

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 4 Presentación y análisis de resultados experimentales

4.1 Introducción

Este capítulo recoge con detalle la parte de experimentación realizada tanto sobre el material complementario (acero JRQ) como sobre el de interés (material base de una vasija española), relativo a su caracterización en la zona de transición dúctil-frágil. Los objetivos del mismo son los que se resumen seguidamente:

- Con respecto al acero JRQ, la finalidad es la de validar el conjunto de técnicas experimentales y analíticas conducentes a la obtención de la temperatura de referencia, T_0 , comparando los resultados propios con los procedentes de la revisión bibliográfica, presentada en el Apartado 3.2.3.
- Con respecto al acero de material base procedente de una vasija española, se desea obtener una completa caracterización de este material en la ZTDF, haciendo uso, por lo tanto, de T_0 . El alcance experimental consignado en la Tabla 3.6 debe permitir un estudio de la posible influencia sobre T_0 de aspectos tales como el proceso de reconstrucción, la configuración experimental, la orientación del material, la fluencia neutrónica recibida o la velocidad de ensayo. El número total de ensayos de tenacidad se eleva hasta 110 a los que hay que añadir una quincena de ensayos de impacto Charpy instrumentado y, complementariamente, una docena de ensayos de tracción. Se trata, en definitiva de un completo contenido experimental, coherente con los fines aquí perseguidos.

Como se ha mencionado, los resultados de tenacidad obtenidos deben permitir un análisis de la calidad de los procesos de reconstrucción empleados así como de los parámetros seleccionados para los mismos. En este sentido, se dedicará un énfasis particular en complementar el Apartado 3.4.2.2 de esta tesis, dedicado en parte a la validación de la reconstrucción de probetas PCCv por soldadura ASW con implante de 10 mm. Ello es debido a que la apariencia externa de estas probetas, reconstruidas con los parámetros optimizados que se presentaron en el capítulo anterior, presenta una serie de defectos que invitan a la desconfianza, o al menos a la duda, sobre su representatividad. La comparación entre los valores de T_0 obtenidos con ellas y los procedentes de probetas normalizadas, (todos éstos, resultados que se recogen en este Capítulo 4), constituye, como es obvio, el criterio más exigente de validación.

4.2 *Experimentación en el material complementario*

El alcance experimental sobre el material complementario incluye 12 probetas 0.4T CT reconstruidas por soldadura EBW (ver Apartado 3.4.1.1). El proceso de prefisuración fue realizado de acuerdo con lo prescrito en el Apartado 3.4.3. La temperatura de ensayo de todas ellas fue establecida en -56°C , valor coherente con las estimaciones de carácter orientativo recogidas en la Tabla 3.15.

El proceso experimental se divide en dos partes, la etapa de prefisuración y el ensayo de fractura propiamente dicho, ambos descritos en el Apartado 3.4.3 de este documento. La norma de ensayo [25] contempla la posibilidad de practicar ranuras laterales sobre las probetas tras la prefisuración. De esta forma se puede corregir la curvatura que, en ocasiones, presenta el frente de fisura; de hecho, habitualmente el crecimiento de la fisura en las proximidades de las superficies exteriores presenta cierto retraso respecto de la región central, debido a las condiciones locales de triaxialidad.

Por esta razón, en el ánimo de observar diferencias, se decidió repartir el alcance experimental en dos familias, cada una con seis probetas: la primera de ellas sin ranuras laterales y la segunda incluyendo ranuras. La Tabla 4.1 recoge la denominación de las probetas pertenecientes a cada grupo. Adicionalmente, la presencia de ranuras colabora a incrementar el nivel de confinamiento en el frente de fisura durante el ensayo de fractura.

Tabla 4.1 Probetas de material complementario y familia correspondiente

Familia sin ranuras laterales	UCQ 112	UCQ 131	UCQ 151	UCQ 162	UCQ 172	UCQ 183
Familia con ranuras laterales	UCQ 113	UCQ 153	UCQ 123	UCQ 132	UCQ 1103	UCQ 1112

Los resultados de la longitud de fisura para cada una de las doce probetas, medidas tras la realización de los ensayos, se resumen en la Tabla 4.2. El primer aspecto relevante es que todas las fisuras han superado los 12.20 mm que se consideraron como preceptivos de cara a la obtención de un resultado representativo, véase el Apartado 3.4.2.1. En términos relativos a la anchura de la probeta se cumple que $a_0/W \in (0.611-0.631)$, que, como ya se justificó, excede del rango permitido en [25].

Cabe mencionar que, además, todas las probetas, incluidas aquéllas sin ranuras laterales, satisfacen los criterios de rectitud exigidos en la versión vigente de [25] en el momento en que el trabajo fue realizado. Allí se exigía que la máxima diferencia entre cualquiera de las 9 medidas realizadas sobre el frente y el promedio de éstas, $|a_{0,i} - a_0|_{\max}$, no superara simultáneamente los valores de 0.5 mm y de $0.07 \cdot a_0$. Esa condición se satisface, como puede comprobarse por medio de los valores que se presentan en la Tabla 4.2. En las versiones recientes de la norma esta demanda de rectitud se ha intensificado de forma que no se pueda superar simultáneamente 0.5 mm y el 5% de a_0 . Este mayor nivel de exigencia supone que, en la actualidad, el resultado correspondiente a la probeta UCQ 183 debiera quedar descartado. No se aplicará, sin embargo, en este apartado este requerimiento sino que se considerará en todo momento la normativa vigente en el momento en el que el análisis fue practicado. Las diferencias en términos de T_0 al escoger una u otra posibilidad resultan mínimas.

El cálculo de la media de las dispersiones del frente (última columna de la Tabla 4.2) para ambas familias da como resultado 0.56 y 0.46 mm, respectivamente, lo que puede interpretarse como una tímida capacidad de corrección de curvatura por parte de las ranuras laterales. De ser así, el efecto es muy reducido. Visto desde esta perspectiva, pudiera dar la impresión que, al satisfacerse la exigencia de rectitud en la familia de probetas sin ranuras, la ranuración practicada en la segunda familia resulta innecesaria. Sin embargo, esta decisión vino motivada tras examinar las superficies de fractura de

las probetas no ranuradas. El estudio reveló, en todos los casos, una morfología común del frente de fisura, que es la que se ofrece en la Figura 4.1. En todos los ejemplares se aprecia una influencia del cordón de soldadura y de la zona afectada térmicamente sobre la cuantía del avance del frente de fisura por fatiga. El hecho de practicar la unión por medio de un único paso implica, (véase la Figura 3.37) que el grosor del cordón varíe apreciablemente en el espesor de la probeta afectando presumiblemente al crecimiento de la prefisura. Este hecho puede apreciarse asimismo en la Figura 4.1.

Tabla 4.2 Resultados de longitud de fisura en las probetas de material complementario

	Probeta	a_0 (mm)	$0.07 \cdot a_0$ (mm)	$ a_{0,i} - a_0 _{\max}$ (mm)
Sin ranuras	UCQ 112	12.42	0.869	0.386
	UCQ 131	12.44	0.871	0.492
	UCQ 151	12.60	0.882	0.492
	UCQ 162	12.39	0.867	0.488
	UCQ 172	12.26	0.858	0.611
	UCQ 183	12.62	0.883	0.864
Con ranuras	UCQ 113	12.22	0.855	0.378
	UCQ 153	12.32	0.862	0.315
	UCQ 123	12.49	0.874	0.619
	UCQ 132	12.48	0.874	0.438
	UCQ 1103	12.30	0.861	0.608
	UCQ1112	12.40	0.868	0.390

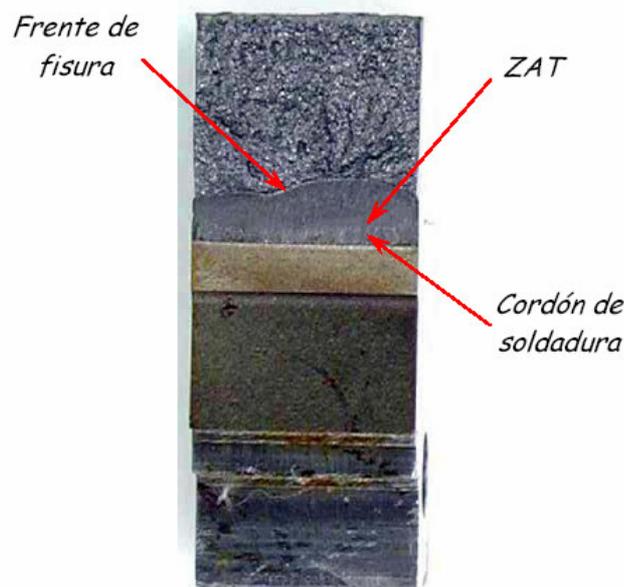


Figura 4.1 Perfil típico apreciado en las probetas sin ranuración lateral

Por esta razón, a pesar de que la primera familia satisfizo el criterio de rectitud del frente contenido en [25], se consideró que la ranuración lateral podría mitigar el posible efecto inducido por la irregularidad del frente en los valores de T_0 . Se trataría, en definitiva, de una consecuencia indeseada asociada con el proceso de reconstrucción.

Una vez prefisuradas, todas las probetas fueron ensayadas a la temperatura mencionada de -56°C , cumpliendo todas las exigencias de la normativa [25] para garantizar la completa aclimatación térmica de cada probeta. Todos los ensayos manifestaron una rotura frágil; ésta se detecta en el propio laboratorio por el sonido metálico emitido por la probeta ante la fractura, así como por la apariencia de la curva de ensayo, carga frente a desplazamiento, en la que puede apreciarse una alteración súbita asociada con la rotura. La Figura 4.2, correspondiente a la probeta UCQ 1112, permite apreciar este extremo. En el momento de la fractura se produce una descarga completa acompañada de una apertura importante del extensómetro que se traduce en el tramo recto que puede observarse a partir del máximo de la curva. Se recuerda (Apartado 3.4.3) que para el material complementario se utilizó un extensómetro situado en la boca de la fisura y que, por ello, el valor de los desplazamientos que se representa en la figura es el CMOD. Evidentemente, antes de ejecutar los cálculos, estos valores fueron convertidos a valores de LLD por medio del factor 0.73, recomendado en [25].

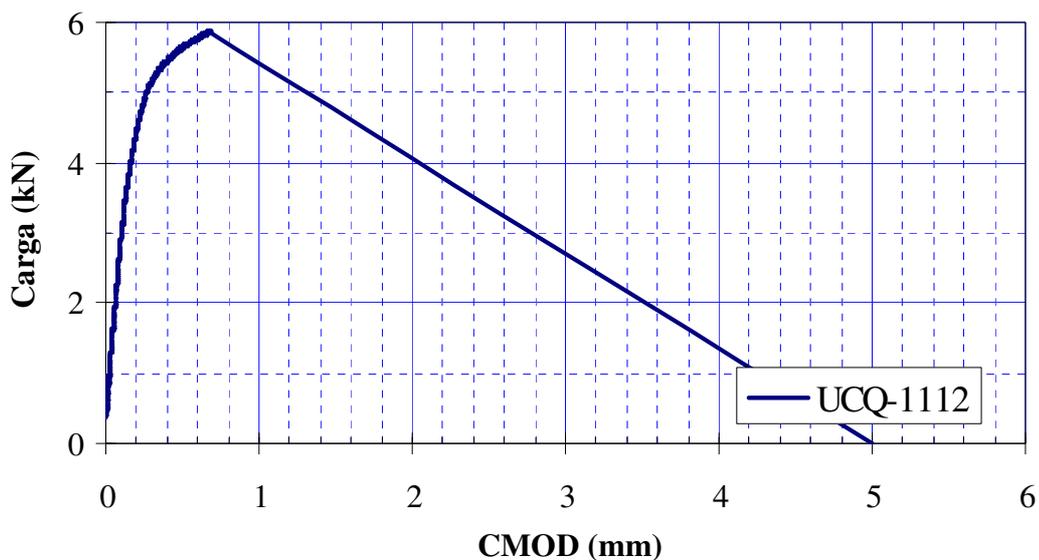


Figura 4.2 Curva experimental de la probeta UCQ 1112

La constatación definitiva de rotura frágil es la que se obtiene tras realizar un estudio fractográfico de la superficie de rotura el cual revela los micromecanismos de fallo que se han dado permitiendo comprobar si son de tipo frágil. Además, de esta manera puede detectarse cualquier tipo de propagación estable previa a rotura que pudiera haberse producido; en tal caso, de acuerdo con [25], como se recogió en el Apartado 3.4.3, el ensayo debiera ser censurado en el análisis posterior.

El estudio fractográfico ha revelado exclusivamente la presencia de procesos de clivaje en todas las superficies de fractura así como la inexistencia de clase alguna de propagación estable. La Figura 4.3 presenta una de las fractografías realizadas en la que se aprecian nítidamente las facetas propias del avance de la fisura bajo mecanismos de cuasi-clivaje.

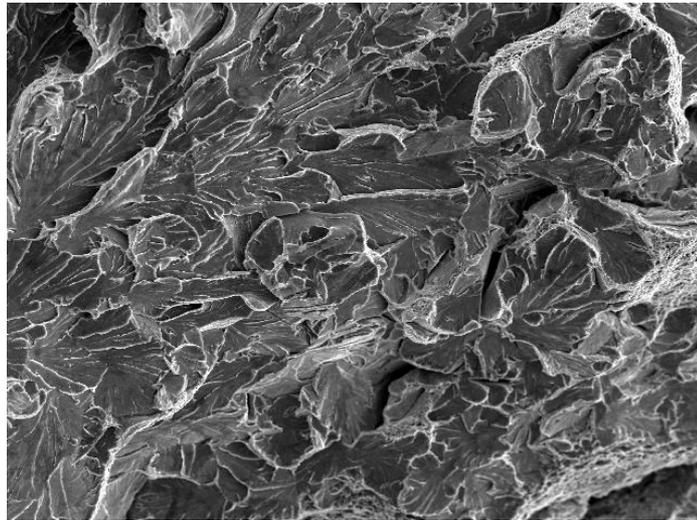


Figura 4.3 Fractografía de probeta UCQ 1112

4.2.1 Resultados de tenacidad

Utilizando las expresiones del Apartado 3.4.3, una vez conocidos la curva de ensayo, la longitud de fisura inicial y el módulo de elasticidad del material, la obtención de la tenacidad K_{Jc} resulta trivial. En este caso se ha tomado un valor genérico del módulo elástico, $E = 210000 \text{ MPa}$, simplificación ésta admitida en [25]. En el cálculo de $K_{Jc, \text{lim}(10\text{mm})}$ se precisa, además, el valor del límite elástico del material a la temperatura de ensayo, [25]; para ello se ha utilizado la fórmula (3.2), la cual, para $T = -56 \text{ }^\circ\text{C}$, arroja un resultado de $\sigma_Y = 547 \text{ MPa}$.

La expresión empleada para $K_{Jc,lim}$ difiere ligeramente de la presentada en (3.5), la cual se corresponde con la normativa vigente. La fórmula aquí utilizada, (4.1), se diferencia de la actual en la ausencia del término $(1-\nu^2)$ en el denominador de (3.5); se trata, por lo tanto, de un criterio más exigente. Esta expresión (4.1) figuraba en la versión de la norma de ensayo del año 2001, vigente en el momento en el que fueron ejecutados los ensayos. Como se mencionó en el Apartado 2.4.4.4, la definición de una expresión idónea para $K_{Jc(lim)}$ sigue en estado de discusión en los foros especializados [41].

$$K_{Jc(lim)} = \sqrt{\frac{Eb_0\sigma_{ys}}{30}} \quad (4.1)$$

Todos los valores obtenidos se reproducen en la Tabla 4.3. En ella se ofrece para cada probeta la siguiente información:

- Denominación de la probeta de acuerdo con los criterios que fueron establecidos en el Capítulo 3.
- Temperatura de ensayo en ($^{\circ}C$).
- Valor promediado final de la prefisura de fatiga a partir de 9 medidas de acuerdo con el procedimiento descrito en [25].
- Medida de la propagación estable previa a la fractura frágil. Como puede apreciarse, en ningún caso se ha producido propagación estable por lo que, desde esta perspectiva, todos los ensayos resultaron válidos.
- Valor de K_{Jc} sobre un espesor de 10 mm, correspondiente con el de las probetas aquí ensayadas, 0.4T en terminología ASTM.
- Valor límite de la tenacidad para el espesor de la probeta, $K_{Jc(lim)}$, de acuerdo con la fórmula (4.1).
- Valor de la tenacidad referida al espesor normalizado 1T, $K_{Jc(1T)}$. Estos valores son los que serán utilizados en el cálculo de la temperatura de referencia T_0 que se

define como aquella para la cual la mediana de tenacidades obtenidas con probetas 1T toma el valor de $100 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

- o La última columna de la tabla de resultados, bajo el epígrafe ¿Válido?, hace referencia a aquellos ensayos que han superado el valor de $K_{Jc(\text{lim})}$ y que, consecuentemente, en coherencia con [25], deberán ser censurados. Como se aprecia, sólo la probeta UCQ 153 ha ofrecido un valor censurable.

