presentación de resultados y su análisis se pospone, como ya se ha insistido, hasta el Capítulo 4 de este documento.

Tabla 3.7 Alcance experimental del proyecto

Ensayos K_{Jc}	Estándar	Reconstruidas		PCCv Instrumentado	Mini Tracción
	PCCv	PCCv-10 mm	0.4T-CT		
No irradiado	15 LT	15 LT 15 TL	13 LT	15 LT	8
Irradiado $0.0355 \cdot 10^{19} \text{ n/cm}^2$	11 LT	15 LT 15 TL	11 LT (7+4)		4

El criterio para distribuir el material disponible entre las diferentes probetas reconstruidas debe garantizar la máxima representatividad evitando que ninguna de las poblaciones quede penalizada por una elección particular. Por ejemplo, es preciso evitar que las probetas PCCv sean reconstruidas obedeciendo a un criterio de selección del material según el cual su comportamiento resulte sesgado respecto del de las probetas CT. El criterio de reparto del material que se ha considerado más apropiado se expone a continuación, en primer lugar para el material no irradiado (ver esquema de la Tabla 3.8) y, a continuación, para el material irradiado (esquema en la Tabla 3.9).

Tabla 3.8 Distribución de implantes en material no irradiado

MATERIAL BASE NO IRRADIADO 15 PCCv, LT, 107 mm profundidad							
Estándar	PCCv	Reconstruidas					
		PCCv LT	PCCv TL	CT-LT			
74M	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> RECONSTRUIR: 15 PCCv (LT) 15 PCCv (TL) 13 CT (LT) </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> DENOMINACIÓN PROBETAS RECONSTRUIDAS (ej): CT-LT: 74M/R PCCv-LT: 74M/B PCCv-TL: 74M/A </div>	74M/A	74M/B	74M/R		
74P			74P/A	74P/B	74P/R		
74T			74T/A	74T/B	74T/R		
74U			74U/A	74U/B	74U/R		
74Y			74Y/A	74Y/B	74Y/R		
751			<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> </div>	751/A	751/B	751/R	
752				752/A	752/B	752/R	
753				753/A	753/B	753/R	
754				754/A	754/B	754/R	
755				755/A	755/B	755/R	
756			<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> DENOMINACIÓN PROBETAS RECONSTRUIDAS (ej): PCCv-LT: 75B/A PCCv-TL: 74B/D </div>	756/A	756/B	756/R	
757				757/A	757/B	757/R	
75A				75A/A	75A/B	75A/R	
75B				<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> </div>	75B/A	75B/D	
75C			75C/A		75C/D		

Tabla 3.9 Distribución de implantes en material irradiado

MATERIAL BASE IRRADIADO 11 PCCv, LT, 43 mm profundidad										
Estándar				Reconstruidas						
PCCv										
742	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> RECONSTRUIR: 15 PCCv (LT) 15 PCCv (TL) 7 CT (LT) </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> Hasta la 74B/A, orientación LT: en adelante, orientación TL </div>					742/C	742/D	742/L	
743							743/C	743/D	743/L	
744							744/C	744/D	744/L	
745							745/C	745/D	745/L	
746							746/C	746/D	746/L	
747							747/C	747/D	747/L	
74A							74A/C	74A/D	74A/L	
74B							<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> </div>	74B/A	74B/B	74B/C
74C	74C/A	74C/B	74C/C	74C/D						
74D	74D/A	755/B	74D/C	74D/D						
74E	74E/A	756/B	74E/C	74E/D						

En el caso del material no irradiado se ha comenzado por ordenar el material disponible atendiendo a su numeración, según la notación propia de la planta. Por ejemplo, para las 30 probetas PCCv de material base no irradiado, con orientación LT, la lista sería: 74M, 74P, 74T, 74U, 74Y, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 75A, 75B, 75C, 75D, 75E, 75J, 75K, 75L, 75M, 75P, 75T, 75U, 75Y, 761, 762, 763, 764 y 765.

Las 15 primeras probetas de esta lista (74M a 75C, ambas inclusive) serán destinadas a ensayos de fractura cuasi-estática K_{Jc} para la obtención de T_0 y las mitades de probetas resultantes del ensayo para la reconstrucción de 15 probetas PCCv con orientación LT, 15 probetas PCCv con orientación TL (implante de 10 mm en ambos casos) y 13 probetas CT con orientación LT, ver la Tabla 3.7 y la Tabla 3.8. El material procedente de ensayar cada una de las trece primeras probetas (74M a 75A, ambas inclusive) se empleará en la reconstrucción de una probeta CT orientación LT (consumiendo media Charpy original, implante de 24 mm), de una PCCv LT (un cuarto de Charpy original, implante de 10 mm) y de una PCCv TL (la cuarta parte de Charpy original restante, implante de 10 mm). La reconstrucción de las restantes dos probetas PCCv LT y de las otras dos PCCv TL se realizará a partir de las dos probetas Charpy que completan la población de 15, esto es, la 75B y 75C; en este caso sólo se emplearán los extremos de las probetas, desechando los implantes adyacentes a la entalla.

Para la reconstrucción de las 13 primeras parejas de probetas PCCv-LT y PCCv-TL se respetará, además, el siguiente criterio, Tabla 3.8: si el implante adyacente a la entalla en una probeta ha ido destinado a una PCCv-LT, el de la siguiente (de acuerdo con el orden estipulado) irá a una PCCv-TL. De esta manera se reparten equitativamente y de forma aleatoria los implantes adyacentes a la entalla entre las dos familias de orientaciones reconstruidas, LT y TL. Esta medida se adopta ante la posibilidad, poco probable, puesto que se trata de ensayos a baja temperatura, de que el ensayo de alguna de las probetas PCCv originales implicara deformaciones plásticas de suficiente entidad como para afectar al material de implante situado en las proximidades de la entalla. Finalmente, en el caso de que alguna de las probetas resultara claramente dañada durante el ensayo por plastificaciones y, puesto que se dispone de material en exceso, el implante correspondiente será rechazado y se utilizará el correspondiente a la siguiente de la lista.

El criterio de reparto descrito para el material no irradiado y representado en la Tabla 3.8 resulta, en principio, fácilmente extrapolable al material irradiado sin más que modificar las cantidades de probetas de forma que el resultado final se ciña a la información contenida en la Tabla 3.7. Desafortunadamente, debido a las complicaciones inherentes a la manipulación de material irradiado (que debe realizarse en celda caliente y por medio de dispositivos mecánicos) el criterio de representatividad arriba descrito no pudo ser reproducido en el material irradiado. Por esta razón, los implantes de 10 mm destinados a las PCCv reconstruidas se han repartido correlativamente. En este caso se dispone de 11 probetas PCCv originales a partir de las cuales se pretende reconstruir 15 probetas PCCv, orientación LT, 15 PCCv orientación TL, siempre con implantes de 10 mm, y 7 probetas CT, orientación LT, con implante de 24 mm. Un sencillo cálculo permite constatar que el reparto descrito supone el consumo total del material irradiado disponible. Los 15 primeros implantes de 10 mm se han destinado a las probetas PCCv reconstruidas en orientación LT y el resto a la orientación TL. La Tabla 3.9 ofrece una representación de la distribución final de implantes, indicando sombreado de distinto color las dos familias de implantes según orientación.

Por último, debe mencionarse que, tras el proceso de soldadura, todas y cada una de las probetas fue sometida a un exigente control dimensional para garantizar el cumplimiento de las correspondientes tolerancias geométricas.

3.4.2 Validación del proceso de reconstrucción

En los dos apartados siguientes, 3.4.2.1 y 3.4.2.2, se describen las medidas adoptadas para garantizar la completa representatividad de los resultados de tenacidad obtenidos a partir de probetas reconstruidas de las diferentes tipologías aquí empleadas. El primero de ellos, Apartado 3.4.2.1, se dedica a las probetas CT de material complementario, mientras que el 3.4.2.2, se centra en las dos morfologías utilizadas con el material de interés, CT y PCCv.

3.4.2.1 Material complementario

Los exámenes macrográficos de las uniones soldadas han permitido evaluar las morfologías de las mismas y establecer la idoneidad de sus dimensiones -anchura del cordón de soldadura y extensión de la ZAT- de acuerdo con lo esperable para una soldadura EBW. En la Figura 3.37 se muestra la macrografía realizada a la sección transversal de uno de los cordones de soldadura, en la que se aprecia la anchura del mismo. Se ha indicado sobre la imagen la zona correspondiente al cordón de soldadura, claramente visible, y las regiones adyacentes, cuyo material ha quedado afectado por el aporte de calor durante la unión. El hecho de que la unión se realice en un solo paso facilita el proceso de soldadura pero, como contrapartida implica la variación de la anchura del cordón en el espesor de la probeta, como la Figura 3.37 permite constatar. Este hecho deberá ser tenido en consideración ante la posibilidad de que pudiera afectar a los resultados de los ensayos de tenacidad.

Además del examen macrográfico, se ha llevado a cabo una inspección radiográfica de las soldaduras para la detección de posibles defectos internos. Los resultados fueron aceptables de acuerdo con lo estipulado por la norma ISO EN 13919-1 [100].

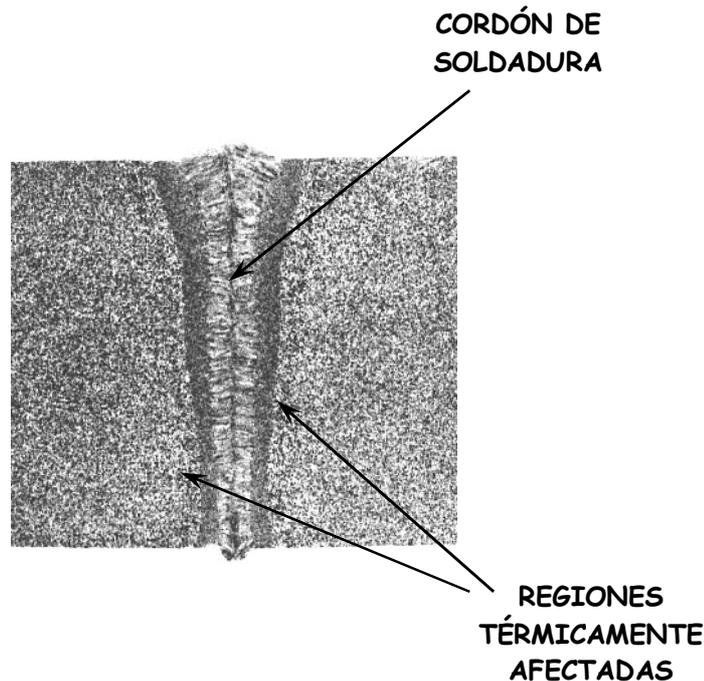


Figura 3.37 Macrografía de un cordón de soldadura por EBW

Un problema asociado con el ensayo de probetas CT tipo B reconstruidas está relacionado con la longitud de la fisura inicial generada por fatiga. La norma propia de ensayo [25] exige una relación entre la longitud inicial de la fisura, a_0 , y la anchura de la probeta, W , comprendida en el intervalo (0.45–0.55). De acuerdo con este criterio deberá cumplirse que $a_0 \leq 11 \text{ mm}$, puesto que $W = 20 \text{ mm}$. Asumiendo que el eje de la soldadura se localice precisamente a 10 mm de la línea de carga, para satisfacer la condición anterior el espesor de la soldadura más la zona afectada térmicamente, Δ , deberá cumplir $\Delta \leq 2 \text{ mm}$, objetivo éste inalcanzable para cualquier técnica de soldadura existente, incluida la de haz de electrones, EBW.

Teniendo en cuenta que, para una satisfactoria caracterización del material, la fisura debe atravesar plenamente la región de soldadura así como la zona adyacente de material térmicamente afectado, resulta evidente la imposibilidad de satisfacer la exigencia $0.45 \leq a_0/W \leq 0.55$ para las probetas CT aquí empleadas (Figura 3.33). Las macrografías realizadas sobre la sección transversal de los cordones de soldadura, permitieron establecer un valor de Δ próximo a 3 mm por lo que, según lo visto anteriormente, resulta necesario sobrepasar el límite de $a_0 \leq 11 \text{ mm}$ impuesto en [25].

De hecho, si se tiene en consideración la zona de desarrollo plástico en el frente de fisura, Figura 3.38 [60], esa distancia deberá verse ligeramente incrementada.

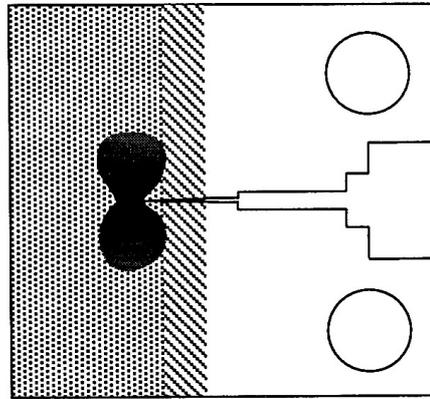


Figura 3.38 Posible interferencia entre zona plástica y material afectado [60]

El procedimiento seguido para evaluar la extensión total de soldadura y ZAT consistió en practicar ensayos de microdureza sobre una probeta reconstruida a lo largo de la hipotética línea de avance de fisura, de modo que el perfil de durezas revelara las microestructuras afectadas por el proceso de unión. La Figura 3.39 presenta los perfiles obtenidos en líneas situadas a 1/4, 1/2 y 3/4 del espesor de la probeta. Estos resultados confirman la necesidad de utilizar longitudes de fisura inicial claramente por encima de los 12 mm para evitar la influencia del proceso de reconstrucción por soldadura en la caracterización a fractura del material del implante.

Las consideraciones anteriores han conducido a considerar una longitud de fisura mínima de valor 12.2 mm. Por esta razón, se decidió fijar en el diseño de las probetas una entalla mecanizada de 8 mm, a la que se añadieron 2 mm por medio de electroerosión y, aproximadamente, otros 2.2–2.5 mm de fisura por fatiga, alcanzándose así los 12.2–12.5 mm requeridos, que suponen una relación $a_0/W = (0.610-0.625)$. Deben tenerse en consideración las incertidumbres en cada caso, particularmente a la hora de establecer, con precisión, una longitud dada de fisura mediante fatiga.

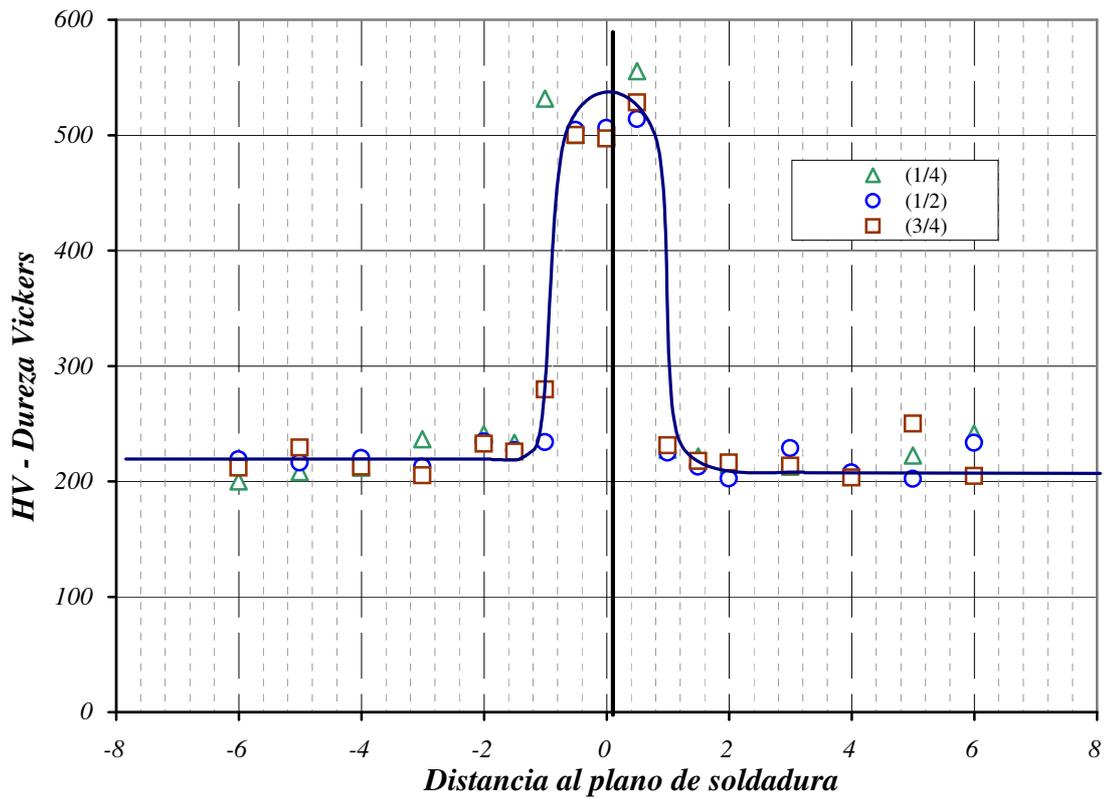


Figura 3.39 Perfil de microdurezas en un cordón EBW

El hecho de vulnerar el requisito de longitud de fisura exigido en la norma de ensayo no debe producir modificación alguna en los valores de T_0 obtenidos con probetas CT reconstruidas. En caso contrario, esta técnica experimental deberá ser descartada. No obstante, en espera de los resultados empíricos definitivos, pueden mencionarse una serie de evidencias a favor de la representatividad de los resultados obtenidos por medio de probetas CT con longitudes de fisura pertenecientes al rango aquí empleado.

Primeramente, los resultados presentados en la referencia [60] comprenden ensayos de tenacidad con probetas CT tipo B, similares a las aquí utilizadas, realizados a temperatura ambiente, que resultaron plenamente coherentes con aquéllos provenientes de probetas normalizadas. Con fisuras suficientemente largas se evitó interferencia entre la zona plástica desarrollada durante el ensayo y el material afectado por la soldadura a pesar de tratarse de ensayos a temperatura ambiente.

Además, en el caso de los ensayos pertenecientes a esta tesis, dicha posibilidad se reduce aún más, por cuanto serán desarrollados en la zona de transición, a bajas temperaturas, quedando de esta forma limitados los mecanismos dúctiles del material y en consecuencia, el tamaño de la zona plástica.

Por otra parte, las expresiones que figuran en [25] para la obtención de la tenacidad K_{Jc} son las mismas que se contemplan en otras normativas ASTM (aglutinadas actualmente en la norma [40]) donde, sin embargo, los límites para los valores iniciales de fisura no resultan tan exigentes, admitiéndose valores como los aquí descritos para alcanzar la región de material representativo. Esta misma circunstancia se da en normas europeas como la ESIS P2-92 [101].

Además, debe mencionarse que la propia norma ASTM E 1921 [25] presenta una restricción en cuanto a los valores de K_{Jc} aceptables relacionada con el mantenimiento de condiciones de elevado confinamiento en el frente de fisura. En el Capítulo 2 se justificó esta necesidad a fin de que el parámetro K_{Jc} resultara representativo de la tenacidad del material. Esta condición se convierte en una limitación de las longitudes admisibles de fisura. En el apartado 7.5 *Specimen Dimension Requirements* de [25] figura la siguiente exigencia²⁵ en cuanto al ligamento residual, $b_0 = W - a_0$:

The specimen remaining ligament, b_0 , must have sufficient size to maintain a condition of high crack front constraint at fracture. The maximum K_{Jc} capacity of a specimen is given by

$$K_{Jc(\text{lim})} = \sqrt{\frac{Eb_0\sigma_{Ys}}{30(1-\nu^2)}} \quad (3.5)$$

²⁵ La expresión de esta condición ha ido cambiando con las diferentes versiones de la norma [25]. La expresión (3.5) es la que figura en las versiones posteriores al año 2002. Sin embargo, dado que el trabajo sobre el material complementario fue realizado en 2001, la expresión correspondiente es:

$$K_{Jc(\text{lim})} = \sqrt{\frac{Eb_0\sigma_{Ys}}{30}}$$

donde σ_{ys} representa el límite elástico del material a la temperatura del ensayo.

Esta expresión justifica teóricamente el valor del ligamento residual a respetar, de modo que se satisfagan las condiciones de elevado confinamiento en el frente de fisura.

Finalmente, el hecho de considerar una fisura de longitud ligeramente superior en las probetas CT reconstruidas supone incrementar (tímidamente, en este caso) las condiciones de confinamiento en el frente de fisura. En el Capítulo 2, Apartado 2.4.4.4, se describió un efecto observado de manera sistemática según el cual, los valores de temperatura de referencia T_0 obtenidos mediante probetas CT son, aproximadamente 10°C superiores a los provenientes de probetas PCCv. Este hecho se asociaba a las condiciones de mayor confinamiento que operan en probetas CT. Adicionalmente, un pequeño incremento en la longitud de fisura puede aumentar, también ligeramente, el valor de T_0 obtenido mediante estas probetas CT (véase la Figura 2.35 [35]) ofreciendo, en consecuencia, una caracterización, si cabe, más conservadora del material analizado.

3.4.2.2 Material de interés

Debido a su importancia, los procedimientos de reconstrucción utilizados con el material de interés (probetas PCCv con implante de 10 mm y soldadura ASW así como probetas CT tipo B, por soldadura EBW) han sido sometidos a una serie de pruebas exigentes que garanticen la calidad de las soldaduras. Aspectos tales como el espesor de los cordones o su resistencia mecánica, su apariencia externa o la aportación de calor al implante durante la unión han sido convenientemente analizados. Seguidamente se resumen las principales actividades desarrolladas y los resultados que de ellas se desprenden.

- **Reconstrucción por ASW de probetas PCCv con implante de 10 mm**

Las tareas de reconstrucción de probetas PCCv comprendidas en este proyecto han sido desempeñadas por el centro belga de investigación SCK-CEN. Se describen aquí los procedimientos empleados por este grupo en la cualificación del proceso de soldadura mediante ASW así como algunos estudios propios realizados con posterioridad tras la recepción del material para garantizar la representatividad de los resultados.

- Preparación de las probetas y materiales empleados

La preparación de los soportes e implantes fue practicada por SCK-CEN de acuerdo con las conclusiones desprendidas de los trabajos descritos en [102²⁶, 103] atendiendo asimismo a la normativa ASTM para la reconstrucción de probetas Charpy irradiadas [66]. Los soportes cilíndricos de 16 mm de diámetro, Figura 3.40 [103], fueron mecanizados a partir de un bloque de acero SA 508 (denominación ASME [97]) empleado para idéntico fin en el contexto de la referencia [60]. Su composición química queda recogida en la Tabla 3.10 [60].