Tabla 4.3 Resultados de tenacidad sobre probetas de material complementario

Probeta UCQ	$T(^{\circ}\text{C})$	a_0 (mm)	Δa (mm)	$K_{Jc(10\text{mm})}$ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	$K_{Jc,\text{lim}(10\text{mm})}$ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	$K_{Jc,1T,\text{calc}}$ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	¿Válido?
112	-56	12.42	0	161.19	170.25	131,84	Sí
131	-56	12.44	0	136.44	170.03	112,23	Sí
151	-56	12.60	0	92.81	168.22	77,67	Sí
162	-56	12.39	0	63.82	170.59	54,71	Sí
172	-56	12.26	0	112.56	172.04	93,32	Sí
183	-56	12.62	0	109.16	167.99	90,63	Sí
113	-56	12.22	0	133.27	172.49	109,72	Sí
153	-56	12.32	0	175.85	171.37	139,91	No
123	-56	12.49	0	147.82	169.47	121,25	Sí
132	-56	12.48	0	130.17	169.58	107,27	Sí
1103	-56	12.30	0	80.90	171.60	68,24	Sí
1112	-56	12.40	0	156.86	170.48	128,41	Sí

La estrategia de análisis (que se presentará en el Apartado 4.2.2, a desarrollar a partir de la información contenida en la Tabla 4.3, pasa por obtener valores de temperatura de referencia para diversas combinaciones de resultados experimentales. El resultado oficial de T_0 debe calcularse con la totalidad de resultados contemplando la censura del valor correspondiente a la probeta UCQ 153. Otros resultados interesantes son los valores de T_0 obtenidos para cada una de las dos familias consideradas, sin ranuras y con ranuras laterales, respectivamente, así como el valor obtenido a partir de los once ensayos no censurados.

4.2.2 Resultados de Temperatura de Referencia, T_0

La Tabla 4.4 resume las combinaciones de probetas analizadas en este trabajo para el acero complementario JRQ. En la última fila se recogen los valores de T_0 calculados y, en la última columna de la misma, el valor de temperatura de referencia considerado como oficial, para cuyo cálculo se han incluido todas las probetas disponibles, censurando los valores pertinentes (probeta UCQ 153). En ese sentido, coherentemente con el resultado que se presenta en la Tabla 4.4, en lo sucesivo se admitirá que el acero JRQ aquí estudiado queda caracterizado en la región de transición dúctil-frágil por un valor $T_0 = -61^\circ C$. Se ha seguido la recomendación presente en [25] según la cual los valores de T_0 deben redondearse hasta el entero más próximo.

Tabla 4.4 Diversas combinaciones analizadas para el acero JRQ

	Familias estudiadas			
	Sin ranuras	Con ranuras ¹	Valores no censurados	Todos los ensayos
$K_{Jc,1T}$ ($MPa \cdot m^{1/2}$)	54.71	68.24	54.71	54.71
	77.67	107.27	68.24	68.24
	90.63	109.72	77.67	77.67
	93.32	121.25	90.63	90.63
	112.23	128.41	93.32	93.32
	131.84	139.91 ²	107.27	107.27
			109.72	109.72
			112.23	112.23
			121.25	121.25
			128.41	128.41
		131.84	131.84	
		139.91 ²	139.91 ²	
$K_{Jc(med)} _{T_{test}}$	97.42	116.13	101.08	106.74
T_0 ($^\circ C$)	-54	-67	-57	-61

¹Valor de T_0 no representativo estadísticamente según [25]

²Valor censurado

Los otros resultados de Temperatura de Referencia contenidos en la Tabla 4.4 proporcionan una idea de las dispersiones experimentales esperables en un proceso de cálculo del tipo aquí practicado. La comparación entre los valores de dispersión teórica y los valores experimentales (que se presenta más adelante dentro de este mismo

apartado) permitirá evaluar la idoneidad de los resultados que aquí se presentan. Se incluye también en la Tabla 4.4 el valor de la mediana de tenacidades para la temperatura de ensayo, $K_{Jc(med)}|_{T_{test}}$, el cual resulta necesario para la obtención de las dispersiones teóricas. Debe tenerse en cuenta, como se señala en la propia Tabla 4.4, que el resultado correspondiente a la familia de seis probetas ranuradas no se considera estadísticamente representativo de acuerdo con [25], puesto que no cumple el requisito de haber sido obtenido a partir de una población que incluyera, al menos, seis ensayos no censurados. No obstante, se ha incluido aquí sólo a efectos de permitir la comparación entre probetas con y sin ranuras.

La Figura 4.4 representa gráficamente los valores experimentales obtenidos de tenacidad (expresados en referencia al espesor normalizado 1T) junto con las curvas correspondientes a la mediana de tenacidades y las bandas de confianza del 1, 5, 95 y 99%. El único valor censurado se ha representado con diferente color y forma. Se ha incluido, además, la línea correspondiente a $K_{Jc,lim,1T}$ (convirtiendo los valores de la fórmula (4.1) por medio de la expresión (3.11)), que depende ligeramente de la temperatura a través del límite elástico. Puesto que también existe una dependencia muy reducida con el valor de b_0 (el cual se supone prácticamente constante), se ha tomado la curva más exigente en este sentido, correspondiente al menor valor de longitud de fisura disponible, $a_0 = 12.22 \text{ mm}$, en este caso. La primera impresión que proporciona la Figura 4.4 es la de un correcto ajuste entre los valores experimentales y las predicciones teóricas, por quedar aquéllos incluidos entre las diferentes bandas de confianza consideradas.

En el Apartado 2.4.5.4 se desarrolló con detalle una justificación de la expresión contenida en [25] que permite obtener la incertidumbre asociada con T_0 , expresión (2.88), según la cual $\sigma_{T_0} = \beta/\sqrt{r}$, siendo ‘ r ’ el número de ensayos no censurados y ‘ β ’ una constante que viene tabulada (véase Tabla 2.1) en función de la mediana de tenacidades a la temperatura de ensayo, $K_{Jc(med)}|_{T_{test}}$. Como se ve en la Tabla 4.4, en todas las combinaciones de resultados contempladas, $K_{Jc(med)}|_{T_{test}} > 83 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, lo cual

implica $\beta = 18.1$. En consecuencia, las desviaciones correspondientes a cada una de las familias analizadas son las que se presentan en la Tabla 4.5.

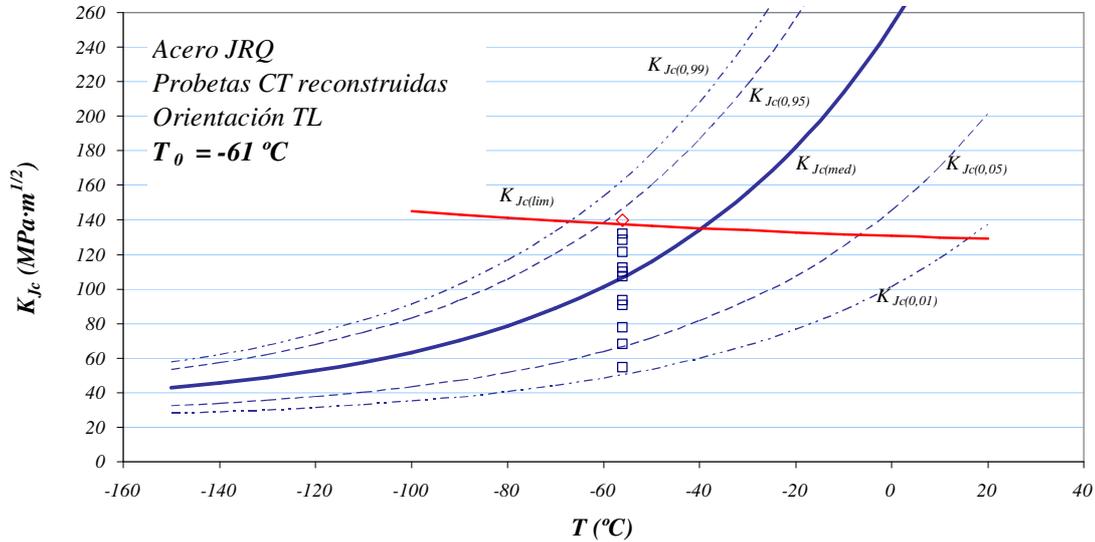


Figura 4.4 Curva Patrón del acero JRQ

Los valores aquí calculados concuerdan razonablemente con las diferencias de T_0 para las distintas combinaciones analizadas recogidas en la Tabla 4.4. La diferencia de $13\text{ }^\circ\text{C}$ en T_0 entre probetas con y sin ranuras laterales puede justificarse atendiendo a los valores de σ_{T_0} recogidos en la Tabla 4.5: $7.4\text{ }^\circ\text{C} + 8.1\text{ }^\circ\text{C} = 15.5\text{ }^\circ\text{C}$, superior a $13\text{ }^\circ\text{C}$.

Tabla 4.5 Desviaciones típicas para las diferentes familias analizadas

	Familias estudiadas			
	Sin ranuras	Con ranuras	Valores no censurados	Todos los ensayos
β ($^\circ\text{C}$)	18.1	18.1	18.1	18.1
r	6	5	11	11
σ_{T_0} ($^\circ\text{C}$)	7.4	8.1	5.5	5.5

4.2.3 Validación de los resultados

En el Apartado 3.2.3 fue presentado un compendio de los datos experimentales disponibles acerca del acero JRQ. La información procedente de la IAEA [93] indicaba un valor de $T_0 = -71\text{ }^\circ\text{C}$, con una desviación estándar experimental de $\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$ el cual fue obtenido casi exclusivamente a partir de probetas PCCv. La Figura 4.5 resume toda

la información de la IAEA representando para cada dato experimental, la temperatura de referencia en función de la de ensayo. Se ha distinguido entre probetas PCCv, las más abundantes, y probetas CT, resaltando en particular el resultado presente en este trabajo.

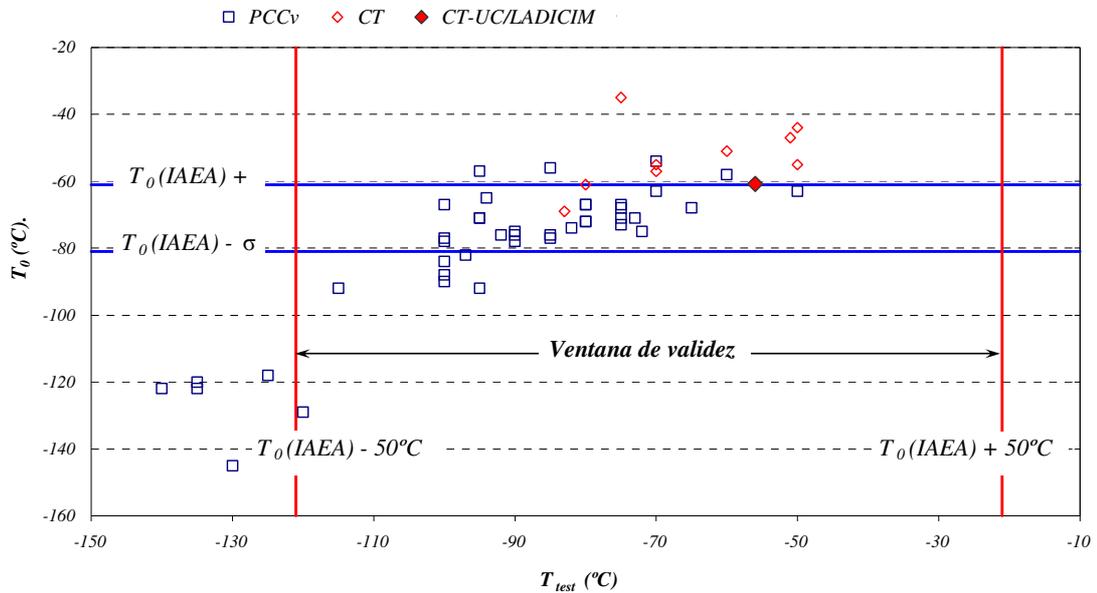


Figura 4.5 Comparación de resultados de T_0 para el acero JRQ

Se pueden apreciar varias características de relevancia. En primer lugar, la población de resultados presenta una elevada dispersión, no obstante, los valores más extremos quedan descartados si se incluyen las bandas correspondientes a la ventana de validez, $T_0 \pm 50^\circ C$, cuya necesidad quedó justificada en el Capítulo 2 de esta tesis: debe asumirse que los ensayos practicados a temperaturas muy bajas pertenezcan a la zona frágil y, consecuentemente, no sirvan para una descripción de la región de transición.

Por otra parte, se manifiesta una nítida separación entre valores obtenidos con probetas PCCv y probetas CT. Los primeros quedan mayoritariamente comprendidos en el intervalo $T_0 \pm \sigma$, contrariamente a lo que sucede con las CT. Este hecho ha sido ampliamente documentado: en el Capítulo 2 se justificó su existencia basándose en las diferentes condiciones de confinamiento que se manifiestan en cada configuración experimental. De esta forma, se verifica sistemáticamente la relación $T_{0,CT} \approx T_{0,PCCv} + 10^\circ C$ que, para el caso aquí tratado ofrece el resultado

$T_{0,CT} \approx -71 + 10 = -61^\circ C$, coincidente con el calculado en el contexto de esta tesis, Tabla 4.4.

Una de las grandes aportaciones de este tipo de proyectos colectivos como los promocionados por el IAEA sobre el acero JRQ, consiste en poner de relevancia la importancia que una correcta ejecución del ensayo de fractura puede suponer sobre el valor final de temperatura de referencia. En este sentido, la versión 2005 de [25] incluye cláusulas referentes a la velocidad de ensayo, no contenidas en ediciones anteriores, sugeridas a partir de algunos de los valores presentes en la Figura 4.5. Así por ejemplo, algunos puntos se corresponden con valores muy elevados de T_0 , es decir, con comportamientos muy frágiles. En el presente existe bibliografía que demuestra que el resultado de T_0 depende fuertemente de la velocidad de sollicitación en el ensayo de tenacidad; las versiones antiguas de la norma [25] no incidían en este hecho.

4.2.4 *Conclusiones sobre los resultados en material complementario*

Puede concluirse, finalmente, que el resultado obtenido en este trabajo concuerda plenamente con la información disponible acerca del material JRQ y que, por lo tanto, las técnicas empleadas en la reconstrucción, manipulación experimental y análisis posterior, han quedado validadas. Este hecho permite, consecuentemente, abordar con confianza el conjunto de actuaciones sobre el material de interés, verdadero objetivo de esta tesis.

4.3 *Experimentación en el material de interés*

Partiendo de la experiencia adquirida con el material complementario y una vez que las técnicas experimentales y analíticas han quedado validadas, se ha diseñado un alcance experimental para el material de interés, resumido en la Tabla 3.7, destinado a proporcionar una completa caracterización en fractura en la zona de transición en diferentes condiciones de irradiación, orientaciones del material y configuraciones experimentales. El número total de ensayos de fractura supera la centena.

Además, se han incorporado una serie de ensayos de tracción, tanto en estado irradiado como virgen, Tabla 3.7, con varios propósitos. Por un lado, evaluar el posible efecto de

la irradiación por medio de este ensayo: es sabido que los procesos de fragilización conllevan incrementos en el límite elástico y tensión de rotura así como disminuciones en los valores representativos de la ductilidad del material, como la deformación bajo carga máxima o la reducción de área. Por otro, el procedimiento analítico de caracterización en fractura exige del conocimiento del valor del límite elástico a la temperatura de ensayo. De hecho, la expresión para $K_{Jc,lim}$ incluye explícitamente este factor. Por lo tanto, como primer epígrafe se presentan la descripción y los resultados procedentes de los ensayos de tracción.

Los siguientes epígrafes se dedican a la presentación de resultados de fractura por el procedimiento de la Curva Patrón. Debe mencionarse que, para el material de interés se han utilizado las expresiones analíticas contenidas en la última versión de la norma de ensayo [25], correspondiente al año 2005. Como ya se ha comentado, la principal diferencia en este aspecto afecta a la expresión para el cálculo de $K_{Jc,lim}$, menos conservadora que en versiones anteriores. Por otra parte, se ha empleado la expresión (4.2) para expresar la dependencia del módulo de elasticidad con la temperatura, a propuesta del laboratorio SCK-CEN, de acuerdo con su experiencia acumulada.

$$E(MPa) = 207 - 0.06 \cdot T(^{\circ}C) \quad (4.2)$$

4.3.1 *Resultados de los ensayos de tracción*

En la Tabla 3.7 se recoge que han sido realizados doce ensayos de tracción miniatura, 8 sobre material no irradiado y 4 en estado irradiado a una fluencia de $0.0355 \cdot 10^{19} \text{ n/cm}^2$, que se corresponde con la dosis de la cápsula experimental analizada en esta tesis.

Debido a la escasez de material disponible, fue preciso mecanizar las probetas de tracción a partir de probetas Charpy. La Figura 4.6 ofrece un esquema del proceso. El laboratorio SCK-CEN fue capaz de obtener 4 probetas de tracción miniatura de cada media probeta Charpy. Se trata de probetas de 2.4 mm de diámetro, 24 mm de longitud total y rosca de métrica M4, para cuyo ensayo se emplea un extensómetro de 12 mm de base de medida. Los ensayos se realizaron en control de desplazamiento, a una velocidad de 0.2 mm/min, utilizando una máquina servo-hidráulica en los ensayos a

temperatura elevada y servo-mecánica a temperaturas reducidas. Se han seguido las indicaciones de la correspondiente norma de ensayo ASTM [99].