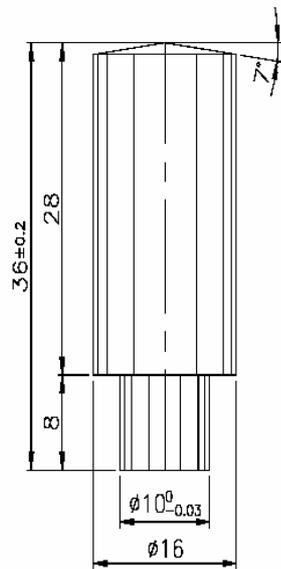


Figura 3.40 Esquema de un soporte empleado en el proceso de reconstrucción [103]

Tabla 3.10 Composición química del acero A508 empleado en los soportes [60]

C	Si	P	S	Cr	Mn	Mo
0.17/0.2	0.15/0.3	0.012 max	0.008 max	0.2 max	1.2/1.5	0.45/0.5

La secuencia del proceso de reconstrucción, tanto en material virgen como irradiado se resume en la Figura 2.52 [78]. En el caso del material irradiado el trabajo de

²⁶ La referencia [102] representa el informe final del Proyecto RESQUE, potente trabajo de investigación a nivel internacional, destinado al estudio de los procesos de reconstrucción en el sector nuclear.

reconstrucción debe ser realizado en “celda caliente” (*hot cell*) lo que supone una dificultad adicional. La Figura 3.41, proporcionada por SCK-CEN permite apreciar una instantánea de dicho proceso.

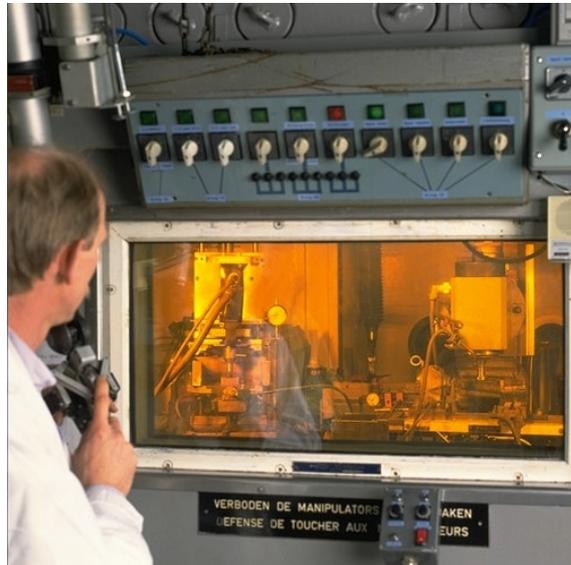


Figura 3.41 Imagen del proceso de reconstrucción en celda caliente

- Parámetros de la soldadura ASW

La intensidad y el tiempo de aplicación de la corriente eléctrica, que definen el proceso de soldadura ASW, deben seleccionarse de forma que la unión sea completa, de alta calidad, pero evitando un aporte excesivo de calor que pudiera llegar a recocer el material en la zona de proceso del posterior ensayo de fractura. Este hecho resulta particularmente trascendente para el material irradiado donde un posible recocido pudiera llegar a recuperar parte del daño por irradiación experimentado por el material, que es precisamente lo que se pretende evaluar. Los trabajos [102, 103], derivados de la experiencia acumulada por el SCK-CEN, justifican el empleo de una corriente de 1000 A aplicada durante 0.16 s para el material no irradiado y 0.18 s para el irradiado. La soldadura fue siempre realizada en atmósfera inerte (argón) para evitar su oxidación. Durante el proceso de reconstrucción se registró de forma continua la intensidad y el voltaje en función del tiempo, generando gráficas tales como la que se reproduce en la Figura 3.42 [103].

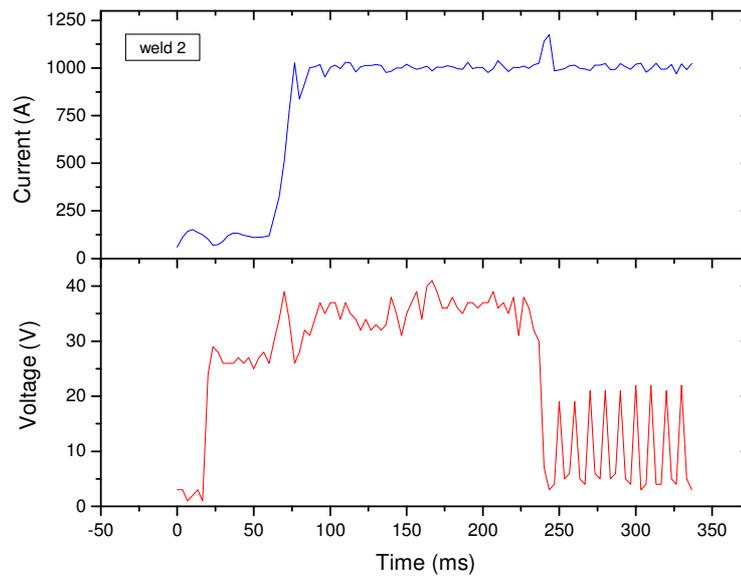


Figura 3.42 Registro típico de intensidad y voltaje durante una soldadura [103]

- Medición de temperaturas

El grupo de trabajo del SCK-CEN reconstruyó, de acuerdo con los parámetros anteriormente mencionados, un total de once probetas PCCv con implantes de 10 mm, de carácter adicional, destinadas a los trabajos previos de cualificación de la soldadura. Para conocer el estado térmico producido por el proceso se introdujo un termopar de 1 mm de diámetro a una distancia de 5 mm de la superficie soldada, Figura 3.43 [104]. La Figura 3.44 [103] ofrece un ejemplo típico del registro de temperaturas en función del tiempo; en ella se representan los perfiles de temperatura para cada una de las dos soldaduras durante el proceso de unión considerando en cada caso. Como puede observarse, aparecen cuatro curvas, dos de ellas para la primera soldadura y otras dos para la segunda. Ello es debido a que en cada ocasión se sueldan simultáneamente un grupo de probetas, practicando primero la soldadura de los soportes de uno de los lados (primera soldadura) y después la del otro (segunda soldadura), véase la Figura 2.52 [65]. En cada caso, se colocan en los extremos de cada familia de probetas dos probetas adicionales (*dummy specimen*) en las que se aloja el termopar, Figura 3.43 [104]. De esta forma, para cada uno de los procesos de unión se dispone de dos registros, uno correspondiente al termopar situado al inicio y otro al que se posiciona al final.

En la Tabla 3.11 [103] se recogen los valores máximos de temperatura registrados que resultan inferiores a la temperatura de operación de la planta, $\approx 288^{\circ}C$. En consecuencia, puede afirmarse que el proceso de soldadura ejecutado con los parámetros tiempo e intensidad arriba mencionados no debe afectar a la representatividad de los resultados desde el punto de vista de la posible afección térmica del material.

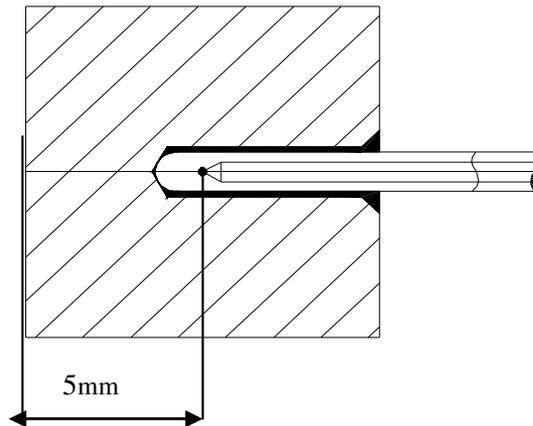


Figura 3.43 Esquema del termopar empleado en la medición de temperatura durante la soldadura [104]

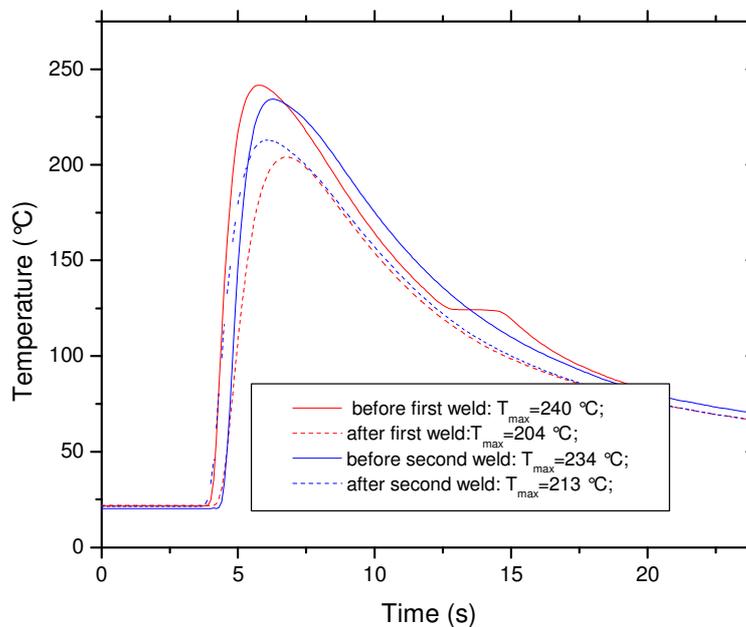


Figura 3.44 Registro térmico típico durante la soldadura [103]

Tabla 3.11 Valores representativos registrados durante la soldadura [103]

	Intensidad (A)	Voltaje (V)	Tiempo (s)	Energía (kJ)	Tmax (°C)
Antes primera soldadura	1002	26	0.16	4.2	240
Después primera soldadura	998	21	0.16	3.3	2.4
Antes segunda soldadura	1012	24	0.16	3.9	234
Después segunda soldadura	1007	23	0.16	3.7	213

- Medición de microdurezas

En algunas probetas seleccionadas se practicaron medidas de microdureza para estimar la anchura de la región del implante afectada por el proceso de soldadura. La Figura 3.45 [103] ofrece una gráfica con dichos resultados. Como se aprecia, la distancia libre entre zonas afectadas térmicamente es de aproximadamente 5 mm, intervalo suficiente para acoger la zona de proceso desarrollada durante el posterior ensayo de fractura, especialmente para temperaturas reducidas.

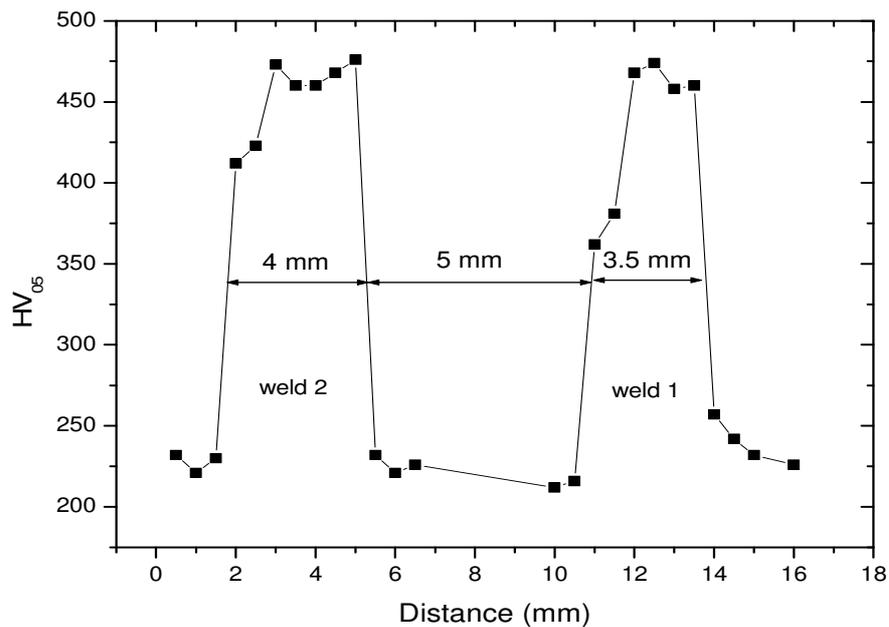


Figura 3.45 Registro de microdurezas en una PCCv reconstruida [103]

- Evaluación de la resistencia mecánica de la soldadura

Tras el proceso de reconstrucción, el SCK-CEN practicó dos ensayos de evaluación de la resistencia de las soldaduras: ensayo de flexión por martillo y de flexión en tres puntos. Se trata de pruebas muy exigentes, desarrolladas por el propio SCK-CEN [102]

para garantizar la adecuada resistencia de las soldaduras que garanticen la continuidad en la probeta reconstruida durante el ensayo de tenacidad.