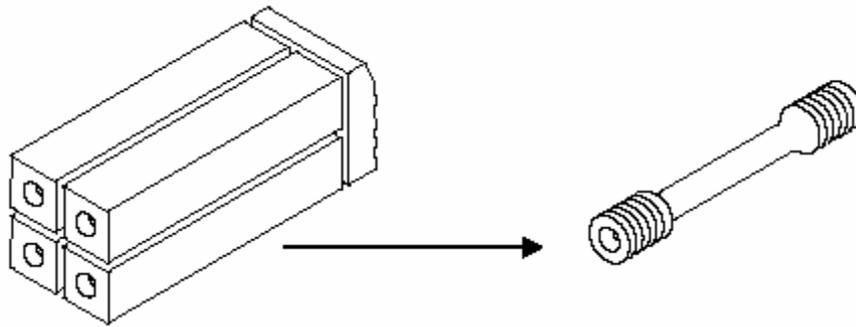


Figura 4.6 Proceso de mecanizado de 4 probetas de tracción miniatura partiendo de media Charpy

Con esta técnica fue posible extraer 8 probetas a partir de una misma Charpy de material base no irradiado, probeta 766, que fue añadida al alcance experimental exclusivamente para tal fin. Las probetas resultantes fueron denominadas 766-A, B, C, D, E, F, G, y H. Por otra parte, las 4 probetas de material base irradiado fueron obtenidas de una de las probetas Charpy inicialmente contempladas en el trabajo, la denominada 74J. Ésta resulto dañada durante el proceso de extracción de la cápsula, por lo cual fue desechada. Sin embargo, pudo emplearse la mitad de dicha Charpy en el mecanizado de 4 probetas de tracción, que son las que han permitido completar la caracterización del material. La denominación dada a tales probetas fue 74J-A, B, C, D.

La dependencia del límite elástico y de la tensión de rotura con la temperatura fue obtenida ensayando en un rango térmico comprendido entre -150 y 300 °C para el material no irradiado y -150 y 260 °C para el irradiado, puesto que en este caso se dispone de un número más reducido de probetas. En el primer caso se hizo uso exclusivamente de 7 probetas que permitieron definir perfectamente la curva sin consumir la probeta restante. Los valores experimentales han sido ajustados por medio de leyes exponenciales del tipo (4.3), las cuales vienen sancionadas por la experiencia.

$$\sigma(\text{MPa}) = C_0 + C_1 \cdot e^{-C_2 \cdot T(^{\circ}\text{C})} \quad (4.3)$$

La Tabla 4.6 resume los valores experimentales más representativos, incluyendo el límite elástico, σ_{YS} , la tensión de rotura, σ_{TS} , así como reducción de área, RA . La

Figura 4.7 resume toda esta información en forma gráfica. En ella se han incorporado, aparte de los resultados experimentales obtenidos en esta tesis, los valores procedentes del Programa de Vigilancia, para fluencias de valor $\Phi_1 = 0.057 \cdot 10^{19} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ y $\Phi_2 = 0.126 \cdot 10^{19} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$ ($E > 1 \text{ MeV}$), respectivamente, correspondientes con las cápsulas 1 y 2. La Tabla 4.7, por su parte, recoge los parámetros de los ajustes C_0 , C_1 y C_2 de acuerdo con (4.3).

Tabla 4.6 Resultados representativos de los ensayos de tracción

Probeta	$T(^{\circ}\text{C})$	Fluencia ($10^{19} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$, $E > 1 \text{ MeV}$)	σ_{YS} (MPa)	σ_{TS} (MPa)	RA(%)
766-E	-150	0	685	813	63
766-F	-100	0	530	707	69
766-G	-50	0	447	630	73
766-H	23	0	423	582	74
766-D	100	0	390	541	74
766-C	200	0	370	542	74
766-B	300	0	363	570	73
74J-B	-150	0.0355	718	842	63
74J-D	-70	0.0355	496	688	69
74J-A	24	0.0355	442	604	72
74J-C	260	0.0355	436	581	68

Tabla 4.7 Coeficientes de ajuste para el material no irradiado e irradiado

Fluencia ($10^{19} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$, $E > 1 \text{ MeV}$)	Propiedad	C_0 (MPa)	C_1 (MPa)	C_2 ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)
0	σ_{YS}	371.2	44.76	0.01290
	σ_{TS}	545.8	47.21	0.01170
0.0355	σ_{YS}	434.3	15.83	0.00192
	σ_{TS}	575.0	48.44	0.01141

La Figura 4.7 permite apreciar algunos aspectos reseñables. A la misma se han incorporado todos los valores experimentales disponibles junto con los ajustes correspondientes al material no irradiado e irradiado a la fluencia de esta tesis. En primer lugar se aprecia que la expresión (4.3) reproduce fielmente la dependencia tanto del límite elástico como de la tensión de rotura con la temperatura, para el material no irradiado e irradiado, con las incertidumbres propias del fenómeno. Por otra parte, a partir de estos ajustes, queda patente que ambos parámetros se ven afectados por la irradiación neutrónica. Las diferencias en el límite elástico alcanzan los 60 MPa y para

la tensión de rotura los 30 MPa, a temperaturas elevadas (compárese el valor de C_0). Consecuentemente, incluso un valor reducido de fluencia, como el que se contempla en este trabajo, puede alterar de forma apreciable ambos parámetros.

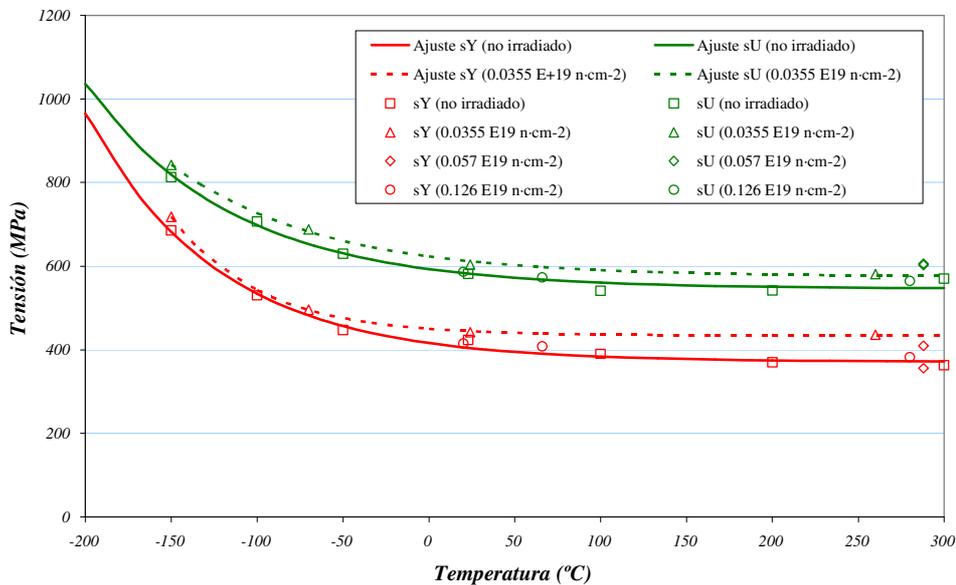


Figura 4.7 Resultados de tracción sobre el material de interés

Finalmente, a modo de ejemplo, se reproducen tres de las curvas de tracción sobre material no irradiado correspondientes con ensayos practicados a temperatura ambiente, Figura 4.8, a 100 °C, Figura 4.9 y a 200 °C, Figura 4.10. Como puede apreciarse, la modificación en la temperatura de ensayo hace que a 200 °C desaparezca el escalón de cedencia que se aprecia para temperaturas más reducidas.

4.3.2 Ensayos de tenacidad cuasi-estática. Resultados y cálculo de T_0

Este apartado contiene los resultados experimentales que permiten caracterizar al material de interés en la zona de transición y en condiciones de sollicitación cuasi-estática. Se trata, por ello, de los ensayos más relevantes de la tesis. Se presentan, para cada una de las 8 familias que se contemplan en la Tabla 3.7, los valores más significativos de los ensayos de fractura en forma de tablas, y, seguidamente, de manera gráfica, los resultados de tenacidad, incluyendo sus correspondientes curvas patrón: mediana, $K_{Jc(med)}$, y bandas de confianza del 1, 5, 95 y 99%, $K_{Jc(0.01)}$, $K_{Jc(0.05)}$, $K_{Jc(0.95)}$ y $K_{Jc(0.99)}$.

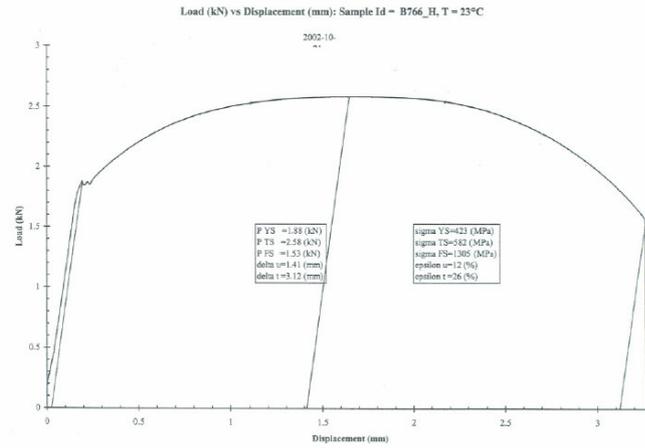


Figura 4.8 Curva de tracción, $T=23\text{ }^{\circ}\text{C}$, sobre probeta de material de interés

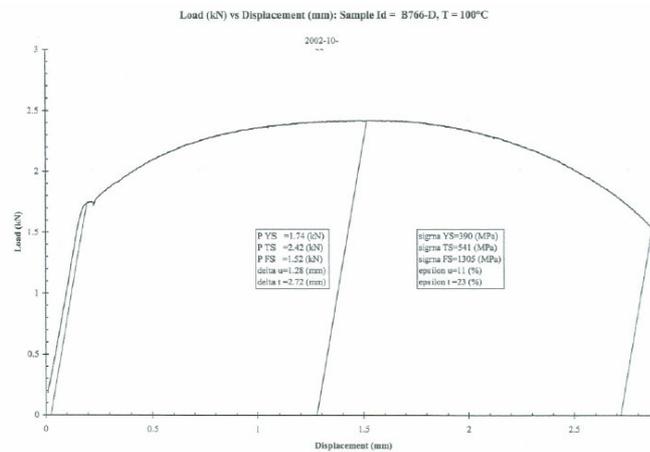


Figura 4.9 Curva de tracción, $T=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, sobre probeta de material de interés

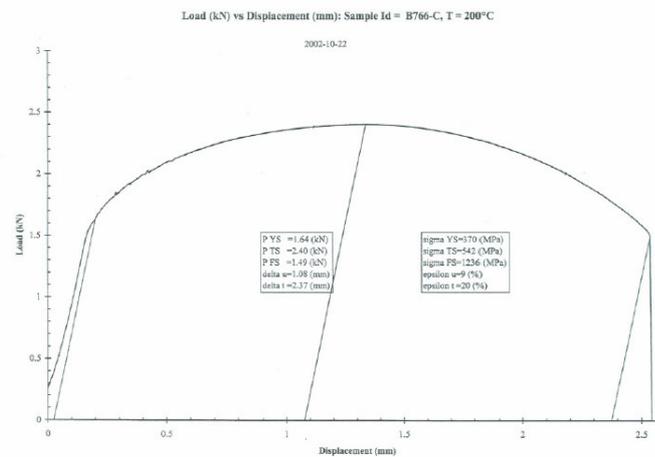


Figura 4.10 Curva de tracción, $T=200\text{ }^{\circ}\text{C}$, sobre probeta de material de interés

El formato de presentación es, pues, similar al utilizado para el material complementario. La única diferencia remarcable estriba en el cálculo del valor límite de la tenacidad para el espesor de la probeta, $K_{Jc(lim)}$. La expresión empleada en este caso es la (3.5), correspondiente a las versiones más recientes de la norma de ensayo [25] y, muy particularmente, a la última publicada, año 2005, a diferencia de la expresión (4.1), utilizada en el material complementario. Este pequeño detalle técnico no supone una discrepancia de calado en los procesos de caracterización del material.

El orden en el que se presentan los resultados en tablas y figuras es el siguiente:

- Material no irradiado:
 - PCCv normalizadas, orientación LT: Tabla 4.8, Figura 4.11.
 - PCCv reconstruidas, orientación LT: Tabla 4.9, Figura 4.12.
 - CT reconstruidas, orientación LT: Tabla 4.10, Figura 4.13.
 - PCCv reconstruidas, orientación TL: Tabla 4.11, Figura 4.14.
- Material irradiado:
 - PCCv normalizadas, orientación LT: Tabla 4.12, Figura 4.15.
 - PCCv reconstruidas, orientación LT: Tabla 4.13, Figura 4.16.
 - CT reconstruidas, orientación LT: Tabla 4.14, Figura 4.17.
 - PCCv reconstruidas, orientación TL: Tabla 4.15, Figura 4.18.

Cuando corresponde, se indica mediante notas a pie de tabla los ensayos no válidos por no haber satisfecho el criterio de rectitud del frente de fisura incluido en [25]. Se aprecia que todos ellos se dan en probetas CT reconstruidas, Tabla 4.10, en completa coherencia con la problemática detectada en las probetas CT de material complementario.

Resulta significativo por cuanto el proceso de reconstrucción ha sido ejecutado por una compañía distinta, lo cual parece indicar una tendencia natural de las soldaduras EBW practicadas en un solo paso (Apartado 3.4.2.2) a manifestar problemas de esta

naturaleza, véase [60]. A pesar de ello, los resultados de la Tabla 4.14, correspondientes también con probetas CT reconstruidas, esta vez sobre material irradiado, resultaron todos válidos. Ello es, probablemente, debido a que los valores de prefisura de fatiga adoptados fueron sensiblemente mayores; de esta forma el frente de fisura se aleja de la región influida por el cordón de soldadura corrigiéndose, por lo tanto, la irregularidad del frente.

Tabla 4.8 Resultados en material no irradiado, probetas PCCv normalizadas, orientación LT

Probeta UCQ	T ($^{\circ}C$)	a_0 (mm)	Δa (mm)	$K_{Jc(10mm)}$ ($MPa \cdot m^{1/2}$)	$K_{Jc,lim(10mm)}$ ($MPa \cdot m^{1/2}$)	$K_{Jc,LT,calc}$ ($MPa \cdot m^{1/2}$)	¿Válido?
74M	-95	5.08	0	175.9	141.7	116.4	No
74P	-95	4.86	0	215.1	144.9	118.9	No
74T	-95	4.90	0	137.4	144.3	113.0	Sí
74U	-95	4.81	0	185.5	145.6	119.5	No
74Y	-130	5.02	0	49.8	154.8	43.6	Sí
751	-130	4.99	0	57.4	155.3	49.6	Sí
752	-130	5.09	0	56.2	153.7	48.7	Sí
753	-130	4.89	0	113.9	156.8	94.3	Sí
754	-120	5.50	0	67.5	143.4	57.6	Sí
755	-120	5.06	0	63.1	150.2	54.1	Sí
756	-120	5.00	0	95.6	151.1	79.9	Sí
757	-120	4.86	0	86.4	153.3	72.6	Sí
75A	-110	4.75	0	127.4	151.2	105.1	Sí
75B	-110	5.03	0	172.3	147.1	120.7	No
75C	-110	5.15	0	98.7	145.4	82.3	Sí

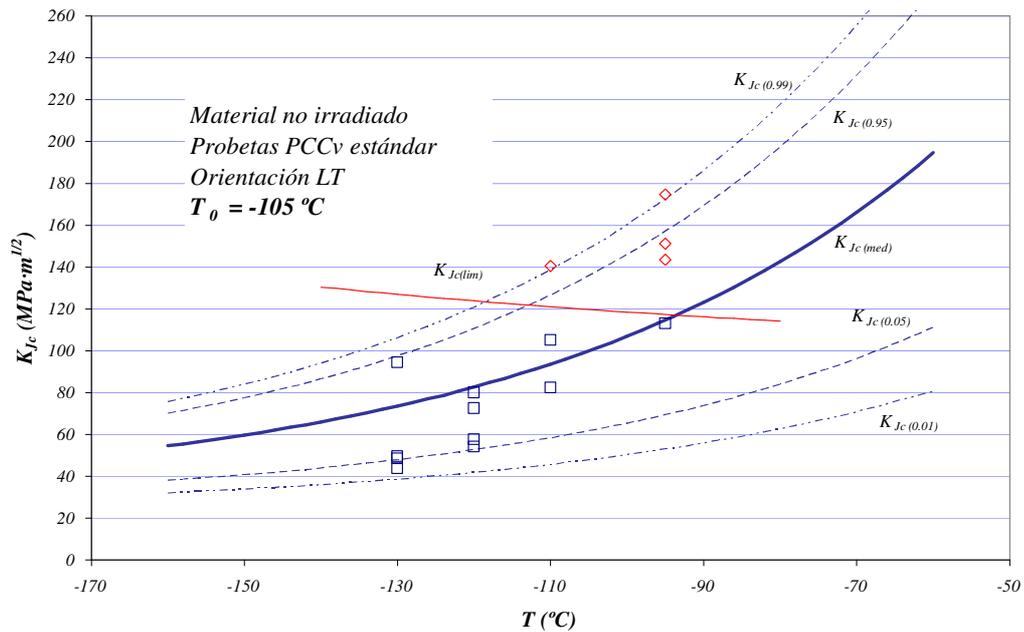


Figura 4.11 Valores $K_{Jc(IT)}$ y Curva Patrón, material no irradiado, probetas PCCv normalizadas, orientación LT

Tabla 4.9 Resultados en material no irradiado, probetas PCCv reconstruidas, orientación LT*

Probeta UCQ	T (°C)	a_0 (mm)	Δa (mm)	$K_{Jc(10mm)}$ (MPa·m ^{1/2})	$K_{Jc,lim(10mm)}$ (MPa·m ^{1/2})	$K_{Jc,IT,calc}$ (MPa·m ^{1/2})	¿Válido?
74T/B	-105	5.04	0	93.3	145.4	78.1	Sí
751/B	-105	5.00	0	71.1	145.9	60.5	Sí
754/B	-105	5.18	0	96.5	143.3	80.6	Sí
75B/D	-105	5.43	0	131.7	139.5	108.5	Sí
75C/D	-105	5.37	0	99.0	140.4	82.6	Sí
74Y/B	-95	4.78	0	138.6	146.00	114.0	Sí
752/B	-95	4.84	0	82.3	145.2	69.3	Sí
753/B	-95	5.11	0	109.9	141.3	91.2	Sí
756/B	-95	4.70	0	124.2	147.1	102.6	Sí
755/B	-110	5.11	0	94.9	146.0	79.3	Sí
757/B	-110	4.86	0	242.5	149.6	122.7	No
74M/B	-110	4.83	0	70.5	150.1	60.0	Sí
74U/B	-110	5.03	0	103.6	147.1	86.2	Sí

*De las quince probetas contempladas en el alcance optimizado sólo trece resultados han podido ser evaluados debido a un problema técnico en el sistema de adquisición de datos durante la ejecución del ensayo.

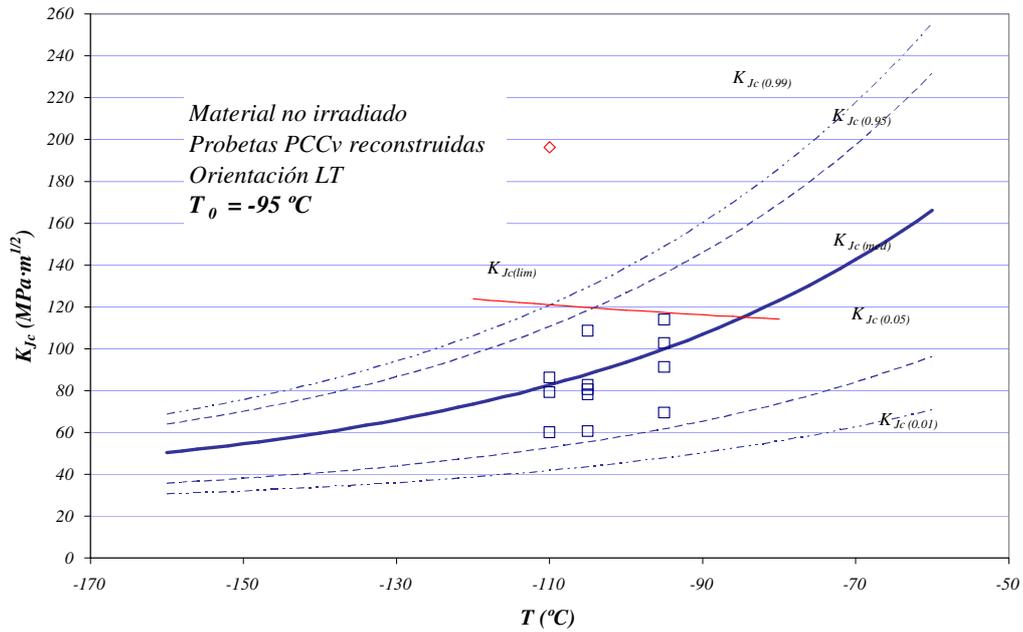


Figura 4.12 Valores $K_{Jc(1T)}$ y Curva Patrón, material no irradiado, probetas PCCv reconstruidas, orientación LT

Tabla 4.10 Resultados en material no irradiado, probetas CT reconstruidas, orientación LT

Probeta UCQ	T (°C)	a_0 (mm)	Δa (mm)	$K_{Jc(10mm)}$ (MPa·m ^{1/2})	$K_{Jc,lim(10mm)}$ (MPa·m ^{1/2})	$K_{Jc,1T,calc}$ (MPa·m ^{1/2})	¿Válido?
74MR	-100	11.94	0	81.0	183.3	68.3	Sí
74PR*	-100	12.50	0	75.8	176.8	64.2	Sí
74TR	-100	11.75	0	46.9	185.4	41.3	Sí
74UR*	-100	12.70	0	139.0	174.4	114.3	Sí
74YR	-100	11.21	0	58.0	191.4	50.1	Sí
751R	-80	11.62	0	146.7	179.8	120.3	Sí
752R*	-80	12.35	0	171.1	171.8	139.7	Sí
753R*	-80	12.34	0	96.9	171.9	80.9	Sí
754R*	-80	12.32	0	115.2	172.1	95.4	Sí
755R*	-60	12.68	0	115.7	162.6	95.8	Sí
756R	-60	12.85**	0	229.3	160.7	131.5	No
757R	-60	12.77**	0	245.4	161.6	132.2	No
75AR*	-60	12.20	0	224.0	168.0	137.2	No

*Estos resultados son los únicos realmente considerados para el cómputo de T_0 . Los motivos de esta decisión se justifican adecuadamente en el Apartado 3.3 de este documento.

**Estas probetas no satisfacen el criterio de dispersión en el frente de fisura exigido en la norma [25].

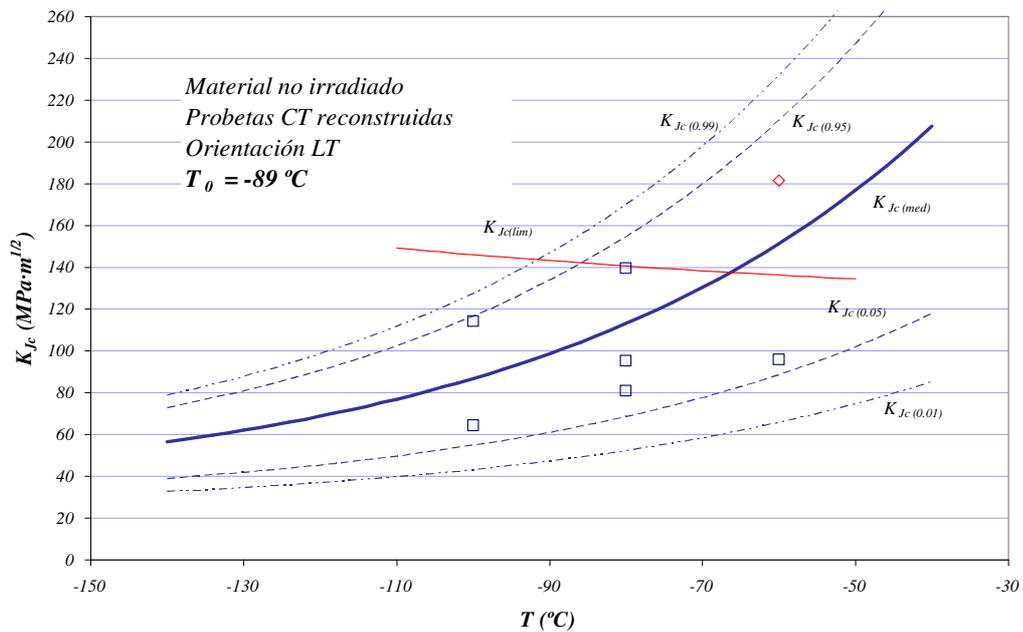


Figura 4.13 Valores $K_{Jc(IT)}$ y Curva Patrón, material no irradiado, probetas CT reconstruidas, orientación LT

Tabla 4.11 Resultados en material no irradiado, probetas PCCv reconstruidas, orientación TL

Probeta UCQ	T (°C)	a_0 (mm)	Δa (mm)	$K_{Jc(10mm)}$ (MPa·m ^{1/2})	$K_{Jc,lim(10mm)}$ (MPa·m ^{1/2})	$K_{Jc,IT,calc}$ (MPa·m ^{1/2})	¿Válido?
74M/A	-90	5.41	0	215.5	135.6	111.5	No
74P/A	-90	5.10	0	154.4	140.1	115.1	No
74T/A	-90	5.09	0	208.1	140.2	115.2	No
74U/A	-90	5.08	0	129.9	140.3	107.0	Sí
74Y/A	-120	5.03	0	57.3	150.7	49.6	Sí
751/A	-120	5.22	0	108.4	147.8	90.0	Sí
752/A	-120	5.49	0	94.3	143.6	78.9	Sí
753/A	-120	5.16	0	70.7	148.7	60.1	Sí
754/A	-120	5.14	0	66.4	149.0	56.8	Sí
755/A	-105	5.39	0	62.2	140.1	53.4	Sí
756/A	-105	5.33	0	121.3	141.0	100.2	Sí
757/A	-105	5.06	0	188.7	145.1	119.1	No
75A/A	-105	5.07	0	69.2	144.9	59.0	Sí
75B/A	-105	5.11	0	142.4	144.3	116.9	Sí
75C/A	-105	5.17	0	152.8	143.4	117.8	No

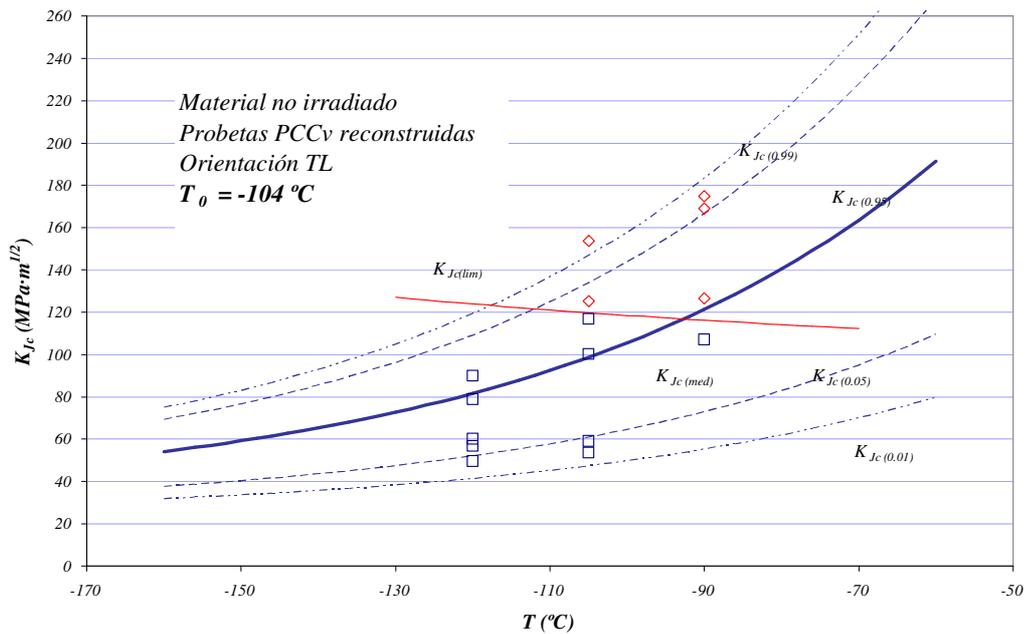


Figura 4.14 Valores $K_{Jc(IT)}$ y Curva Patrón, material no irradiado, probetas PCCv reconstruidas, orientación TL

Tabla 4.12 Resultados en material irradiado, probetas PCCv normalizadas, orientación LT

Probeta UCQ	T (°C)	a_0 (mm)	Δa (mm)	$K_{Jc(10mm)}$ (MPa·m ^{1/2})	$K_{Jc,lim(10mm)}$ (MPa·m ^{1/2})	$K_{Jc,IT,calc}$ (MPa·m ^{1/2})	¿Válido?
745	-125	4.98	0	52.7	148.5	45.8	Sí
747	-120	4.82	0	68.4	150.2	58.3	Sí
74C	-120	4.91	0	68.7	148.9	58.5	Sí
74A	-120	4.77	0	83.3	150.9	70.1	Sí
74B	-120	4.90	0	87.1	149.0	73.2	Sí
746	-120	4.86	0	108.7	149.6	90.2	Sí
744	-120	4.96	0	112.6	148.2	93.3	Sí
74D	-110	4.85	0	70.8	148.5	60.2	Sí
74E	-105	4.83	0	86.7	148.1	72.8	Sí
742	-100	4.94	0	70.3	145.9	59.8	Sí
743	-100	4.90	0	143.7	146.5	117.9	Sí

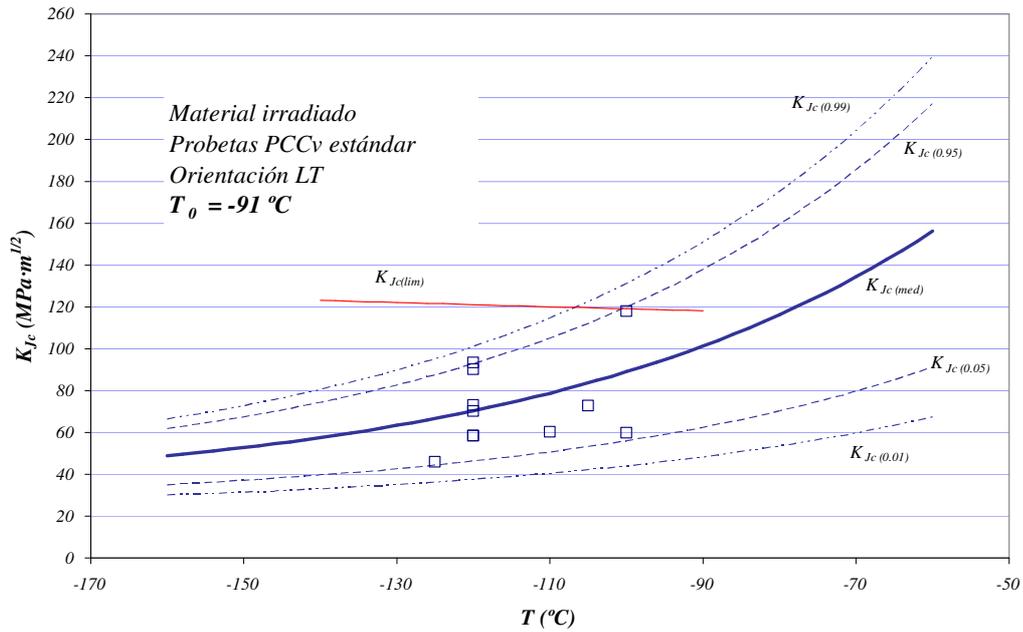


Figura 4.15 Valores $K_{Jc(T)}$ y Curva Patrón, material irradiado, probetas PCCv normalizadas, orientación LT

Tabla 4.13 Resultados en material irradiado, probetas PCCv reconstruidas, orientación LT

Probeta UCQ	T (°C)	a_0 (mm)	Δa (mm)	$K_{Jc(10mm)}$ (MPa·m ^{1/2})	$K_{Jc,lim(10mm)}$ (MPa·m ^{1/2})	$K_{Jc,LT,calc}$ (MPa·m ^{1/2})	¿Válido?
742D	-115	4.93	0	58.0	147.8	50.1	Sí
743C	-115	4.87	0	64.5	148.7	55.3	Sí
742C	-115	5.14	0	70.8	144.7	60.3	Sí
746D	-110	5.00	0	70.2	146.2	59.8	Sí
74AC	-110	5.02	0	71.7	145.9	61.1	Sí
74AD	-110	4.98	0	85.2	146.5	71.7	Sí
747C	-110	4.99	0	86.5	146.3	72.8	Sí
747D	-110	4.86	0	95.5	148.2	80.0	Sí
746C	-110	5.06	0	138.2	145.3	113.8	Sí
745D	-105	4.99	0	136.5	145.7	112.4	Sí
745C	-100	4.91	0	155.6	146.2	120.0	No
744C	-95	5.00	0	62.5	144.3	53.7	Sí
743D	-95	4.96	0	96.9	144.9	81.1	Sí
744D	-95	4.71	0	133.8	148.5	110.4	Sí