En el primero de ellos, que se representa en la Figura 3.46 [102], se somete a la segunda soldadura a un proceso de flexión por medio de un martillo comprobándose que se alcanza un valor de rotación de, al menos, 45°.

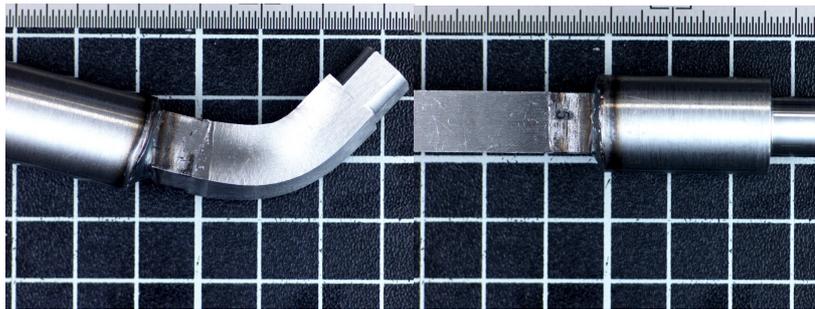


Figura 3.46 Instantánea del ensayo de flexión por martillo [102]

En la segunda prueba se somete a una serie de probetas reconstruidas sin entallar a ensayos de flexión cuasi-estática en tres puntos hasta valores máximos de carga de 30 kN. El ensayo se realiza a temperaturas de -70°C y 200 °C. El proceso de carga se detiene cuando alguna de las soldaduras falla o cuando la curva fuerza-deflexión alcanza un máximo. La Figura 3.47 [103] ofrece imágenes de algunas probetas ensayadas y la Figura 3.48 [103] los valores de carga registrados. En todos los casos se superaron los 18 kN, lo cual ofrece garantías de cara al posterior ensayo de fractura donde rara vez se superan los 7 kN.

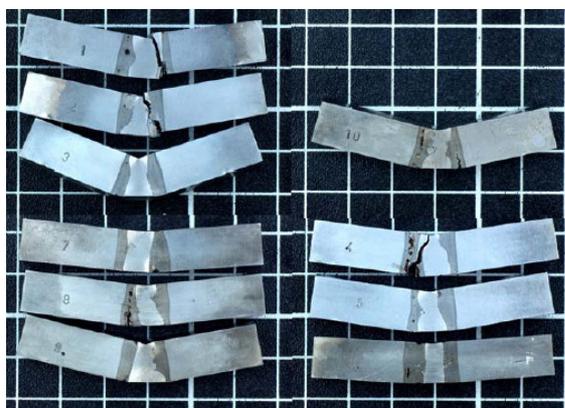


Figura 3.47 Imagen de algunas probetas tras el ensayo de flexión en tres puntos [103]

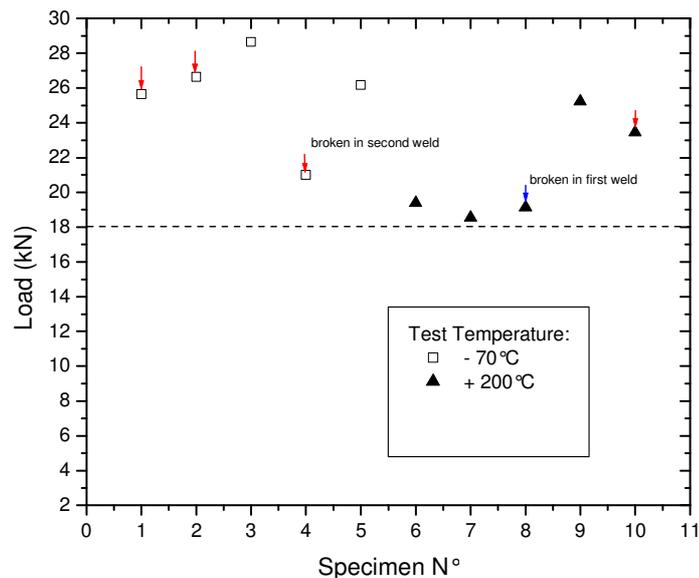


Figura 3.48 Resultados de carga en el ensayo de flexión en tres puntos [103]

○ **Reconstrucción de probetas CT tipo B por EBW**

Las tareas de reconstrucción de probetas CT comprendidas en esta tesis han sido desempeñadas por el grupo FRAMATOME ANP. En este apartado se describen los procedimientos empleados en la cualificación del proceso de soldadura mediante EBW por el propio FRAMATOME [105].

● Preparación de muestras; parámetros de soldadura

Las instalaciones de soldadura fueron previamente acondicionadas para las dimensiones físicas de las probetas 0.4T CT. Los parámetros de la soldadura de un solo paso fueron optimizados a partir de una familia constituida por once probetas de carácter auxiliar y se resumen en la Tabla 3.12 [105]. La Figura 3.49 [105] presenta una de las probetas auxiliares; en ella pueden apreciarse una pareja de taladros destinados al alojamiento de termopares para el control de temperaturas durante el proceso de unión.

Como se describe más adelante, estas once probetas auxiliares, reconstruidas con anterioridad a la soldadura de las probetas CT definitivas, permitieron analizar la apariencia física del cordón, las dimensiones geométricas finales de la probeta así como realizar mediciones de temperatura durante el proceso de soldadura (en diferentes posiciones y a una profundidad de 5 mm) y microdurezas posteriores.

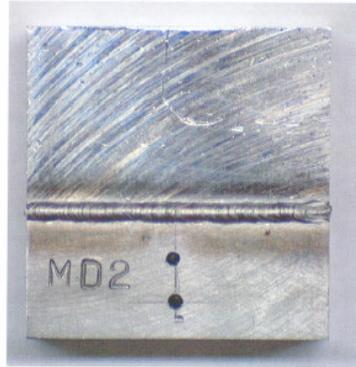


Figura 3.49 Probeta adicional destinada a la cualificación de la unión EBW [105]

Tabla 3.12 Principales parámetros de la soldadura EBW [105]

Velocidad	Corriente en cátodo	Voltaje	Modo operación	Corriente de soldadura	Distancia de trabajo	Presión en cámara
10 mm/s	1.9 A	150 kV	Continuo	15.5 mA	220 mm	$<2 \cdot 10^5$ bar

A continuación se reproducen algunas imágenes, proporcionadas por FRAMATOME ANP que se corresponden con los principales ensayos realizados para la cualificación de las soldaduras. La Figura 3.50 [105] permite apreciar la apariencia del cordón de soldadura por ambas caras. Se puede constatar que el espesor del mismo aumenta desde la cara de entrada hasta la de finalización. Esta modificación del espesor es, sin embargo, de poca importancia; atendiendo a la información contenida en la Figura 3.51 [105]: el espesor del cordón en la cara de entrada supera ligeramente los 2 mm mientras que en la de salida rebasa ligeramente los 3 mm.

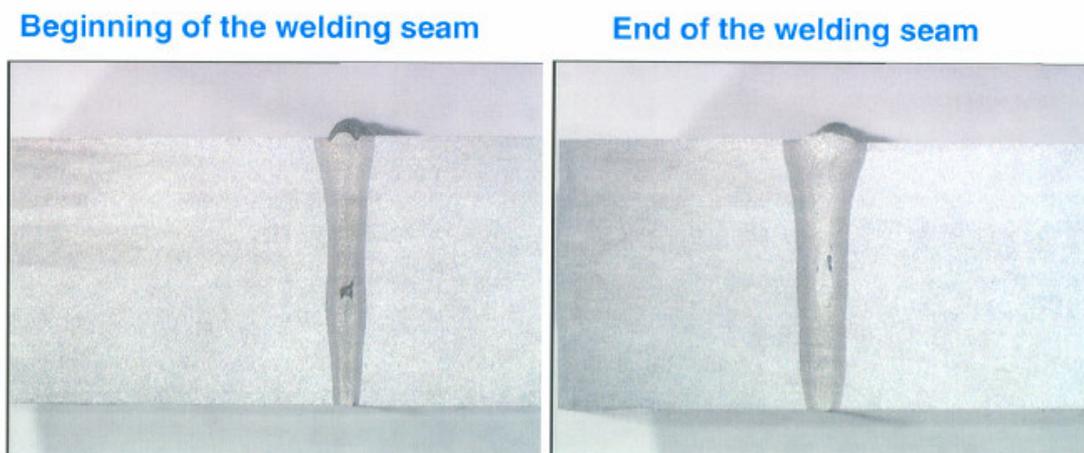


Figura 3.50 Apariencia final de los cordones de soldadura (ambas caras) [105]

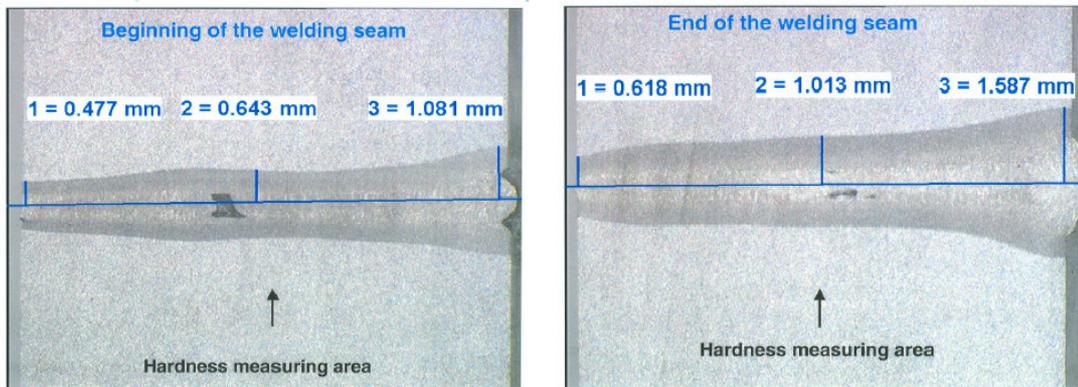


Figura 3.51 Mediciones visuales de espesor de los cordones (ambas caras) [105]

- Medición de microdurezas

Otra de las actividades de cualificación desarrolladas por FRAMATOME ANP consistió en la medida de microdurezas en ambas caras de las probetas auxiliares. Las indentaciones fueron realizadas atravesando ambos cordones por su sección media, como se indica en la Figura 3.51 [105]. La Figura 3.52 [105] ofrece los resultados correspondientes a la cara de entrada y la Figura 3.53 [105] a la de salida.