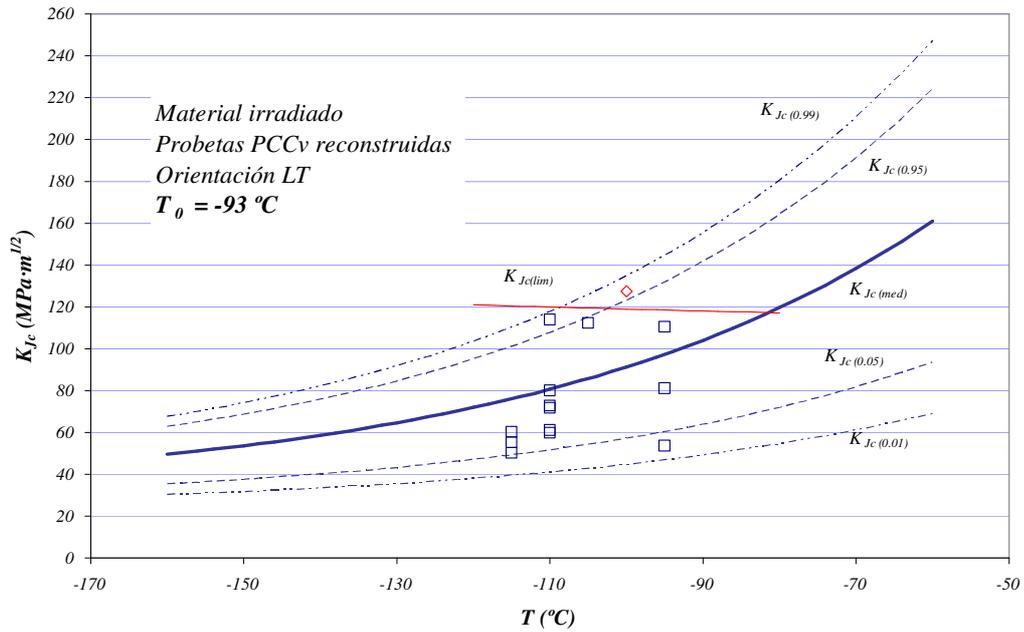


Figura 4.16 Valores $K_{Jc(T)}$ y Curva Patrón, material irradiado, probetas PCCv reconstruidas, orientación LT

Tabla 4.14 Resultados en material irradiado, probetas CT reconstruidas, orientación LT

Probeta UCQ	$T \text{ (}^\circ\text{C)}$	$a_0 \text{ (mm)}$	$\Delta a \text{ (mm)}$	$K_{Jc(10mm)} \text{ (MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	$K_{Jc,lim(10mm)} \text{ (MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	$K_{Jc,LT,calc} \text{ (MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	¿Válido?
747L	-110	13.24	0	119.6	170.1	98.6	Sí
746L	-110	13.23	0	56.9	170.2	49.3	Sí
745L	-110	13.43	0	76.1	167.7	64.3	Sí
744L	-110	13.41	0	118.4	168.0	97.7	Sí
743L	-110	13.18	0	36.7	170.9	33.2	Sí
742L	-110	13.52	0	84.7	166.6	71.2	Sí
74AL	-110	13.15	0	76.4	171.2	64.5	Sí
73MD	-110	13.27	0	93.7	169.7	77.0	Sí
743D	-110	13.66	0	83.7	164.7	68.9	Sí
733L	-110	13.20	0	72.8	170.6	60.6	Sí
73ML	-110	12.91	0	100.4	174.2	82.3	Sí

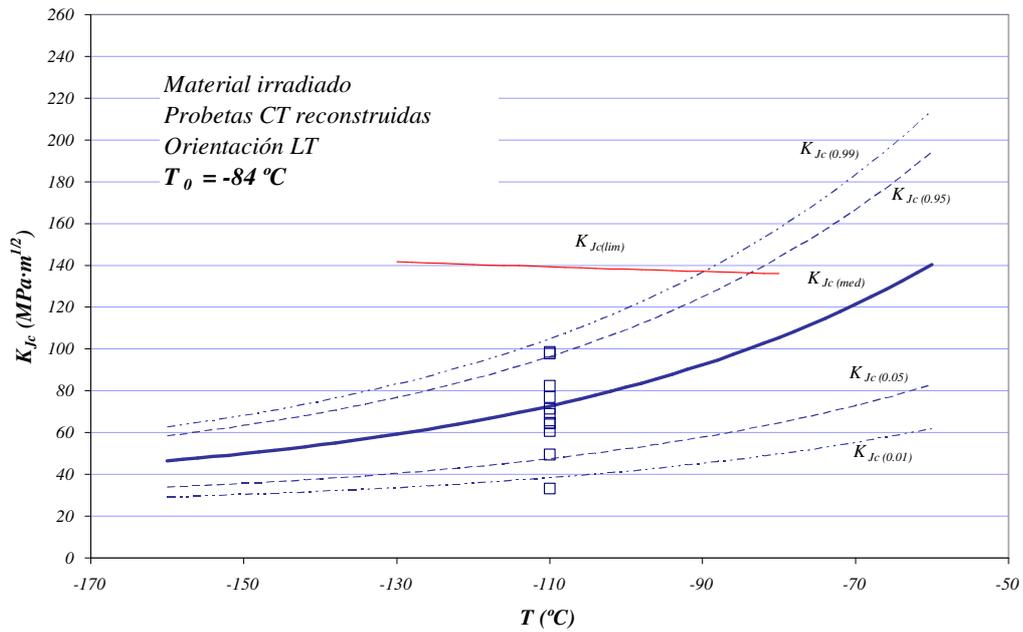


Figura 4.17 Valores $K_{Jc(T)}$ y Curva Patrón, material irradiado, probetas CT reconstruidas, orientación LT

Tabla 4.15 Resultados en material irradiado, probetas PCCv reconstruidas, orientación TL

Probeta UCQ	$T\text{ (°C)}$	$a_0\text{ (mm)}$	$\Delta a\text{ (mm)}$	$K_{Jc(10mm)}\text{ (MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	$K_{Jc,lim(10mm)}\text{ (MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	$K_{Jc,LT,calc}\text{ (MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	¿Válido?
74CB	-120	5.13	0	52.3	145.5	45.5	Sí
74CC	-120	5.29	0	58.2	142.5	50.3	Sí
74CD	-115	5.16	0	58.5	144.4	50.6	Sí
74EB	-115	5.11	0	61.0	145.2	52.5	Sí
74EA	-115	5.01	0	74.9	146.7	63.5	Sí
74ED	-115	5.11	0	85.8	145.2	72.3	Sí
74DD	-115	5.08	0	88.5	145.6	74.3	Sí
74EC	-115	5.07	0	97.2	145.1	81.4	Sí
74BD	-110	5.00	0	63.8	146.2	54.7	Sí
74DC	-110	5.00	0	80.8	146.2	68.2	Sí
74BC	-110	4.89	0	106.5	147.8	88.6	Sí
74DA	-110	4.93	0	112.3	147.2	93.3	Sí
74DB	-110	4.97	0	122.3	146.6	101.1	Sí
74CA	-110	4.71	0	145.9	147.9	119.7	Sí
74BB	-90	5.03	0	163.5	134.4	110.6	No

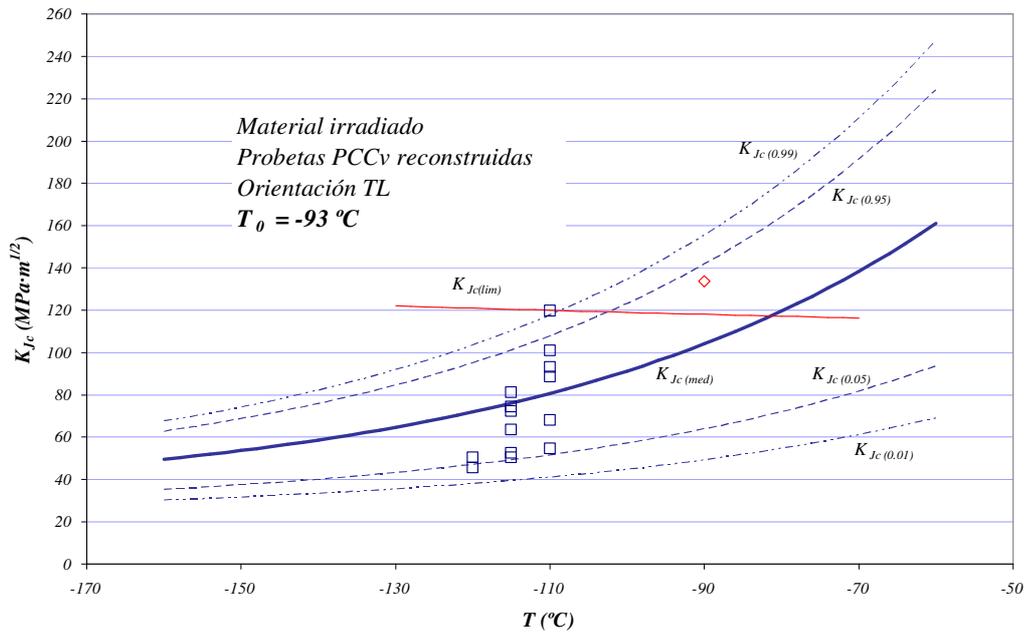


Figura 4.18 Valores $K_{Jc(T)}$ y Curva Patrón, material irradiado, probetas PCCv reconstruidas, orientación TL

La Tabla 4.16 recoge los valores finales de T_0 junto con las correspondientes desviaciones estándar (se ha considerado el valor 2σ , costumbre ésta que se respeta en este ámbito). En ambas se indica además, entre paréntesis, el número de probetas finalmente empleadas en el cálculo.

Admitiendo que ni los procesos de reconstrucción utilizados en este trabajo ni las diferentes configuraciones experimentales afectan sistemáticamente a los valores de Temperatura de Referencia, o que su efecto es pequeño -aspectos éstos cuya discusión se pospone hasta los Apartados 4.4.1 y 4.4.4- los valores de T_0 pueden ser agrupados en las cuatro familias que se ofrecen en la Tabla 4.17, atendiendo sólo a criterios de orientación y estado de irradiación del material. Esta posibilidad queda contemplada en la norma de ensayo [25].

Tabla 4.16 Resultados finales, $T_0 \pm 2\sigma(^{\circ}C)$ en el material de interés

	Estándar	Reconstruidas	
	PCCv	PCCv	CT
No irradiado	-105 ± 11 (15 LT)	-95 ± 10 (13 LT) ¹	-89 ± 15
		-104 ± 11 (15 TL)	(7 LT) ²
Irradiado ($0.0355 \cdot 10^{19} n \cdot cm^{-2}$)	-91 ± 11 (11 LT)	-93 ± 10 (14 LT)	-84 ± 11
		-93 ± 10 (15 TL)	(7+4 LT)

¹De las 15 probetas inicialmente consideradas dos de los resultados no han podido ser evaluados debido a un problema técnico en el sistema de adquisición de datos durante el ensayo.

² Como se explica en el Apartado 0, sólo 7 de las 13 probetas han podido ser consideradas en el cálculo de T_0 .

Tabla 4.17 Resultados finales, $T_0 \pm 2\sigma(^{\circ}C)$ en el material de interés, agrupados por familias

	Orientación	
	LT	TL
No irradiado	-98 ± 6 (35 LT)	-104 ± 11 (15 TL)
Irradiado ($0.0355 \cdot 10^{19} n \cdot cm^{-2}$)	-89 ± 6 (36 LT)	-93 ± 10 (15 TL)

4.3.3 Validación de los resultados de Temperatura de Referencia T_0

La Temperatura de Referencia, T_0 , es un parámetro relativamente independiente de la temperatura de ensayo siempre que ésta se mantenga dentro de la llamada ventana de validez definida como $T_0 \pm 50^{\circ}C$, véase el Apartado 2.4.5.4. La norma [25] contempla, además, una condición a satisfacer, expresión (2.90), a fin de que el resultado final sea estadísticamente aceptable. En la Tabla 4.18 se resumen los resultados de este proceso de validación.

Tabla 4.18 Parámetro de validez de T_0 según familias

Fluencia ($10^{19} n\text{-cm}^{-2}, E > 1\text{Mev}$)	Familia	$\sum_{i=1}^N r_i n_i$
0	<i>PCCv estándar, LT</i>	1.64
	<i>PCCv reconstruidas, LT</i>	1.93
	<i>CT reconstruidas, LT</i>	1.00
	<i>PCCv reconstruidas, TL</i>	1.55
0.0355	<i>PCCv estándar, LT</i>	1.62
	<i>PCCv reconstruidas, LT</i>	1.95
	<i>CT reconstruidas, LT</i>	1.57
	<i>PCCv reconstruidas, TL</i>	2.00

La Tabla 4.18 permite constatar que todas las familias ensayadas han proporcionado resultados representativos de Temperatura de Referencia T_0 . No obstante, en el caso de probetas CT reconstruidas sobre material no irradiado, el requisito se ha cumplido de forma muy ajustada. Originalmente se disponía de 13 probetas de esta familia. Se había estimado un valor de prefisura de fatiga, a_0 , de 12.2 mm para evitar el contacto entre la zona plástica y el material afectado por el proceso de reconstrucción, permitiendo de este modo la obtención de un valor de tenacidad K_{Jc} representativo del material de interés. Sin embargo, como se aprecia en la Tabla 4.10, cuatro de las probetas ensayadas ofrecieron valores de a_0 más reducidos, con lo cual fueron descartados. De hecho, los valores de tenacidad de estas probetas resultaron acusadamente bajos, confirmando las sospechas sobre una posible interferencia con el material del cordón. Otras dos probetas, Tabla 4.10, no superaron el criterio de dispersión en el frente de fisura fenómeno éste que, como ya se ha comentado, se repite con insistencia en esta tipología. Por lo tanto, sólo 7 de las probetas inicialmente contempladas fueron utilizadas en el cálculo de T_0 .

Una manera de contrastar la calidad de los resultados obtenidos es a través de una representación como la de la Figura 4.19. En ella se recogen los valores experimentales de tenacidad $K_{Jc(1T)}$ en función de $(T - T_0)$. De esta manera resulta posible incluir en una sola figura los valores experimentales de las ocho familias ensayadas en condiciones de igualdad, pues las diferencias microestructurales (orientación) o debidas a la irradiación quedan recogidas en su correspondiente valor de T_0 . Como puede apreciarse, las bandas de confianza recogen la mayoría de los puntos experimentales.

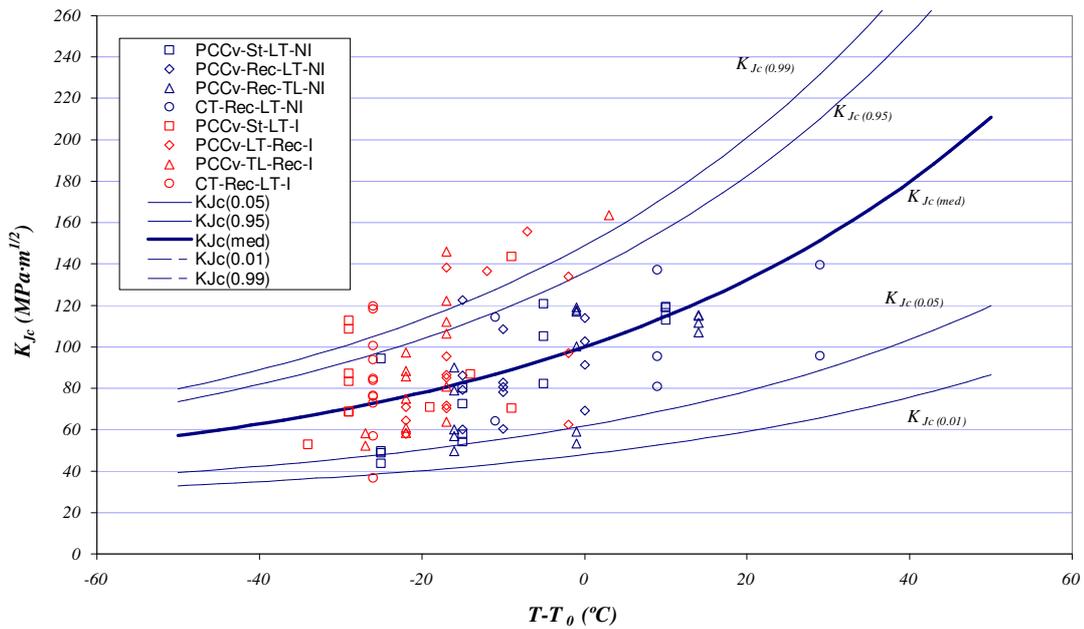


Figura 4.19 Compendio de resultados de tenacidad en una gráfica normalizada

4.3.4 Resultados de los ensayos de impacto en probetas PCCv

En la Tabla 4.19 se resumen los resultados experimentales, incluyendo la temperatura de ensayo, el valor de la fisura de fatiga, la energía total absorbida y la resiliencia o energía absorbida por unidad de ligamento resistente. Además se incluye en la última columna la energía absorbida por un ligamento de 0.8 cm^2 , que es el área resistente de una probeta Charpy convencional, con entalla de 2 mm. Estos valores, que se obtienen multiplicando los de resiliencia por el factor 0.8, son los que deben compararse con los procedentes de los ensayos de impacto convencional, como se hace en el Apartado 4.4.5. En la Figura 4.20 se representan dichos puntos y se incluye su ajuste tipo tangente hiperbólica, señalando los valores de T_{41J} y de la energía USE. Además, se han incorporado tres imágenes que representan la evolución que experimenta la sección de rotura a medida que aumenta la temperatura de ensayo.

El rango de temperaturas fue escogido con la intención de recoger la curva de impacto completamente, desde la región frágil (LSE) hasta la dúctil (USE). Las macrografías permiten constatar que se ha cubierto la totalidad del rango de comportamientos puesto que, a bajas temperaturas la apariencia de fractura es completamente frágil y,

recíprocamente, se aprecia una respuesta dúctil para las temperaturas de ensayo más altas. La Figura 4.21 permite comparar la diferencia en el registro Carga-Desplazamiento dependiendo de la temperatura de ensayo, -40 y 80°C, respectivamente, que, consecuentemente, modifica los mecanismos de rotura, como evidencian las imágenes incluidas en la Figura 4.20.

Tabla 4.19 Resultados significativos de los ensayos Charpy instrumentado en probetas prefisuradas de material de interés, LT no irradiado

Probeta	T (°C)	a ₀ (mm)	E (J)	R (J/cm ²)	E _{0.8} (J)
763	-25	4.23	8.55	14.81	11.85
75P	-25	4.15	8.88	15.18	12.14
75D	-40	4.01	7.14	11.91	9.53
75L	-40	4.09	6.90	11.68	9.34
75U	-10	3.96	13.33	22.05	17.64
75Y	-10	4.30	14.28	25.03	20.02
75T	25	4.20	38.46	66.25	53.00
75M	25	4.19	43.33	74.58	59.66
762	-80	4.18	1.21	2.08	1.66
765	80	4.13	83.75	142.67	114.14
75K	10	4.26	20.63	35.94	28.75
75E	50	5.06	43.42	87.81	70.25
761	40	4.25	47.25	82.17	65.74
75J	100	4.15	88.19	150.62	120.50
764	70	4.57	56.86	104.71	83.77

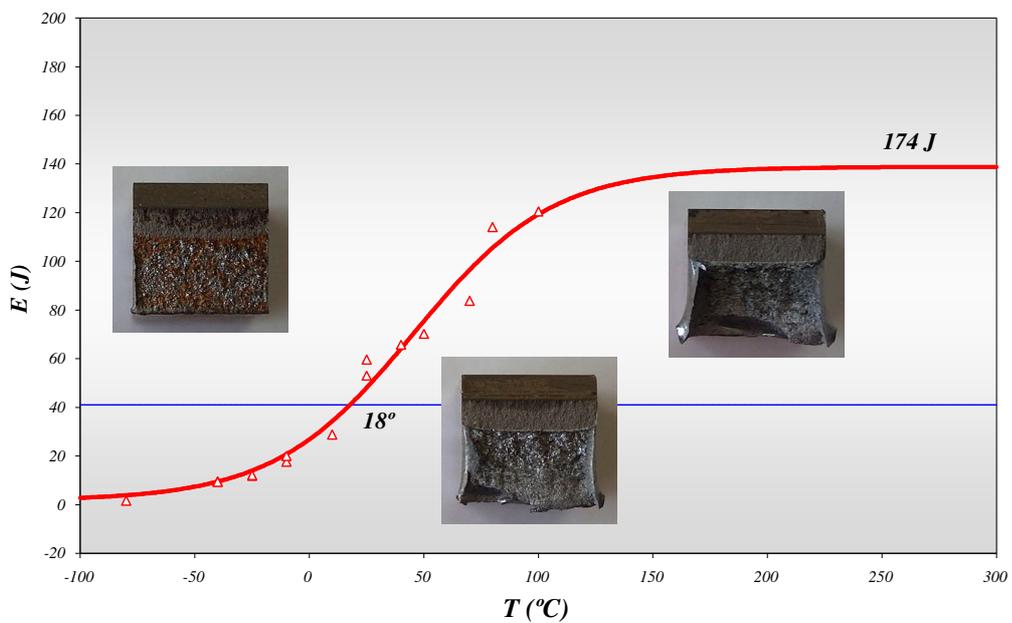


Figura 4.20 Puntos experimentales, ajuste e instantáneas de los ensayos de impacto Charpy instrumentado en probeta prefisurada

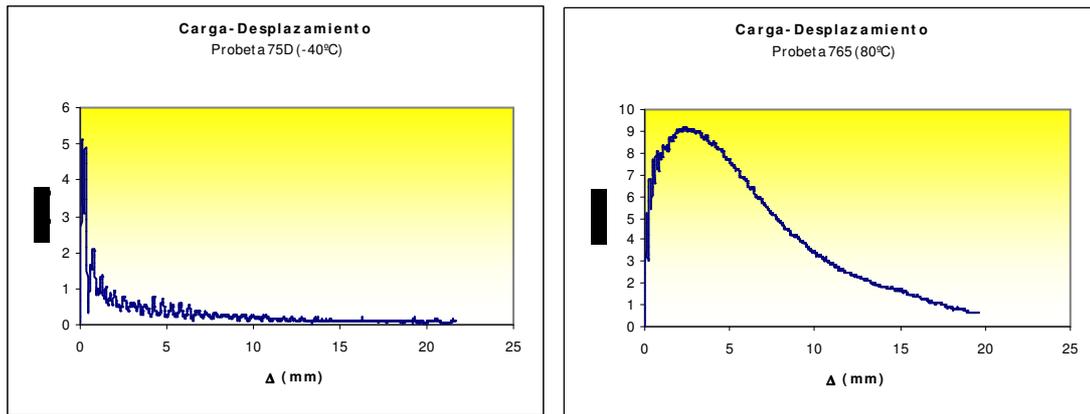


Figura 4.21 Comparación entre los registros carga – desplazamiento en función de la temperatura

4.4 Análisis de resultados experimentales en material de interés

La selección original de material, irradiado y no irradiado, la fabricación de probetas de diferentes configuraciones, PCCv y CT, y orientaciones, LT y TL, destinadas a ser ensayadas en dos regímenes de velocidad (cuasi-estático e impacto), debe proporcionar respuesta a una serie de cuestiones sobre la caracterización de la tenacidad del material, tales como las que a continuación se detallan:

- Influencia potencial del proceso de reconstrucción, Apartado 4.4.1
- Efecto de la orientación, Apartado 4.4.2
- Efecto de la irradiación, Apartado 4.4.3
- Efecto de la configuración experimental, Apartado 4.4.4
- Comparación entre ensayos cuasi-estáticos y dinámicos, Apartado 4.4.5

Por ello, en los párrafos que siguen se resumen las respuestas a estos interrogantes que el análisis sobre los resultados del proceso experimental ha proporcionado.

4.4.1 Efecto potencial de la reconstrucción

En este trabajo han sido ensayadas probetas reconstruidas de dos tipologías diferentes. En primer lugar probetas PCCv, en las cuales el espesor del cordón de soldadura y el

tamaño de la zona afectada térmicamente no resultan determinantes; por esta razón se ha recurrido a soldadura ASW. Por otra parte, probetas CT, para las cuales y por las razones expuestas en el Apartado 3.4.2.2, este parámetro resulta determinante, lo que motiva la utilización de la técnica EBW para la soldadura.

Los valores de longitud de fisura establecidos en el Apartado 3.4.2.2 constituyen una precaución suficiente para la obtención de un valor representativo de T_0 . Teniendo además en cuenta que se trata de ensayos a baja temperatura, de modo que, por la mayor fragilidad del material, se reducen las capacidades de éste para desarrollar zonas plásticas, se reduce todavía más la posibilidad de contacto entre material de soldadura y zona afectada térmicamente (véase la Figura 3.38).

En el caso de las probetas PCCv se dispone de resultados experimentales que permiten una comparación directa entre resultados. La Tabla 4.20 ofrece los valores para el material base según la orientación LT.

Tabla 4.20 *Valores de $T_0 \pm 2\sigma(^{\circ}C)$ orientación LT con probetas PCCv estándar y reconstruidas*

Fluencia ($10^{19} n \cdot cm^{-2}, E > 1Mev$)	PCCv estándar	PCCv reconstruidas
0	<i>-105 ± 11</i>	<i>-95 ± 10</i>
0.0355	<i>-91 ± 11</i>	<i>-93 ± 10</i>

Los resultados no permiten establecer ninguna clase de efecto sistemático puesto que el aparente desplazamiento de T_0 que pudiera observarse en el caso del material no irradiado no tiene su contrapartida para el caso irradiado. La única razón que podría falsear los resultados obtenidos a partir de probetas PCCv reconstruidas sería la posible afección térmica del material contiguo a la zona de proceso de fractura durante la soldadura. En este sentido, la información presentada en el Apartado 3.4.2.2 permite descartar la posibilidad de tal evento.

4.4.1.1 Apariencia externa de las probetas PCCv reconstruidas

En el Apartado 3.4.2.2 fueron expuestas todas las medidas adoptadas en los diferentes procesos de reconstrucción sobre material de interés para conseguir una adecuada caracterización del material del implante. El proceso de unión ASW con implantes de

10 mm implica un delicado ajuste de los parámetros de soldadura a fin de evitar la alteración de las propiedades del material de interés. Desde esta perspectiva, resulta interesante minimizar el aporte energético durante el proceso, sin embargo, ello puede redundar en una soldadura imperfecta, con presencia de poros y entallas. Los parámetros tiempo e intensidad de la corriente mencionados en el Apartado 3.4.2.2 suponen una solución de compromiso entre ambos requisitos.

De hecho, las probetas PCCv reconstruidas por ASW para esta tesis presentaron poros y entallas asociados con un aporte energético insuficiente para fundir la totalidad de la superficie de contacto entre implante y soporte. La Figura 4.22 permite contemplar algunos ejemplos extremos de defectos presentes en las soldaduras de probetas PCCv reconstruidas, tal y como fueron recibidas.



Figura 4.22 Instantánea de la apariencia final de las probetas PCCv reconstruidas por ASW

Como puede apreciarse en la Figura 4.22, las probetas manifiestan entallas y ausencias de fusión completa en las zonas de unión. Estos defectos motivaron la decisión de investigar con mayor profundidad la validez de los resultados obtenidos con el material de interés a fin de garantizar la ausencia de desviaciones sistemáticas. Una primera garantía fue proporcionada por el propio SCK-CEN, entidad a cargo de los procesos de reconstrucción por ASW, quien presentó resultados de Temperatura de Referencia, procedentes de proyectos propios [64], obtenidos con probetas reconstruidas por el mismo procedimiento. Estos valores de T_0 resultaron totalmente consistentes con los obtenidos a partir de probetas normalizadas. Por otra parte, se decidió abordar una serie de investigaciones propias para cuantificar la influencia potencial de los defectos en la respuesta mecánica de las probetas. En este sentido se han desarrollado las actividades siguientes:

- Estudio por rayos X del interior de las soldaduras
- Comparación de flexibilidades entre probetas normalizadas y reconstruidas
- Estudio estadístico por contraste de hipótesis
- Comparación de los valores de T_0

Las observaciones por rayos X en algunas muestras seleccionadas, no revelaron la presencia de defectos internos, poros o cavidades. De esta forma, puede asumirse que las regiones defectuosas se limitan al contorno externo de la zona de unión.

En la segunda de estas actividades se han comparado los valores de flexibilidad de probetas PCCv normalizadas con aquéllos procedentes de probetas reconstruidas. Es preciso mencionar que esta comparación tiene una validez limitada ya que la parte elástica de la curva de ensayo no tiene relevancia para el cálculo de la temperatura de referencia. No obstante, si la comparación no permitiera distinguir entre ambas familias, este resultado sería altamente indicativo de que la presencia de los defectos afecta mínimamente al comportamiento de la probeta. Sin embargo, no es este el caso. La Figura 4.23 ofrece un gráfico que permite comparar la flexibilidad de tres probetas normalizadas (B1, B2 y B3) con otras tres reconstruidas (M1, M2 y M3), apreciándose una diferencia manifiesta entre ambas familias. Esta prueba no permite, pues, descartar la influencia de los defectos en el proceso de caracterización.

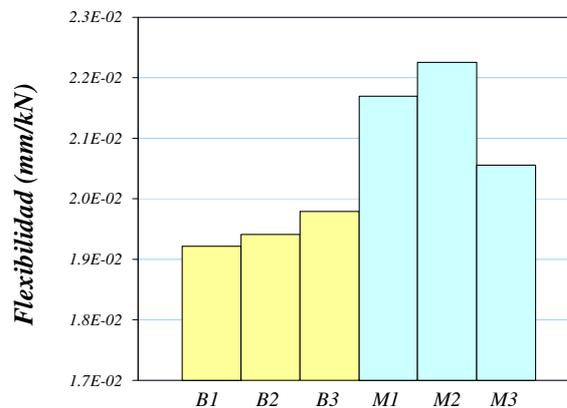


Figura 4.23 Comparación de flexibilidades entre probetas PCCv convencionales (B1, B2 y B3) y reconstruidas (M1, M2 y M3)

Seguidamente, se practicó un estudio estadístico por medio de un contraste de hipótesis. Tras ensayar las probetas de material base en orientación LT, estándar y reconstruidas, ambas sin irradiar, se obtuvo el valor de temperatura de referencia $T_{0,i}$ correspondiente a cada valor de tenacidad $K_{Jc,i}$, para, posteriormente, someter a ambas familias de resultados $\{T_{0,i}\}$, probetas normalizadas y reconstruidas, respectivamente, a una serie de contrastes estadísticos tipificados [110]. En este caso la hipótesis nula analizada, H_0 , proporcionó la probabilidad de que las diferencias en los resultados fueran achacables al azar; las características de los diversos análisis practicados así como la probabilidad asociada a la hipótesis nula H_0 se recogen en la Tabla 4.21. Como puede apreciarse en ella, en cualquiera de los casos estudiados la fiabilidad del contraste es superior al 80% lo que supone una importante corroboración acerca de la calidad de la reconstrucción en lo que a comportamiento mecánico se refiere y, consiguientemente, en cuanto a la representatividad del valor de T_0 obtenido a partir de estas probetas.

Tabla 4.21 Resultados detallados del contraste de hipótesis

DESCRIPCIÓN DEL CONTRASTE	FIABILIDAD DE H_0
<i>Datos no correlacionados Se ignora el tamaño de la muestra Uso de puntuación tipificada Normal</i>	80 %
<i>Datos correlacionados Se ignora el tamaño de la muestra Uso de puntuación tipificada Normal</i>	86 %
<i>Datos no correlacionados Se considera muestra pequeña ($N < 30$) Se admite la homogeneidad de la varianza (1) Uso de puntuación tipificada t de Student Pruebas de homogeneidad de varianza: Prueba F de Snedecor: 99 % Prueba t de Student: 78 %</i>	86 %

Por último, se han comparado los valores de T_0 obtenidos a partir de probetas PCCv reconstruidas, de material de interés en orientación LT, tanto en estado irradiado como no irradiado, con el resto de valores de temperatura de referencia de dicho material calculados en este trabajo, Tabla 4.16. Esta comparación no permite apreciar ninguna diferencia significativa y sistemática achacable al proceso de reconstrucción ASW, tal y como se estableció en el Apartado 4.4.1. Las leves diferencias quedan englobadas

dentro de las propias incertidumbres estadísticas, inherentes al proceso de caracterización. Puede concluirse, por lo tanto, que la técnica de reconstrucción utilizada proporciona resultados perfectamente confiables.

4.4.2 Efecto de la orientación

Dos orientaciones diferentes del material de interés, LT y TL, han sido ensayadas dentro de esta tesis. La Figura 3.32 compara las curvas de impacto Charpy para el material no irradiado en ambas orientaciones. Esta figura sugiere que existe una marcada diferencia entre el comportamiento de ambas orientaciones lo cual es, por otra parte, esperable al estar ampliamente documentado [3]. Así, la curva Charpy para la orientación TL ofrece valores de energía en la región *Upper Shelf* apreciablemente inferiores, 115 J frente a 199 J, es decir, presenta un comportamiento más frágil. A medida que la temperatura desciende, la diferencia se va reduciendo. La separación entre ambas curvas es, en términos de T_{41J} de tan sólo 14°C y expresada en T_{28J} de 5°C.

Al comparar los valores de T_0 no parece, sin embargo, percibirse esta supuesta respuesta frágil de la orientación TL respecto de la LT. Atendiendo a los valores de la Tabla 4.17, se observa una gran similitud entre los resultados de Temperatura de Referencia para ambas orientaciones, LT y TL, tanto en estado virgen como irradiado, presentando la orientación TL una tenacidad ligeramente superior, si bien con una mayor incertidumbre, al ser más reducido el número de ensayos.

En primera instancia, estos resultados pueden sugerir la existencia de algún tipo de discrepancia entre la caracterización por medio de ensayos de impacto Charpy y el método de la Curva Patrón. Un examen cuidadoso de la Figura 3.32 demuestra que tal discrepancia no existe: los comportamientos en las orientaciones LT y TL sólo resultan disímiles a elevadas temperaturas, sin embargo, en la zona de temperaturas correspondiente con los ensayos de tenacidad, zona de transición dúctil-frágil, donde los fenómenos de fractura vienen controlados fundamentalmente por micromecanismos frágiles (cuasi-clivajes), ello no es así. Puede concluirse, por lo tanto que la caracterización del material es coherente por ambas metodologías y que, de acuerdo con los resultados empíricos, la respuesta en fractura del material de interés en la orientación LT es semejante al de la orientación TL

La Figura 4.24 representa conjuntamente los valores experimentales correspondientes a las probetas de material no irradiado LT normalizadas y TL reconstruidas. El comportamiento de las dos familias queda bien descrito por dos Curvas Patrón, que prácticamente se solapan.