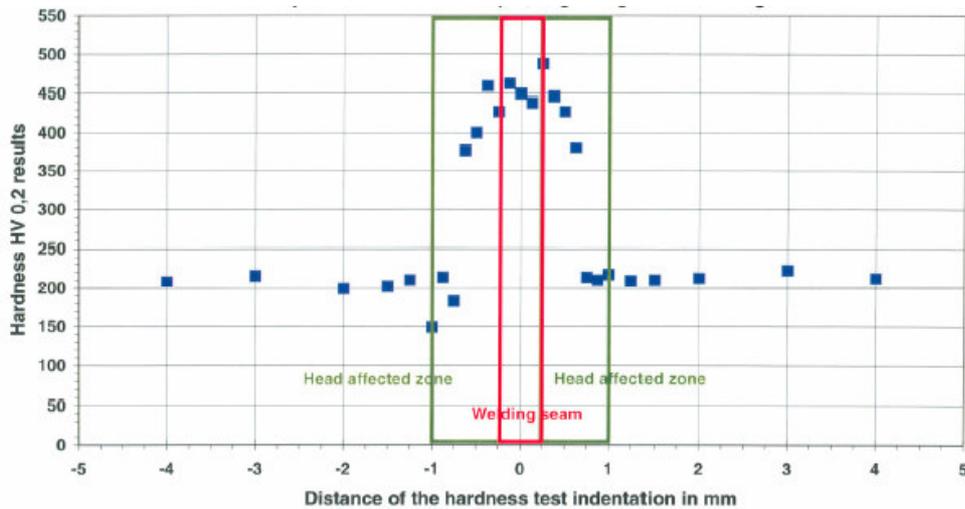


Figura 3.52 Medición de espesor de los cordones por microdurezas (cara de entrada) [105]

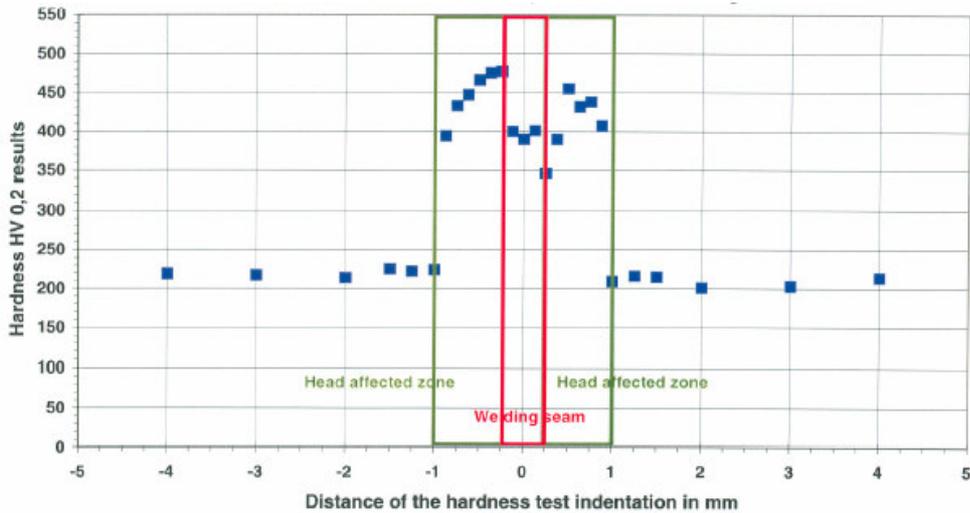


Figura 3.53 Medición de espesor de los cordones por microdurezas (cara de salida) [105]

- Medición de temperaturas

El resultado de la medición de temperaturas se recoge en la Figura 3.54 [105]. En ella se representan tres taladros, de 5 mm de profundidad, similares a los que aparecen en la Figura 3.49 [105], destinados al alojamiento de los correspondientes termopares. En localizaciones próximas al cordón se llega a superar la temperatura de operación de la planta ($\approx 288^{\circ}\text{C}$) lo que pudiera suponer un tratamiento de recuperación del daño experimentado. Esta posibilidad se antoja sumamente improbable por cuanto el tiempo de aplicación de energía es sumamente reducido. Como se desprende de la información contenida en la Tabla 3.12 (atendiendo al parámetro de velocidad de la soldadura) el proceso de soldadura de cada probeta conlleva un tiempo teórico de 2.4 s, insuficiente para desarrollar un tratamiento de recocido.



Figura 3.54 Ttemperatura máxima registrada durante la unión (profundidad de 5 mm) [105]

Como ejemplo del acabado final de una probeta CT tipo B reconstruida ensayada en esta tesis, puede observarse la Figura 3.55 [105], en la que se ofrecen ambas caras de la probeta 756/R. La Tabla 3.8 permite clasificar esta probeta dentro de la familia de las correspondientes al material no irradiado.

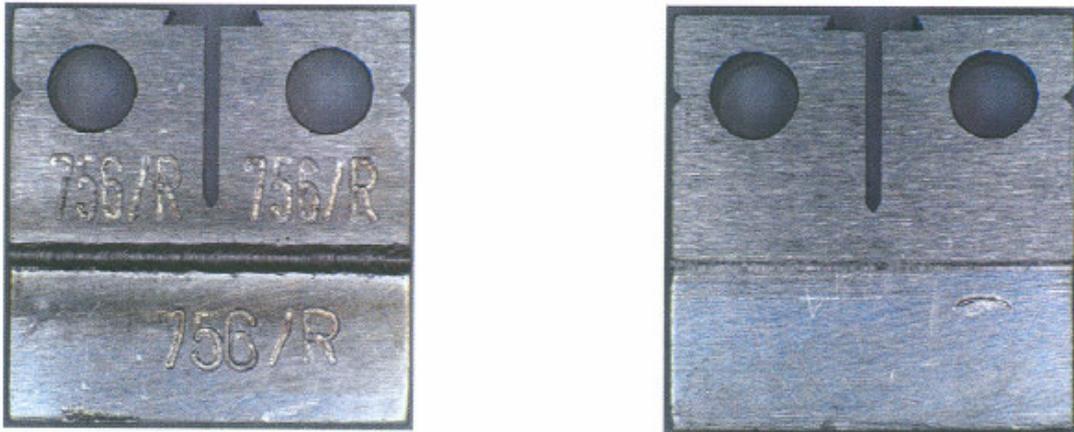


Figura 3.55 Acabado final de una probeta CT tipo B reconstruida con soldadura EBW (ambas caras) [105]

- Ensayos complementarios

Además de las medidas descritas anteriormente, se decidió practicar ensayos de microdureza [98] sobre las probetas CT reconstruidas, más exhaustivos que los realizados por FRAMATOME ANP. Las curvas contenidas en las Figura 3.52 [105] y Figura 3.53 [105] fueron realizadas en la línea media del espesor de la probeta (como se indica en la Figura 3.51 [105]), de forma que no recogen el efecto de la variación de la anchura del cordón de soldadura. Por este motivo, se consideró pertinente la realización de ensayos en diferentes líneas en la parte del espesor correspondiente con la zona de salida del haz, donde la anchura del cordón es máxima. La Figura 3.56 permite apreciar el incremento de tamaño que experimenta la región afectada por la soldadura a medida que disminuye la distancia a la cara de salida del cordón. A partir de esta información se decidió considerar como valores admisibles de fisura únicamente aquellas que superaran un valor de $a_0 = 12.2 \text{ mm}$, coincidente con el empleado en el material complementario (véase el Apartado 3.4.2.1).

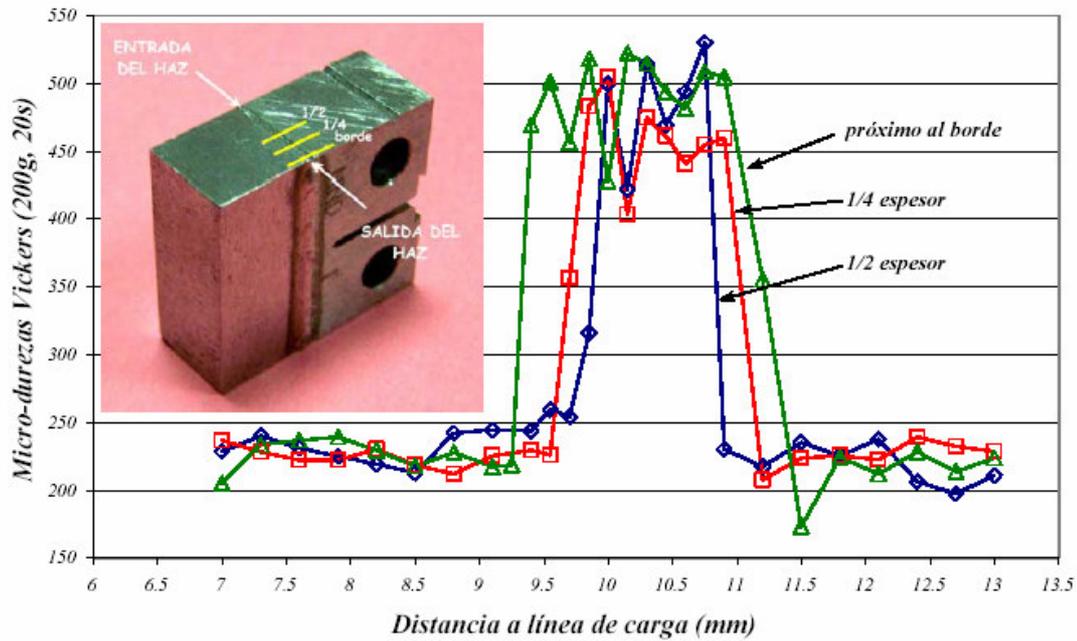


Figura 3.56 Estudio de espesor del cordón de soldadura por microdurezas

3.4.3 Ensayos de tenacidad K_{Jc}

Los ensayos de fractura sobre material irradiado han sido llevados a cabo por el SCK-CEN, en tanto que aquéllos sobre material virgen (tanto en el caso del material complementario como del material de interés) fueron desarrollados por el LADICIM-UC. El autor de esta tesis ha actuado en calidad de responsable material de estos últimos y de supervisor de los primeros. Los ensayos de tenacidad conllevan clásicamente dos etapas diferentes: la de prefisuración y la de fractura propiamente dicha. Ambos procesos fueron llevados a cabo en sendas máquinas universales INSTRON Modelo 8501, una ubicada en el interior de una celda caliente para su uso en el caso del material irradiado. Las características del ensayo han sido las contempladas en la norma de ensayo para la determinación de T_0 [25]. Los párrafos que siguen, se dedican a la descripción de los ensayos tal y como fueron practicados en la UC, incorporando comentarios acerca de los ensayos SCK-CEN únicamente cuando existan diferencias de relevancia o características reseñables.

La secuencia de actividades para la obtención de la tenacidad de cada una de las probetas se describe en este apartado. En el Apartado 3.4.4, se recoge el procedimiento

de obtención de T_0 a partir de los resultados de tenacidad K_{Jc} . Las expresiones analíticas empleadas en ambos casos han sido extensamente justificadas en el Capítulo 2 de esta tesis.

El ensayo de tenacidad según [25] pueden desglosarse, esquemáticamente, en las siguientes etapas: prefisuración, selección de la temperatura de ensayo, ensayo de fractura, medición de la fisura, obtención de la longitud de fisura, cálculo de K_{Jc} y cualificación del resultado. Estas tareas se describen brevemente en los párrafos que siguen indicando los resultados experimentales obtenidos así como, para mayor información, la sección de la norma de ensayo [25] donde dicha información viene contemplada.