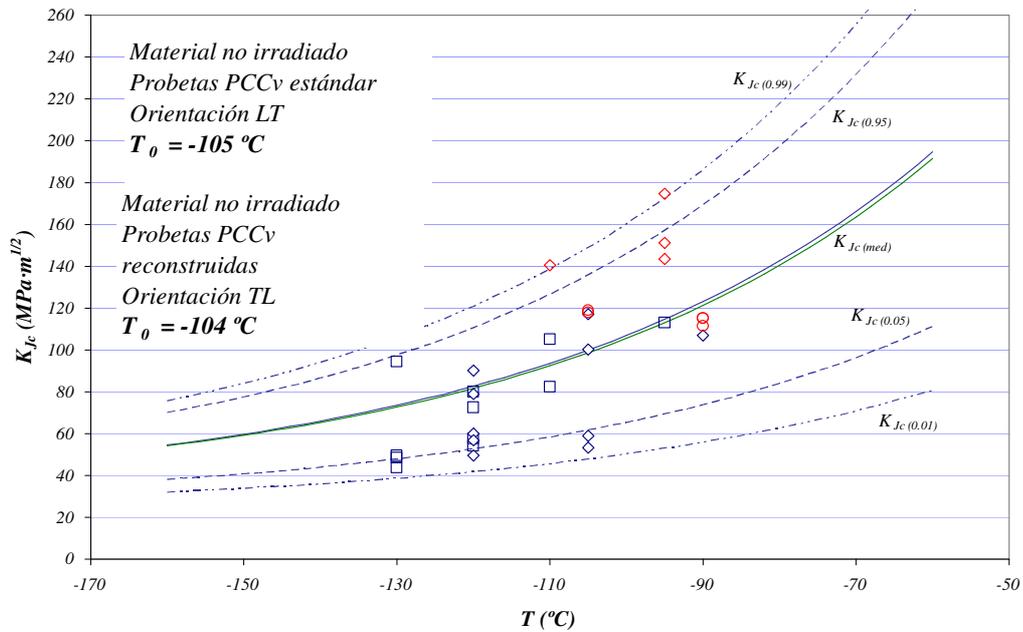


Figura 4.24 Comparación de las orientaciones LT y TL en el material no irradiado

4.4.3 Efecto de la irradiación

Se dispone de tres fuentes independientes para la evaluación del potencial deterioro de las propiedades del material por irradiación: ensayos de impacto Charpy, de tracción y de tenacidad. En primer lugar, se cuenta con la información proveniente del Programa de Vigilancia, la cual incluye resultados de ensayos de impacto Charpy así como algunos ensayos de tracción los cuales quedan complementados por los realizados en esta tesis. Finalmente, se consideran los valores de tenacidad obtenidos en el contexto de este trabajo.

La Figura 3.31 ofrece las curvas de impacto Charpy para el material de interés con orientación LT. El efecto de la irradiación, de acuerdo con esta figura, resulta difícilmente estimable. De hecho, los valores de T_{41J} son, en estado no irradiado,

$T_{41J} = -25^{\circ}C$, para la cápsula 1, $(0.057 \cdot 10^{19} n \cdot cm^{-2})$, $T_{41J} = -29^{\circ}C$ y, para la cápsula 2, $(0.126 \cdot 10^{19} n \cdot cm^{-2})$, $T_{41J} = -54^{\circ}C$. Estos valores pueden justificarse en cierta medida tras una inspección visual de la propia figura. No parece detectarse un desplazamiento neto de la curva (o bien, éste resulta muy reducido) pero sí una modificación de la forma de la misma, en el sentido de que la zona de transición ocupa un rango térmico mucho más elevado.

La Figura 4.7 recoge, por su parte, los resultados disponibles de los ensayos de tracción. Se contemplan tanto los pocos valores procedentes del Programa de Vigilancia como los realizados dentro de esta tesis. Una consecuencia inmediata que se desprende de la figura es la constatación de que el material irradiado manifiesta, desde la perspectiva del ensayo de tracción, una fragilización reducida pero sensible. La comparación entre los ajustes que se han incluido, para el límite elástico y la tensión de rotura, en estado no irradiado e irradiado (hasta la dosis correspondiente a este trabajo, $0.0355 \cdot 10^{19} n \cdot cm^{-2}$, $E > 1 MeV$) permite apreciar un incremento en los valores de ambos parámetros. Se llegan a detectar, para valores elevados de la temperatura, incrementos de hasta 60 MPa en el límite elástico y 30 MPa en la tensión de rotura. Las diferencias se atenúan a medida que la temperatura disminuye.

Finalmente, los resultados de Temperatura de Referencia T_0 proporcionan el estimador más riguroso para evaluar la posible fragilización neutrónica. Al fin y al cabo, se trata del único parámetro de fractura genuino de entre los disponibles, ya que representa los resultados de un ensayo sobre probetas que presentan una fisura afilada. En este sentido, los resultados de la Tabla 4.17 resultan significativos. Para la fluencia manejada en esta tesis se obtienen desplazamientos en T_0 para las orientaciones LT y TL, de valor, $\Delta T_{0,LT} = 9^{\circ}C$, $\Delta T_{0,TL} = 11^{\circ}C$, respectivamente. Teniendo en cuenta los valores de desviación estadística que se manejan, sólo cabe afirmar que, de existir algún efecto de daño neutrónico, éste debe ser necesariamente pequeño. De hecho, si se compara familia por familia dentro de la Tabla 4.16, puede apreciarse que, en alguno de los casos, el valor ΔT_0 resulta insignificante ($2^{\circ}C$ para las probetas reconstruidas LT y $5^{\circ}C$ para las CT también reconstruidas). Los incrementos de T_0 para las diferentes familias

ensayadas de material de interés se representan en la Figura 4.25 (orientación LT) y en la Figura 4.26 (orientación TL), respectivamente.

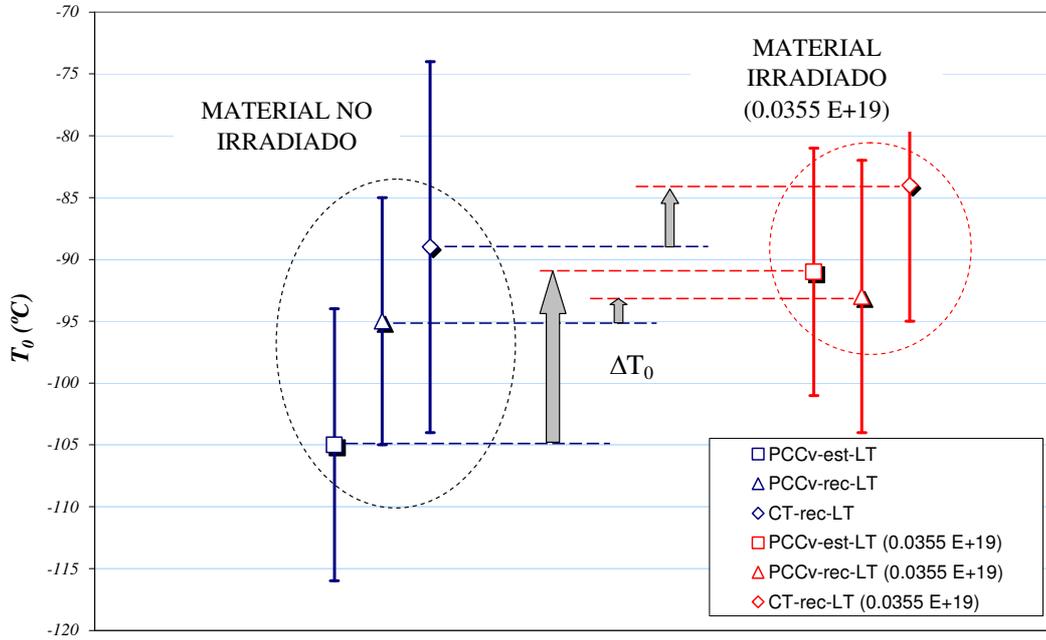


Figura 4.25 Efecto de la irradiación en T_0 para el material de interés, orientación LT, por familias

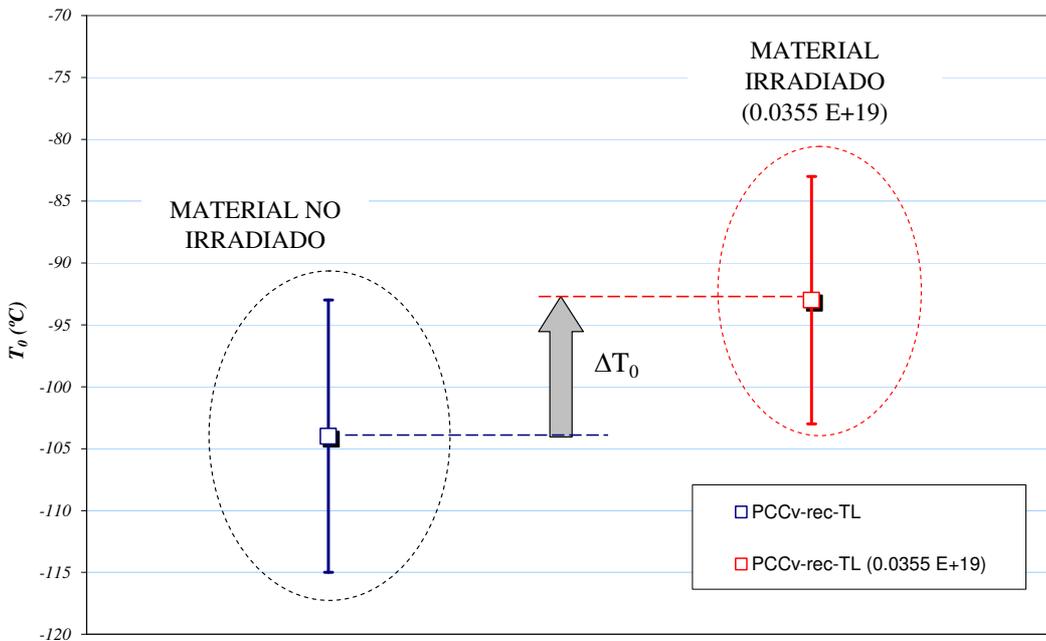


Figura 4.26 Efecto de la irradiación en T_0 para el material de interés, orientación TL

Una manera de contrastar estos resultados experimentales es por medio de las diferentes fórmulas predictivas que han venido desarrollándose en los últimos tiempos, las cuales fueron convenientemente descritas en los Apartados 2.5.4 y 2.5.5. Entre ellas, cabe mencionar la expresión de la Guía Reguladora, Revisión 2 [49], la fórmula propuesta por el EPRI [54] o la que propugna la ASTM [57], la cual deriva de la anterior. Los resultados se resumen en la Tabla 4.22, incluyendo las desviaciones estadísticas (el procedimiento EPRI no las proporciona). En ella se aprecia claramente que el efecto de la fluencia, para las dosis aquí manejadas (cápsula experimental y cápsulas 1 y 2 del Programa de Vigilancia) es siempre muy reducido o prácticamente inexistente.

Tabla 4.22 Diferentes predicciones de fragilización para el material de interés

Fluencia ($10^{19} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}$)	RG 1.99 [56]	EPRI [54]			ASTM E900-02 [58]		
		SMD	CRP	Total	SMD	CRP	Total
0.0355	9 ± 5	2.9	3.2	6	2.5	4.7	7 ± 12
0.057	12 ± 6	3.6	5.1	9	3.1	6.3	9 ± 12
0.126	17 ± 9	5.1	9.1	14	4.7	9.6	14 ± 12

En conclusión, puede afirmarse que, dentro las incertidumbres propias del proceso, el material aquí estudiado ha experimentado una reducida fragilización por irradiación neutrónica. Este hecho viene apoyado por ensayos de distinta naturaleza: impacto Charpy, tracción y tenacidad. Las formulas predictivas empleadas son coherentes con estas afirmaciones.

4.4.4 Efecto de la configuración experimental

La selección de probetas ensayadas en esta tesis permite afrontar la cuestión referente a la posible influencia que el tipo de probeta utilizado supone sobre la Temperatura de Referencia T_0 . Este aspecto fue introducido en el Apartado 2.4.4.4; allí se mencionó la detección sistemática de diferencias próximas a los 10 °C entre probetas PCCv y CT, ofreciendo estas últimas valores más conservadores de tenacidad. Este hecho se repite con insistencia en la bibliografía consultada [10, 25, 39].

Para solventar la duda pueden compararse los valores de T_0 correspondientes al material base en orientación LT obtenidos, respectivamente, con probetas PCCv estándar y con probetas CT reconstruidas. Deben tomarse en consideración dos circunstancias: en primer lugar, se introduce inevitablemente en esta comparación el

posible efecto que la reconstrucción de probetas CT pudiera suponer sobre T_0 ; sin embargo, esta cuestión ya fue discutida en el Apartado 4.4.1 de forma aparentemente satisfactoria. Por otra parte, una comparación que permita obtener conclusiones taxativas exige de unas poblaciones experimentales descomunales, de cientos de ejemplares, más allá del volumen experimental aquí disponible. La Tabla 4.23 resume la comparación mencionada. En ella puede apreciarse que los valores de T_0 obtenidos con probetas CT son sensiblemente más elevados que los calculados a partir de probetas PCCv. El efecto es más acusado en el material no irradiado (16 °C) pero está también presente en el irradiado (7 °C).

Tabla 4.23 Valores de $T_0 \pm 2\sigma$ (°C) para el material base LT según configuración

Fluencia ($10^{19} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}, E > 1\text{MeV}$)	PCCv estándar	CT reconstruida
0	-105 ± 11	-89 ± 15
0.0355	-91 ± 11	-84 ± 11

Atendiendo a lo establecido en el Apartado 2.4.4.4, estos resultados resultan coherentes con lo esperable. Puede concluirse, por lo tanto, que el efecto configuracional también se manifiesta en el caso de los ensayos realizados dentro de esta tesis. Una forma eficaz de comparar valores de T_0 de probetas PCCv y CT es como se presenta en la Figura 4.27. En ella se representan valores de T_0 para el mismo material (no irradiado e irradiado, respectivamente) considerando aquellos resultados (ver Tabla 4.16) para los cuales se dispone tanto de valores experimentales provenientes de probetas CT como de probetas PCCv. La figura permite apreciar, por un lado, el conservadurismo de las CT en comparación con las PCCv y, por el otro, como los puntos se aproximan a la banda inferior, que representa los mencionados 10 °C de diferencia.

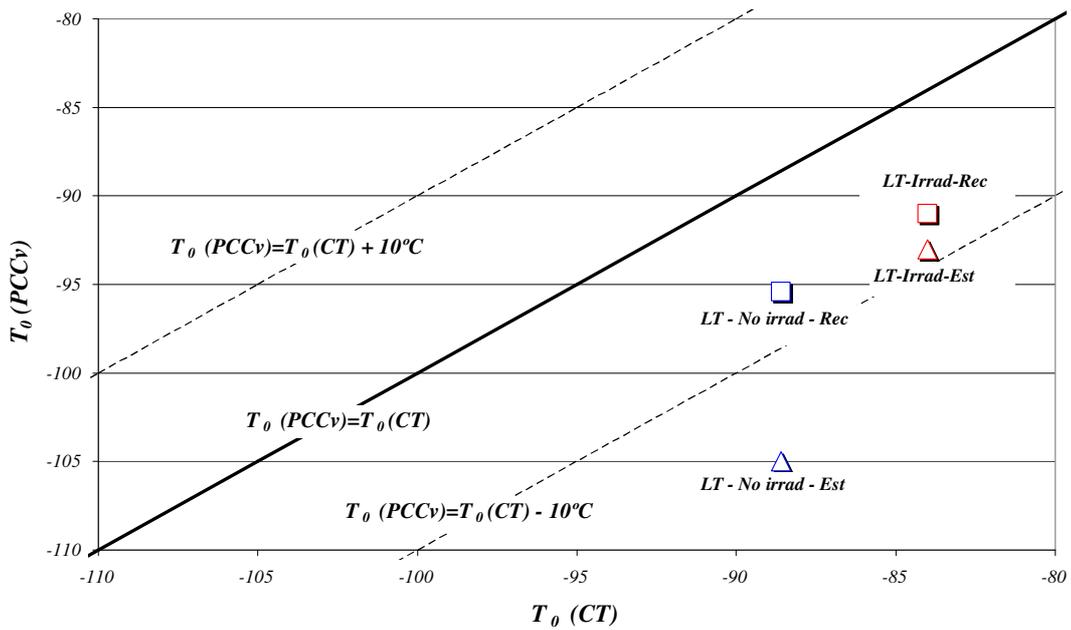


Figura 4.27 Comparación entre los valores de T_0 a partir de probetas PCCv y CT

4.4.5 Efecto de la velocidad de ensayo

El contenido experimental de este trabajo, Tabla 3.7, contempla una serie de ensayos de impacto Charpy instrumentado sobre probeta prefisurada, PCCv. Existe una diferencia fundamental entre los ensayos de impacto sobre probeta entallada y probeta prefisurada. En rigor, el ámbito de la Mecánica de Fractura exige la presencia de una fisura afilada de modo que en sus proximidades se desarrolle la denominada región dominada por la singularidad. Esta situación no queda cubierta en el caso de ensayar probetas simplemente entalladas.

La presencia de ensayos de esta naturaleza se justifica como un intento de evaluar el efecto que la velocidad de ensayo supone sobre el valor de T_0 . Es bien conocido que la tenacidad del material disminuye al incrementar la velocidad de ensayo [3]. Equivalentemente, admitiendo que el modelo de la Curva Patrón sigue siendo válido en régimen dinámico (este punto se discute más adelante), la velocidad de ensayo aumenta el valor de la Temperatura de Referencia, T_0 y, en consecuencia, puede hablarse de un valor de T_0 cuasi-estático, $T_{0,est}$, y de valores dinámicos que dependen de la velocidad

de sollicitación, $T_{0,din}$. Debe aclararse, antes de nada, que este campo de investigación es de naturaleza muy incipiente; no existe, ni siquiera, una normativa oficial en la que se detalle cuál es el procedimiento a seguir para la obtención de $T_{0,din}$. Por esta razón, el carácter de este apartado debe considerarse como altamente especulativo e innovador.

Primeramente, se ha practicado un análisis clásico, comparando la respuesta entre probetas entalladas y prefisuradas en términos de la energía absorbida, de acuerdo con los valores presentes en la Tabla 4.19. La energía absorbida durante un ensayo Charpy tradicional, con probeta entallada, engloba una primera etapa de iniciación de la fisura que viene seguida de un proceso de propagación para finalizar con un desgarro final. Este ensayo no refleja de forma fidedigna el comportamiento de un componente estructural en el que exista una fisura y que reciba una sollicitación súbita, asimilable a un impacto. Sin embargo, si se ensayan probetas prefisuradas, el término energético consumido en los procesos de iniciación propios de la geometría de entalla, desaparece, quedando únicamente las etapas de iniciación desde una fisura, propagación y desgarro final. Es por ello que las curvas de resiliencia obtenidas con probetas prefisuradas ofrecen valores energéticos de rotura más bajos que las curvas sobre probetas entalladas en las regiones de transición y USE.

En la región LSE, por el contrario, las diferencias desaparecen ya que la respuesta frágil asociada a la baja temperatura enmascara este efecto, como se puede apreciar en la Figura 4.28 que muestra, simultáneamente, las curvas originales de impacto Charpy en material de interés, orientación LT, no irradiado (procedente del Programa de Vigilancia) junto con su contrapartida con probetas prefisuradas, de acuerdo con la información de la Tabla 4.19. Para que la comparación tenga sentido, se han representado los valores de energía normalizados a un ligamento resistente de 0.8 cm^2 .

Se han incluido, además, sus correspondientes ajustes tipo tangente hiperbólica. Como puede apreciarse, el desplazamiento de T_{41J} asciende a $43 \text{ }^\circ\text{C}$ y la reducción de USE a 60 J . La superposición de ambos efectos hace que, a temperaturas intermedias las diferencias de energía sean sustanciales (hasta 150 J), debido a los diferentes mecanismos de rotura que se manifiestan: frágiles sobre probeta prefisurada y dúctiles con probeta entallada.

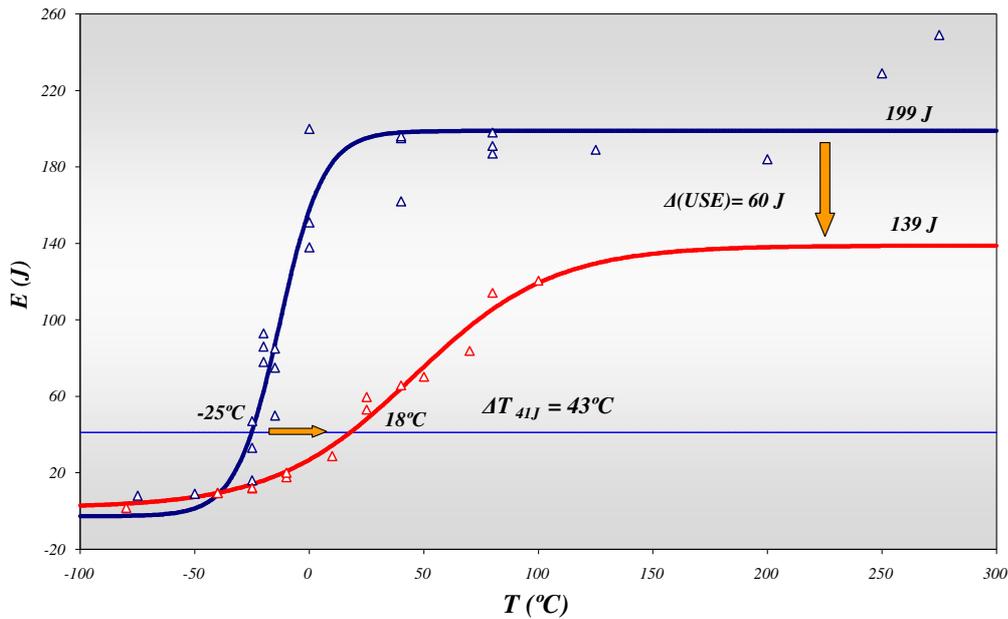


Figura 4.28 Comparación las curvas de impacto Charpy con probetas entalladas (azul) y prefisuradas (rojo)

Una segunda actividad relacionada con el comportamiento del material en régimen dinámico consiste en su caracterización desde el punto de vista de la Mecánica de Fractura. Para ello es preciso hacer uso de la información contenida en las curvas carga–desplazamiento. Como permite constatar la Figura 4.21, el registro detectado por el equipo instrumentado consiste en una curva promedio sobre la que se superpone una señal oscilatoria que se corresponde con la propagación de ondas elásticas en la probeta asociadas al impacto del propio péndulo. Por ello, previo a cualquier trabajo analítico se ha procedido a la eliminación del ruido separando la curva–desplazamiento en sus dos componentes (esta operación se realiza trivialmente por medio de un análisis de Fourier con sencillas aplicaciones informáticas de análisis de datos). Debe hacerse notar que no existe consenso respecto al modo de interpretar la información de una gráfica como la de la Figura 4.21, ni una normativa establecida al respecto. Por este motivo y por tratarse en este caso de un trabajo novedoso, se adoptará el desarrollo más sencillo posible. Por otra parte, la metodología de análisis empleada [107], que se describe en el párrafo siguiente, exige de este paso de suavizado de la curva.

Una vez realizado, el siguiente paso consiste en la localización de la posición sobre la curva del instante en el que se produce la propagación de la fisura. Han sido propuestas

diferentes técnicas para tal fin; en este caso se ha recurrido al llamado Método de la Tasa de Variación de Flexibilidad, propuesto por Kobayashi et al., tal y como se recoge en [107]. En este trabajo se demuestra que la curva que representa la tasa de variación de la flexibilidad en función del desplazamiento del cabezal experimenta un cambio abrupto en el momento de la propagación. El proceso se define en la Figura 4.29 donde, además, se incluye la definición para la tasa de variación de la flexibilidad.

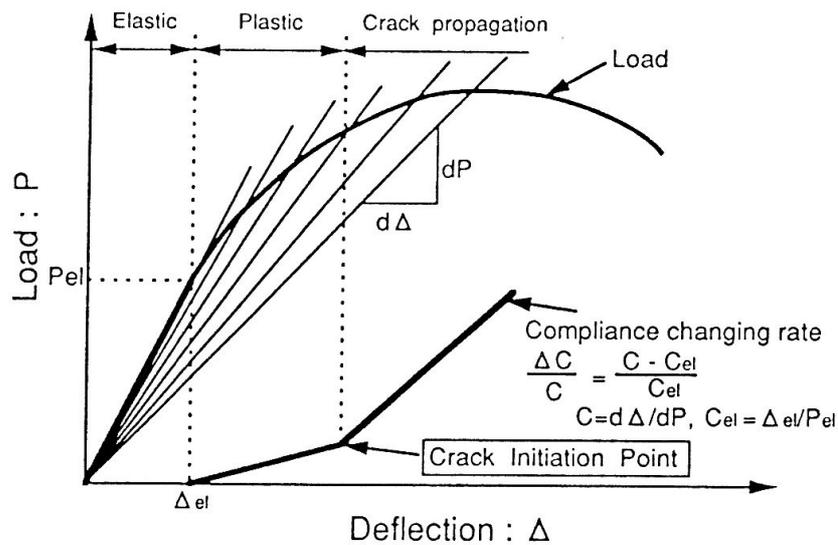


Figura 4.29 Procedimiento de Kobayashi et al. para la localización del punto de iniciación en un ensayo Charpy instrumentado [107]

Una vez que se ha localizado el punto sobre la curva en el que se produce la inestabilidad, puede calcularse el valor del parámetro J en el momento de la propagación, J_c . Este cálculo se ha realizado de acuerdo con el procedimiento analítico descrito en [25], por coherencia con la línea de trabajo seguida en este documento, basada en el concepto de la Curva Patrón. La Figura 4.30 ofrece el resultado en forma de gráfica de los valores de J_c en función de la temperatura de ensayo.

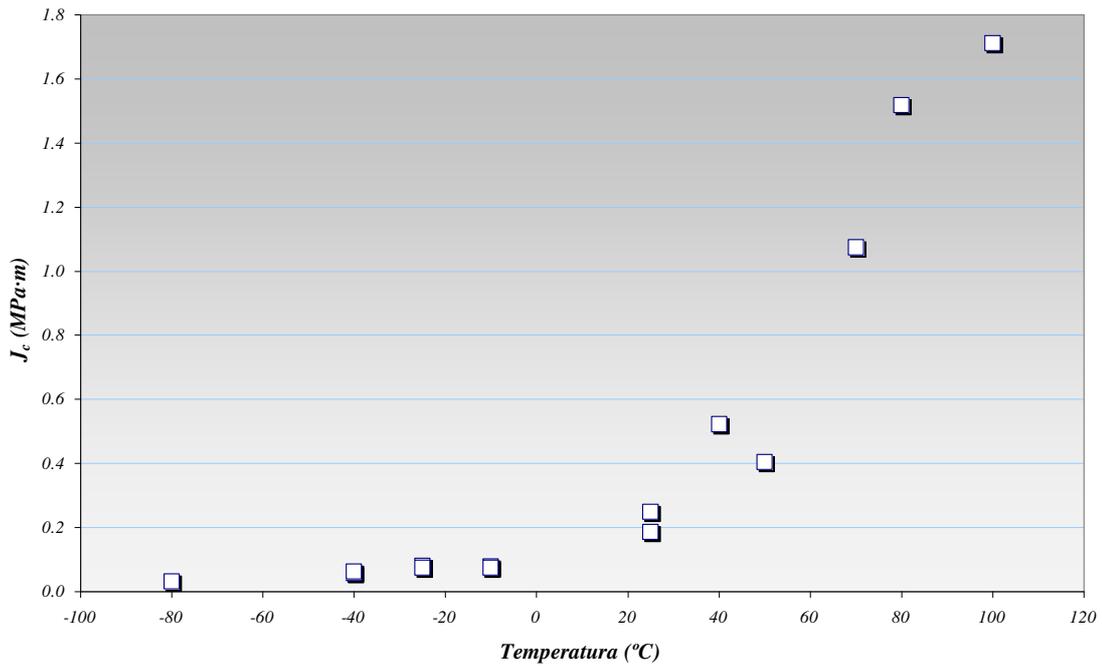


Figura 4.30 Valores de J_c en función de la temperatura de ensayo para los ensayos Charpy instrumentado

Como consecuencia de la velocidad de ensayo, el material estudiado debe ofrecer una respuesta diferente, no sólo desde la perspectiva de la energía absorbida, Figura 4.28, sino también atendiendo a parámetros representativos de la mecánica de fractura. Para cuantificar este efecto, se ha calculado el valor de temperatura de referencia, T_0 , correspondiente a los ensayos dinámicos. Existe bibliografía [108] que justifica que la curva tenacidad frente a temperatura proporcionada por el procedimiento de la Curva Patrón sigue siendo válida en régimen dinámico. Sin embargo, es necesario realizar un proceso previo de selección de ensayos que sean representativos para el cálculo de T_0 . Puesto que el modelo se restringe a aquellos casos en los que la respuesta sea frágil, se han descartado los ensayos que ofrecieran propagación estable en la zona contigua a la prefisura de fatiga, tal y como se estipula en [25]. El análisis de las superficies de fractura ha revelado que para temperaturas de ensayo de 40 °C o superiores siempre aparecía una zona de propagación estable, por lo que dichos resultados no han sido considerados para el cómputo de T_0 .

La Figura 4.31 ofrece una comparación entre el valor de T_0 calculado en régimen dinámico, $T_{0,din}$ y el valor estático, $T_{0,est}$, en este caso el obtenido con probetas PCCv normalizadas de la misma orientación. Como puede apreciarse, el efecto de la velocidad de ensayo se traduce en un desplazamiento de la Curva Patrón de valor $\Delta T_0 = T_{0,din} - T_{0,est} = 80^\circ C$.

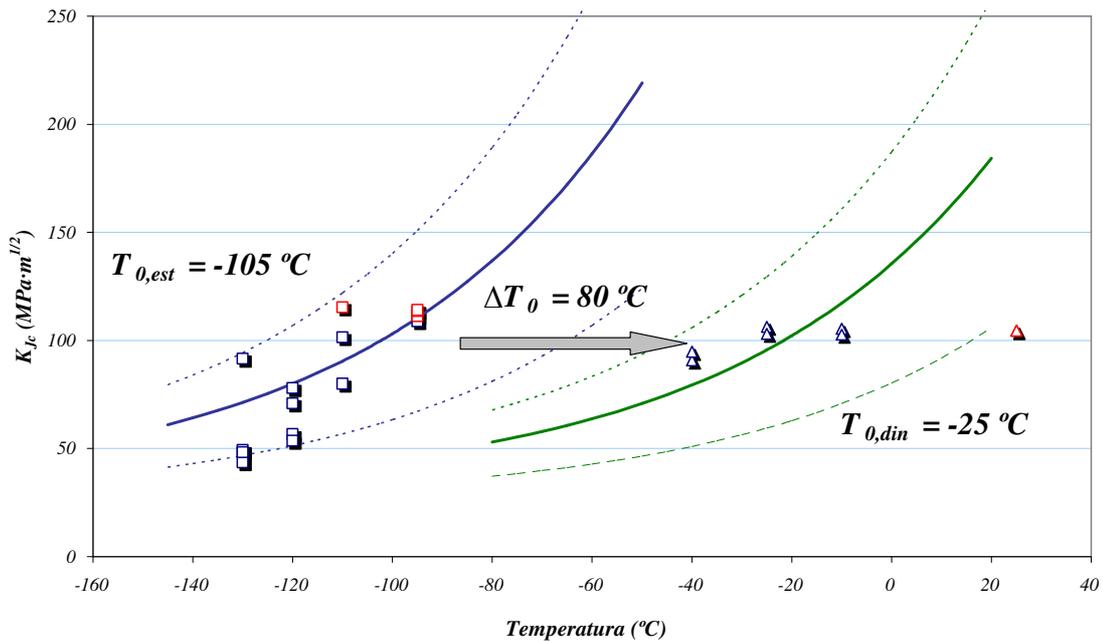


Figura 4.31 Comparación entre los valores estático y dinámico de T_0 para el material de interés no irradiado, orientación LT

El trabajo [108] ofrece una serie de expresiones semi-empíricas, inspiradas en el modelo de Zener-Hollomon, que relaciona el valor del límite elástico con la temperatura y la velocidad de ensayo, que permite estimar el cambio en T_0 asociado con dicha velocidad de ensayo, de acuerdo con la expresión (4.4).

$$\Delta T_0 = \frac{T_{0,est} \cdot \ln\left(\dot{K}_I\right)}{\Gamma - \ln\left(\dot{K}_I\right)} \quad (4.4)$$

El parámetro Γ que se contempla en el modelo responde, a su vez, a la expresión (4.5), que depende de la Temperatura de Transición estática, $T_{0,est}$, y del límite elástico a temperatura ambiente, σ_{Ys} .

$$\Gamma = 9.9 \exp \left[\left(\frac{T_{0,est}}{190} \right)^{1.66} + \left(\frac{\sigma_{Ys}}{722} \right)^{1.09} \right] \quad (4.5)$$

Tomando un valor típico de $dK_I/dt \approx 7 \cdot 10^5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ para los valores registrados en los ensayos de esta tesis, y sustituyendo, se obtiene un resultado de $\Delta T_0 = 92^\circ \text{C}$, con una desviación estándar, según [108] del 19.4%. Queda así justificado el valor de 80°C obtenido experimentalmente. Por otra parte, en el documento [109] se ofrece otra correlación, ésta puramente empírica, expresión (4.6), obtenida para un acero ASTM A 533 B que puede resultar orientativa del orden de magnitud para ΔT_0 , para las velocidades de sollicitación aquí manejadas.

$$T_{0,din} = 1.14 \cdot T_{0,est} + 98.9 \text{ (}^\circ \text{C)} \pm 20 \text{ K} \quad (4.6)$$

Sustituyendo valores se alcanza un valor para $T_{0,din} = -20.8 \pm 20^\circ \text{C}$, en buena concordancia con los valores experimentales alcanzados en este trabajo.

Se concluye, por tanto, que el valor obtenido resulta perfectamente razonable. No debe olvidarse, como ya se ha mencionado, que este apartado tiene un fuerte carácter especulativo, por tratarse de procesos no convencionales. Por ello, resulta obvio que los resultados alcanzados invitan al optimismo.

4.5 Sumario

A tenor de los resultados experimentales obtenidos, puede afirmarse que el objetivo experimental principal de esta tesis ha quedado cubierto. Se ha validado el proceso de reconstrucción para caracterizar la tenacidad de los aceros de vasija de una central nuclear española, trabajando en la zona de transición dúctil-frágil. El proceso se ha llevado a cabo mediante el parámetro Temperatura de Referencia, T_0 , que implica una medida directa de la tenacidad, en contraste con el procedimiento tradicional basado en

los resultados del ensayo de impacto Charpy. Las geometrías validadas son, para el material de interés, la PCCv, con implante de 10 mm y soldadura ASW y la CT con implante de 24 mm por medio de soldadura EBW.