Durante el proceso de prefisuración deben diferenciarse, según el apartado 7.8 de [25], al menos, dos etapas: una de iniciación y otra de acabado final de la fisura, de cara a conseguir una geometría de la misma lo más afilada posible. Para la iniciación se recomienda no superar el valor $K_{\max}/E = 1.3 \cdot 10^{-4} \pm 5\% m^{1/2}$. Para el acabado, en el caso general en el cual la temperatura de prefisuración, T_1 , difiera de la de ensayo, T_2 , el límite a respetar es $K_{\max}/E = [\sigma_{Ys(T_1)}/\sigma_{Ys(T_2)}] \cdot 9.6 \cdot 10^{-5} \pm 5\%$. La relación de carga durante la fatiga, R , (cociente entre la carga mínima y la máxima) debe verificar las limitaciones $0.01 < R < 0.1$, recomendándose los valores más reducidos. La longitud de prefisura de fatiga debe ser no inferior al 5% de la longitud total de fisura.

En el caso de la prefisuración por fatiga la frecuencia de trabajo ha sido de aproximadamente 20 Hz durante todo el proceso. Las cargas de trabajo han sido cuidadosamente seleccionadas a fin de evitar una potencial alteración en la representatividad del ensayo posterior de fractura debido a la presencia de una zona plástica de importancia en el frente de fisura. En [25] se recogen expresiones que limitan el valor de la carga máxima aplicable durante la prefisuración; en atención a las mismas el valor de K_{\max} se ha acotado en $26 MPa \cdot m^{1/2}$ durante el comienzo del proceso y en $14 MPa \cdot m^{1/2}$ en su parte final. El avance de la fisura hasta el valor requerido fue controlado en tiempo real por medio de la lectura de la flexibilidad de la probeta. Este valor puede correlacionarse, con ciertas incertidumbres, con el valor de

longitud de fisura en cada instante. A fin de soslayar o minimizar estas imprecisiones, el proceso de prefisuración del material no irradiado fue, en todos los casos, interrumpido en repetidas ocasiones para practicar medidas de longitud de fisura a lo largo de las caras externas de la probeta por medio de microscopía óptica. En el caso del material irradiado esta estrategia no pudo ser desarrollada por las dificultades asociadas a la realización del ensayo en celda caliente. Ello no supuso, finalmente, ninguna inconveniencia.

En el apartado 8.4 de [25] se proporciona un método de selección de la temperatura de ensayo. Se recomienda que la temperatura seleccionada sea próxima a aquella para la cual la mediana de las tenacidades, $K_{Jc(\text{med})}$, resulte lo más próxima posible a $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, es decir, debe ensayarse a temperaturas próximas a T_0 . Dado que este valor no resulta conocido a priori, en [25] se contempla un procedimiento de estimación de la misma a partir de las temperaturas significativas obtenidas de las curvas de impacto Charpy, T_{28J} o T_{41J} , denominadas, genéricamente en [25] como T_{CVN} . Añadiendo una constante a este valor, que depende del tipo y espesor de la probeta del ensayo de tenacidad resulta posible estimar un valor aproximado de temperatura de ensayo. Los valores de esta constante, para las probetas contempladas en este trabajo, PCCv y CT 0.4T, se recogen en la Tabla 3.13, extraída de la tabla correspondiente de la norma. Introduciendo en las expresiones correspondientes los valores del material del proyecto, Tabla 3.14, se obtendrían las estimaciones de temperatura de ensayo.

Deben matizarse varios puntos con referencia a este procedimiento. En primer lugar, para el caso del material irradiado no se conocen, a priori, sus valores de T_{28J} o T_{41J} para la fluencia de proyecto, $0.0355\cdot 10^{19} \text{ n/cm}^2$ lo que obliga a su obtención por interpolación a partir de la información correspondiente al material virgen y de las dos cápsulas del programa de vigilancia. Por otra parte, para el material en orientación TL únicamente se dispone de datos en condición no irradiada, de modo que la estimación se vuelve todavía más insegura. Además, en el material LT, el débil proceso de fragilización experimentado supone que los valores de T_{28J} y T_{41J} disminuyan ligeramente con la irradiación, en lugar de aumentar, tal y como se recoge en la Figura

3.31. Para el material complementario, la información disponible es la que se presenta en la Tabla 3.3 [93], añadida a su vez a la Tabla 3.14.

En cualquier caso, siempre que las temperaturas de ensayo no se encuentren muy alejadas del valor de T_0 el procedimiento resulta válido (recuérdese el concepto de ventana de validez, Apartado 2.4.5.4). Además, en caso de utilizar la opción de ensayo multi-temperatura, la temperatura se puede corregir en ensayos sucesivos, a medida que se dispone de estimaciones cada vez más precisas de T_0 . Finalmente, la norma ASTM [25] recomienda la utilización de temperaturas sensiblemente inferiores a las que se derivan del procedimiento anterior en los casos de materiales con valores reducidos del USE (para evitar propagaciones estables) o del límite elástico (para evitar que se incumpla la condición (3.5)). Esta estrategia debe ser practicada con cierta cautela pues a medida que las temperaturas de ensayo se alejan del valor de T_0 las incertidumbres en la temperatura de referencia se incrementan e incluso, en casos extremos, el valor obtenido de temperatura de referencia puede resultar inválido.

Por esta razón los resultados de las estimaciones de la temperatura de ensayo que se recogen en la Tabla 3.15 deberán considerarse sólo como orientativos y no vinculantes para el proceso experimental posterior.

Tabla 3.13 Constante “C” para la determinación de la temperatura de ensayo [25]

$T_{test} = T_{CVN} + C$	Constante “C”	
	T_{28J}	T_{41J}
CT (0.4T)	-32	-38
PCCv	-50	-56

Tabla 3.14 Valores disponibles para la estimación de la temperatura de ensayo

Material	Orientación	Fluencia ($10^{19} n \cdot cm^{-2}$)	T_{28J} (°C)	T_{41J} (°C)
Complementario	TL	0	-	CRP 3: -15.9 CRP 4: -23.8 Media ~ -20
		0	-29	-25
Interés	LT	0.057	-70	-54
		0.126	-38	-29
		0	-24	-11
	TL	0	-24	-11

Tabla 3.15 Estimaciones de la temperatura de ensayo

Material	Orientación	Configuración	Fluencia ($10^{19} \text{ n-cm}^{-2}$)	Cálculos	T_{est} (°C)
Complementario	TL	CT 0.4T	0	-20-38=-58	-58
Interés	LT	PCCv	0	-29-50=-79 -25-56=-81	-80
			0.057	-70-50=-120 -54-56=-110	-115
			0.126	-38-50=-88 -29-56=-85	-87
		CT 0.4T	0	-29-32=-61 -25-38=-63	-62
			0.057	-70-32=-102 -54-38=-92	-97
			0.126	-38-32=-70 -29-38=-67	-69
	TL	PCCv	0	-24-50=-74 -11-56=-67	-71

Durante el ensayo la temperatura fue controlada simultáneamente mediante dos dispositivos: por el termopar propio de la cámara ambiental de ensayo y por un termopar adosado en todo momento a la probeta. Se exigió una convergencia sostenida durante 20 minutos entre ambas lecturas, con un margen de error de ± 1 °C antes de comenzar el proceso de carga a fin de asegurar la correcta aclimatación térmica de la probeta, todo ello según lo establecido en [25].

El proceso de fractura consiste en ensayar cada probeta en condiciones de control de desplazamiento registrando la curva carga-desplazamiento. En este caso, la velocidad de la máquina de ensayo fue establecida en $0.03 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, en coherencia con lo establecido en el apartado 8.7.1 de [25]. El valor de tenacidad se expresa en términos del factor de intensidad de tensiones elasto-plástico derivado del valor de la integral J en el momento de la fractura. Sólo aquellos resultados susceptibles de recibir un tratamiento estadístico *Weakest Link* resultan aceptables y, para ello, ciertas condiciones deben verse satisfechas, de acuerdo con las reflexiones presentadas en el Capítulo 2. Así, debe tratarse de una rotura frágil por clivaje, sin propagación estable previa, procedente de un ensayo realizado a una temperatura adecuada, lo cual significa que no debe superarse aquella temperatura por encima de la cual K_{Jc} deja de representar unívocamente el proceso de fractura -puesto que se reducen las condiciones de confinamiento-, ni

descender hasta las proximidades de la región *Lower Shelf*, donde el proceso viene controlado por estadísticas diferentes (debido a que es la etapa de propagación y no la de iniciación la que domina la rotura).

El valor real de la longitud de la prefisura, descrito por [25] en su apartado 8.8.1, se obtiene una vez que la probeta ha sido ensayada y tras haber separado materialmente ambas mitades de la misma. El procedimiento se describe brevemente a continuación: debe medirse la longitud de fisura en 9 puntos equiespaciados, $\{a_{0,i}\}_{i=1..9}$, en el espesor de la probeta, estando los dos puntos extremos situados a una distancia de valor $0.01 \cdot B$ de las caras libres. En caso de haber mecanizado entallas laterales, práctica posterior a la prefisuración que se contempla en el apartado 7.7 de [25] para incrementar la rectitud del frente de fisura, el método de medida es similar pero realizando las medidas en el espesor neto. Debe promediarse el valor de las medidas extremas, $(a_{0,1} + a_{0,9})/2$, y, a su vez, combinar este valor con los siete restantes, para obtener la media de los ocho. De esta forma quedará (3.6):

$$a_0 = \frac{a_{0,1} + a_{0,9}}{16} + \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=2}^8 a_{0,i} \quad (3.6)$$

La formulación para la obtención de K_{Jc} , apartado 9 de [25], es la que se desprende de la Mecánica de Fractura a partir del valor de la integral J en el instante del clivaje, J_c , asumiendo condiciones de deformación plana para el módulo de elasticidad, (3.7). J_c , a su vez, comprende dos términos, uno elástico y otro de naturaleza plástica, (3.8).

$$K_{Jc} = \sqrt{J_c \frac{E}{1-\nu^2}} \quad (3.7)$$

$$J_c = J_e + J_p \quad (3.8)$$

Las expresiones correspondientes para cada uno de los sumandos son, respectivamente (3.9) y (3.10):

$$J_e = \frac{(1-\nu^2)}{E} \cdot K_e^2 \quad (3.9)$$

$$J_p = \frac{\eta \cdot A_p}{B_N \cdot b_0} \quad (3.10)$$

En las expresiones (3.7) y (3.9) ν y E representan, respectivamente, el módulo de Poisson y elástico del material a la temperatura de ensayo. Las fórmulas para la obtención de K_e , valor que se corresponde con la parte elástica del trabajo realizado sobre la probeta, en términos del factor de intensidad de tensiones, se resumen en la Tabla 3.16.

Tabla 3.16 Expresiones para la obtención de K_e según [25]

Probeta	Expresiones de la norma ASTM E 1921
CT	$K_e = \frac{P}{(B \cdot B_N \cdot b_0)^{1/2}} \cdot f\left(\frac{a_0}{W}\right)$
	$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a_0}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{3/2}} \left[0.886 + 4.64 \frac{a_0}{W} - 13.32 \left(\frac{a_0}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a_0}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a_0}{W}\right)^4 \right]$
PCCv	$K_e = \frac{P \cdot S}{(B \cdot B_N)^{1/2} \cdot W^{3/2}} \cdot f\left(\frac{a_0}{W}\right)$
	$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{3 \left(\frac{a_0}{W}\right)^{1/2} \left[1.99 - \frac{a_0}{W} \left(1 - \frac{a_0}{W}\right) \right] \left[2.15 - 3.93 \frac{a_0}{W} + 2.7 \left(\frac{a_0}{W}\right)^2 \right]}{2 \left(1 + 2 \frac{a_0}{W}\right) \left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{3/2}}$

En la fórmula (3.10) η es un parámetro adimensional que relaciona el trabajo plástico realizado con la resistencia al crecimiento de fisura, expresado en términos de la integral J (véase, por ejemplo la referencia [3]). Este parámetro η depende de la tipología de probeta ensayada, siendo $\eta = 1.9$ para probetas PCCv y $\eta = 2 + 0.522 \cdot b_0/W$ para probetas compactas. B_N es el espesor efectivo de la probeta, descontando ranuras laterales si las hubiera, b_0 el ligamento residual, $b_0 = W - a_0$, y A_p se corresponde con la porción de naturaleza plástica del área bajo la curva carga-desplazamiento, tal y como se muestra en la Figura 3.57 [25]. Teniendo en cuenta esto último, el valor registrado en abscisas en la gráfica de esta figura debe corresponderse con el desplazamiento de la línea de carga.

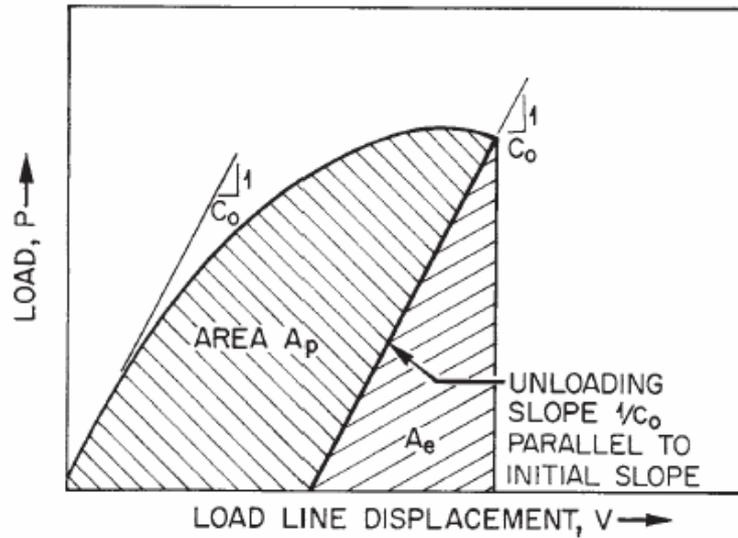


Figura 3.57 Obtención de A_p a partir de la curva de ensayo [25]

La lectura carga-desplazamiento registrada por la máquina servohidráulica de ensayo contempla no sólo los movimientos asociados con la probeta que está siendo ensayada sino también aquellos, de naturaleza presumiblemente elástica, correspondientes al utillaje interpuesto: el banco de asiento y el elemento indentador en el caso de probetas PCCv y los correspondientes vástagos y pasadores para las CT. Este hecho no resulta en realidad problemático puesto que en el cálculo de la tenacidad K_{Jc} sólo participa la porción bajo la curva carga-desplazamiento correspondiente al área plástica, magnitud ésta que no se ve afectada por los movimientos de los elementos interpuestos si estos resultan de carácter elástico.

Sin embargo, para garantizar la precisión de los resultados, se diseñó, para los ensayos sobre material de interés, tanto en el caso de probetas PCCv como de las CT, un utillaje adecuado que permitiera medir únicamente aquella fracción de los movimientos asociada con las deformaciones de la probeta ensayada, es decir, los movimientos de la probeta en la línea de carga (*Load Line Displacements*, LLD). De esta manera puede obtenerse una curva equivalente a la recogida en la Figura 3.57 a partir de la cual puede calcularse el trabajo mecánico realizado contra la probeta. Estos dispositivos fueron convenientemente calibrados garantizando la coincidencia entre las lecturas ofrecidas por la máquina y el extensómetro en vacío, sin probeta interpuesta puesto que en estas condiciones no cabe considerar ningún tipo de movimiento adicional del utillaje. La

Figura 3.58, probetas CT, y la Figura 3.59, probetas PCCv, ofrecen una perspectiva de tales diseños.



Figura 3.58 Utilaje diseñado para el ensayo de probetas CT



Figura 3.59 Utilaje diseñado para el ensayo de probetas PCCv

En el caso del material complementario se utilizó un extensómetro convencional situado en la boca de la entalla registrando el valor CMOD (*Crack Mouth Opening Displacement*). Los desplazamientos LLD se correlacionaron a partir de los anteriores por medio de un factor de proporcionalidad contemplado en la versión de la norma de ensayo [25] vigente en el momento de la ejecución de los trabajos, de valor 0.73 [106]. En la versión actual no se proporciona ningún factor de proporcionalidad sino que se sugiere la obtención de uno adecuado por los medios que se consideren oportunos.

La Figura 3.60 ofrece una perspectiva del dispositivo experimental utilizado por el SCK-CEN para la ejecución de sus ensayos, de una probeta PCCv en el caso de la figura. El material de ensayo y los utilajes permanecen en el interior de una celda

caliente durante el proceso y la manipulación de instrumentos se practica mediante brazos articulados robotizados. Aunque a primera vista pudiera parecer que estas circunstancias dificultan el ensayo, en realidad, la tarea de manipulación del material a bajas temperaturas se realiza más fácilmente gracias a los brazos articulados. Únicamente las etapas de introducción y extracción del material y utensilios en la celda suponen una incomodidad adicional.

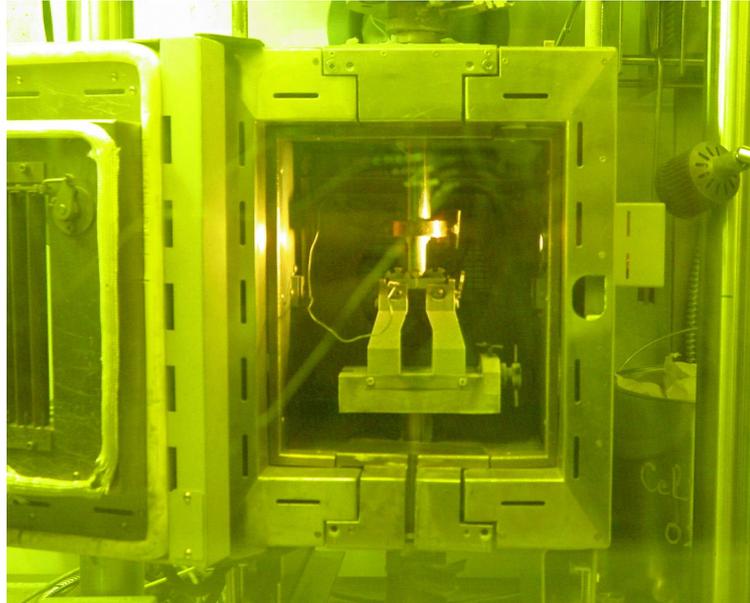


Figura 3.60 Ensayo de probeta PCCv de material irradiado en celda caliente

Existen ciertas condiciones, apartado 8.9 de [25], que obligan o bien a rechazar un valor obtenido de K_{Jc} o bien a reservarle un tratamiento particular en el cálculo de T_0 mediante el proceso de censura de datos. El ensayo K_{Jc} deberá rechazarse si cualquiera de las nueve medidas de longitud de fisura realizadas $\{a_{0,i}\}_{i=1..9}$ difiere respecto del valor promedio de a_0 , definido por la fórmula (3.6), en una cantidad superior a la mayor de las dos siguientes: $0.05 \cdot B$ o 0.5 mm . De igual manera, deberán rechazarse los valores procedentes de ensayos no concluyentes en rotura frágil por clivaje.

Por otra parte, aquellos ensayos que superen el valor de tenacidad expresado en (3.5) serán considerados como “inválidos”, lo que no impide su utilización posterior en el cálculo de T_0 , puesto que contienen información estadística que puede ser empleada previo proceso de censura. Del mismo modo, un ensayo interrumpido antes de

producirse la inestabilidad puede utilizarse de la misma manera. Aquellos ensayos que experimentan el clivaje tras una propagación estable superior a la menor de las dos cifras siguientes, $0.05 \cdot (W - a_{0,i(\max)})$ o 1 mm , también deberán ser censurados antes de su utilización, siendo sustituidos por el valor más elevado de K_{Jc} para el conjunto de datos estudiado de entre todos los tamaños de probeta analizados. Si ambas condiciones se vulneran en el mismo ensayo, capacidad de carga y propagación estable, deberá tomarse en la censura el valor más reducido de los dos posibles.

En la norma se proponen algunas soluciones ante poblaciones experimentales con gran número de resultados inválidos puesto que, como se expondrá en el apartado siguiente, se requiere de un número mínimo de ensayos válidos para la obtención de un valor de T_0 estadísticamente significativo. Una primera solución consiste en ensayar a temperaturas más reducidas a fin de fragilizar el material disminuyendo con ello el valor de tenacidad y dificultando la posibilidad de propagación estable. De igual manera, puede acudir, si ello resulta factible a probetas de mayores dimensiones geométricas, con efectos similares, o, como solución evidente, ensayar más probetas en las mismas condiciones hasta satisfacer el criterio de representatividad.

En el apartado 8.9.5 de [25] se recoge la estrategia a seguir en el caso de que se produzca un evento tipo pop-in, es decir, una discontinuidad en la curva carga-desplazamiento. Habitualmente, estos episodios van acompañados de un sonido audible de naturaleza metálica y representan pequeñas propagaciones inestables por clivaje. En tal caso, el cálculo de K_{Jc} deberá realizarse con el valor de carga correspondiente al pop-in. De lo contrario, el ensayo deberá rechazarse. La distinción entre ambas situaciones debe realizarse examinando la zona de propagación posterior al pop-in y comprobando la presencia de clivajes.

El diagrama de flujo que se presenta en la Figura 3.61 resume todas las consideraciones contenidas en este apartado para la obtención y cualificación de los valores de tenacidad K_{Jc} . Su tratamiento analítico para la obtención de la temperatura de referencia se reserva para el Apartado 3.4.4, que se ofrece seguidamente.

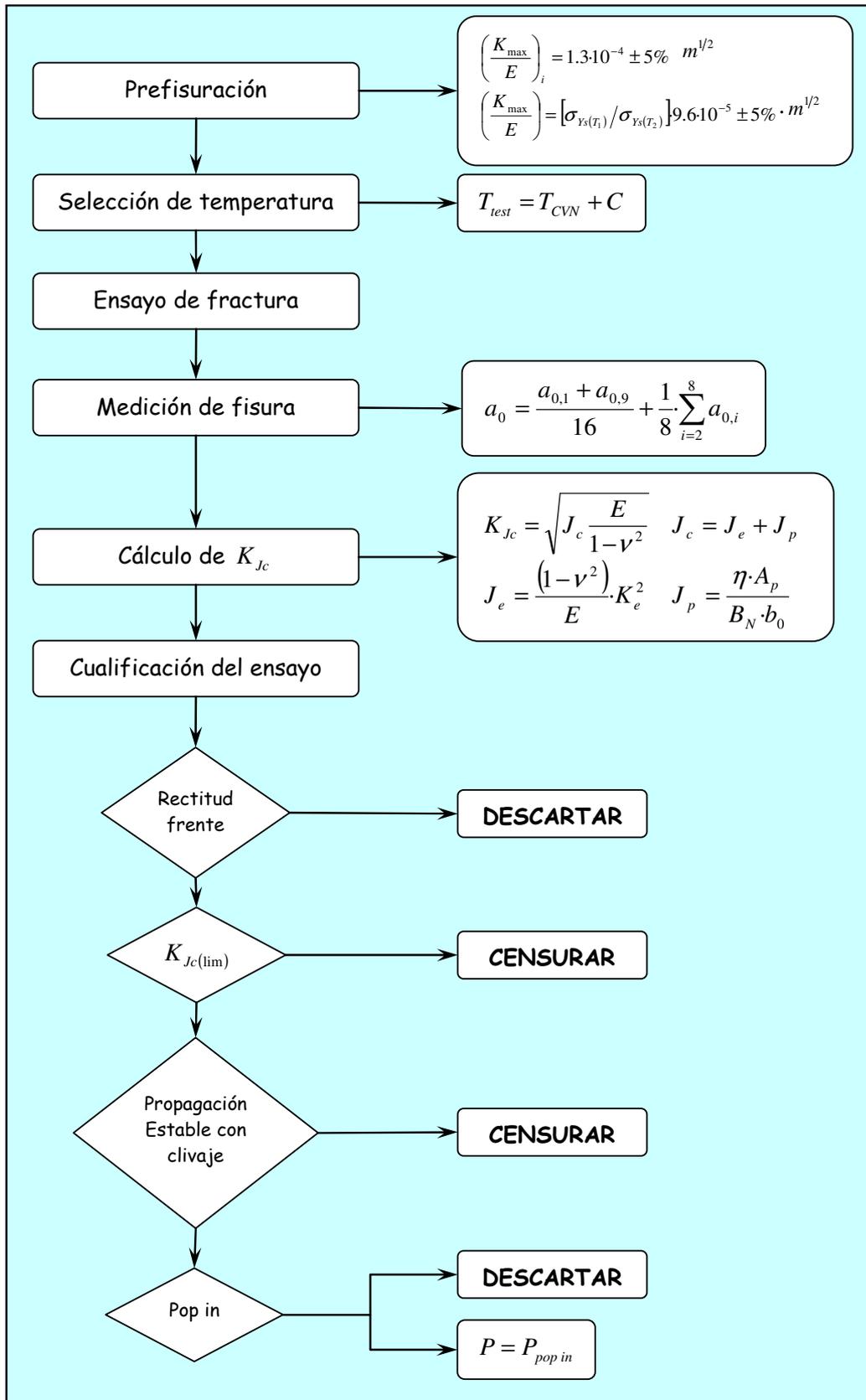


Figura 3.61 Diagrama de flujo para el cálculo de K_{Jc}

3.4.4 Procedimiento analítico para la obtención de T_0

Una vez que se dispone de los resultados de tenacidad de los ensayos terminados en clivaje, tras haber rechazado aquéllos que no cumplan la condición de rectitud del frente, censurado los que superen el límite de capacidad de carga o presenten cierta extensión de propagación estable previa al clivaje y evaluado adecuadamente los sucesos pop-in, sólo resta proceder al análisis de los datos para el cómputo de T_0 .

En las normas de ensayo posteriores a la edición del año 2002 se incluye la posibilidad de realizar ensayos a diferentes temperaturas (método multi-temperatura), lo cual facilita la ejecución del proceso experimental puesto que, a medida que se dispone de resultados de tenacidad, pueden ser obtenidos valores preliminares de T_0 de manera que en los ensayos posteriores la temperatura de ensayo se fije en sus proximidades. Sin embargo, el método de temperatura única, puede seguir siendo empleado puesto que se trata de un caso particular del procedimiento general.

En las secciones siguientes se describe el procedimiento analítico concreto en cada caso. Su justificación fue presentada en el Capítulo 2, por lo que se remite a su revisión al lector interesado.

- Procedimiento multi-temperatura (apartado 10.4 de [25])

La temperatura de referencia se define como aquélla para la cual la mediana de las tenacidades obtenida con probetas de espesor 1T vale $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$. Por lo tanto, se exige en primer lugar la conversión de todos los valores de tenacidad (válidos y censurados) a espesor unidad. La expresión necesaria para convertir valores de tenacidad obtenidos con probetas de espesor $B(\text{mm})$ es la (3.11), donde $K_{\min} = 20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

$$K_{Jc(1T)} = K_{\min} + (K_{Jc(B)} - K_{\min}) \left(\frac{B}{25.4} \right)^{1/4} \quad (3.11)$$

El resultado de T_0 se obtiene introduciendo estos valores convertidos (que se denominarán $K_{Jc,i}$) junto con las respectivas temperaturas de ensayo T_i en la expresión

(3.12). En ella, el factor δ_i adopta el valor $\delta_i = 1$ si la tenacidad correspondiente es válida y $\delta_i = 0$ si ha sido previamente censurada.

$$\sum_{i=1}^N \delta_i \frac{e^{0.019(T_i - T_0)}}{11 + 77 \cdot e^{0.019(T_i - T_0)}} - \sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc,i} - 20)^4 \cdot e^{0.019(T_i - T_0)}}{[11 + 77 \cdot e^{0.019(T_i - T_0)}]^5} = 0 \quad (3.12)$$

La resolución de esta ecuación no admite procedimientos analíticos sino que debe abordarse por métodos iterativos o gráficamente.

Tras la obtención de T_0 sólo resta comprobar que se trata de un resultado estadísticamente significativo. Para ello debe cumplirse la condición que se recoge en la fórmula (3.13) en la cual r_i representa el número de ensayos válidos (no censurados) realizados a cada temperatura T_i . El factor n_i , denominado “factor de peso” (*Weight Factor*), depende de la diferencia entre temperatura de ensayo y la de referencia, adoptando los valores que se recogen en la Tabla 3.17.

$$\sum r_i \cdot n_i \geq 1 \quad (3.13)$$

Tabla 3.17 Valores del factor de peso [25]

$T_i - T_0$ (°C)	n_i
(-14, 50)	1/6
(-35, -15)	1/7
(-50, -35)	1/8

Pudiera resultar que tras la obtención de T_0 , algunos de los valores de tenacidad utilizados para su cálculo hubieran sido obtenidos en ensayos realizados fuera de la ventana de validez, es decir, fuera del intervalo $T_i - T_0 = (-50, 50)^\circ C$. En ese caso, deberán rehacerse los cálculos excluyendo dichos valores y el proceso deberá repetirse hasta que se alcance un valor de T_0 tal que todos los valores utilizados en su obtención pertenezcan a la correspondiente ventana de validez.

Se ha documentado la existencia ocasional de ciertos conjuntos de datos multi-temperatura resultantes en una oscilación que itera entre dos (o más) valores de T_0 . La

norma [25] recomienda en ese caso que se adopte como temperatura de referencia el promedio de dichos valores.

- Procedimiento de temperatura única (apartado 10.2 de [25])

Lo mismo que en el caso anterior, el proceso comienza con la conversión de los datos de tenacidad a espesor 1T, utilizando para ello la expresión (3.11). Seguidamente se calcula el parámetro de escala, K_0 , que representa el nivel de sollicitación para el cual la probabilidad acumulada de fallo por clivaje asciende al 63% para la temperatura de ensayo, T . El cálculo se realiza de acuerdo con la expresión (3.14) donde, nuevamente, N representa el número total de ensayos válidos y r aquéllos no censurados.

$$K_0 = \left[\sum_{i=1}^N \frac{(K_{Jc,i} - K_{\min})^4}{r} \right]^{1/4} + K_{\min} \quad (3.14)$$

La mediana de tenacidades para la temperatura de ensayo, T , se obtiene de acuerdo con la fórmula (3.15) y, a partir de este valor, la temperatura de referencia T_0 por medio de la (3.16).

$$K_{Jc,med} = K_{\min} + (K_0 - K_{\min}) \cdot [\ln(2)]^{1/4} \quad (3.15)$$

$$T_0 = T - \frac{1}{0.019} \cdot \ln \left(\frac{K_{Jc,med} - 30}{70} \right) \quad (3.16)$$

3.4.5 Ensayos Charpy instrumentado sobre probetas prefisuradas

La línea de trabajo principal de esta tesis se centra en la caracterización del acero de vasija de una planta española desde la perspectiva de la tenacidad a fractura por medio de ensayos cuasi-estáticos. De forma complementaria se ha seleccionado parte del material para proceder a su caracterización en régimen dinámico. Así, en la Tabla 3.7 se contempla la presencia de 15 probetas de material de interés no irradiado, orientación LT, bajo el epígrafe ‘PCCv Instrumentado’. Con esta denominación se alude a ensayos instrumentados de impacto sobre probetas Charpy previamente prefisuradas por fatiga, del mismo modo que en el caso de los ensayos estáticos. Los resultados desprendidos

ofrecen información adicional no contenida en las clásicas curvas de impacto con probetas entalladas.

El equipo en el que se han realizado los ensayos está constituido por un péndulo Charpy AMSLER, modelo RKP-300, equipado con un sistema de adquisición de datos. Éste consta de una placa que atraviesa un detector interrumpiendo un haz de luz. El sistema transmite la lectura mediante una tarjeta de alta velocidad modelo GRC-830-I que vuelca la información en el software de análisis. El dispositivo es capaz de registrar más de 2000 puntos en un tiempo típico de duración del ensayo. Como resultados más significativos destacan la carga aplicada sobre la probeta, el desplazamiento del cabezal o la energía de rotura. La Figura 3.62 ofrece algunas imágenes del dispositivo experimental.

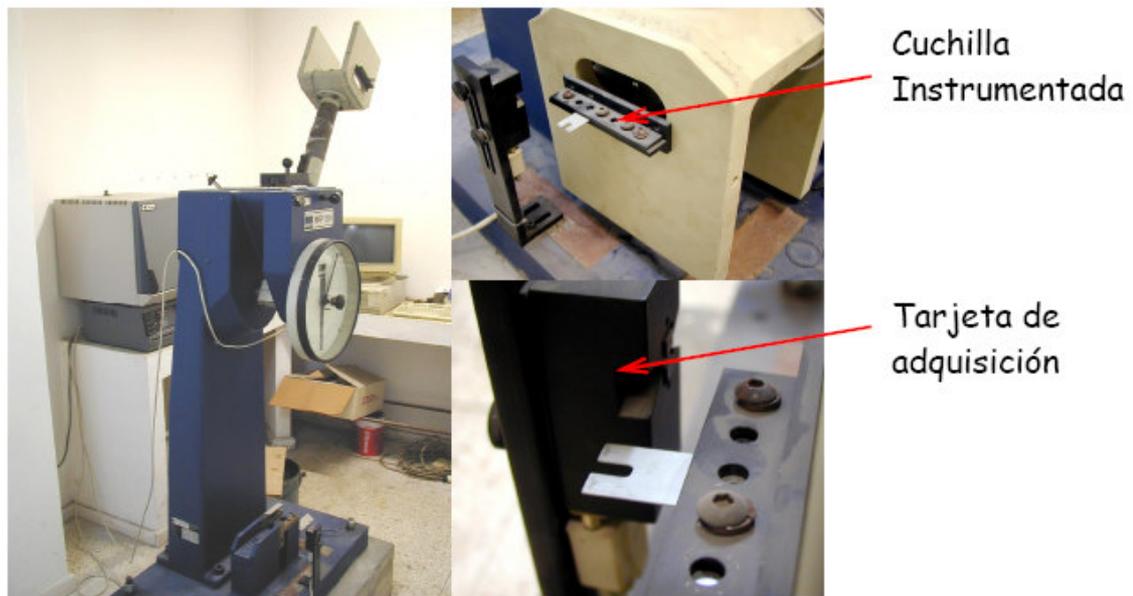


Figura 3.62 Imágenes representativas del péndulo Charpy instrumentado

