

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

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

TESIS DOCTORAL

**EVALUACIÓN DE LA INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE
COMPONENTES SOMETIDOS A CONDICIONES DE
BAJO CONFINAMIENTO**

Autor:

SERGIO CICERO GONZÁLEZ

Director:

D. 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, Marzo de 2007

CAPÍTULO 5

ENSAYOS DE VALIDACIÓN DEL MODELO SOBRE ACERO ESTRUCTURAL DE PERFILES LAMINADOS

5.1. INTRODUCCIÓN

Una vez fabricados los perfiles laminados se someten a un proceso de control de calidad en el que, entre otras cosas, se trata de localizar las fisuras existentes en los mismos para su comparación con los tamaños máximos permitidos. Sin embargo, muchos de los defectos generados por el proceso de fabricación son defectos tipo entalla. La falta de conocimiento sobre el efecto real de las entallas obliga a asumir la hipótesis conservadora de que se comportan como fisuras, lo cual ocasiona la retirada de un número importante de perfiles. La aplicación del modelo propuesto en esta Tesis Doctoral debe permitir, en primer lugar, conocer de forma más precisa el efecto de las entallas encontradas en la Integridad Estructural de los perfiles laminados, y en segundo lugar, establecer criterios de rechazo de los mismos más ajustados a la realidad física.

Este capítulo describe la metodología utilizada y los resultados obtenidos tanto en los ensayos de caracterización del material seleccionado como en los ejecutados expresamente para la validación del modelo propuesto en este trabajo mediante su aplicación al análisis de un problema industrial. Los ensayos de validación se han realizado sobre chapas cuyas dimensiones pretenden ser representativas de un buen número de componentes estructurales y el material utilizado ha sido un acero estructural de uso común y muy extendido. Los defectos mecanizados en las mismas son fisuras y entallas con radios de 1.2 mm y 2.0 mm, al cubrir

éstos valores el rango más frecuente de radios de entalla detectados en los perfiles producidos por el fabricante que proporcionó el material y las instalaciones de ensayo. Los ensayos fueron realizados a escala industrial en el *Swinden Technology Centre* de *Corus Research, Development & Technology*, localizado en Rotherham, Reino Unido, perteneciente a *Corus plc*.

5.2. MATERIAL DE ENSAYO

El material utilizado es el acero estructural *S355JR*. La denominación del acero sigue la terminología de la normativa británica [116]. La letra “S” proviene de “*Structural*”, haciendo referencia al hecho de que se trata de un acero estructural, el número “355” se refiere al valor mínimo en MPa de su límite elástico a temperatura ambiente y las letras “JR” indican que el material tiene una energía de impacto Charpy de al menos 27 J a una temperatura de 20 °C (“*Room Temperature*”).

La composición química del acero, tomando los valores medios de la campaña de ensayos realizada por técnicos de *Corus* viene dada en la Tabla 5.1. La Fig. 5.1 muestra la microestructura ferrítico-perlítica del mismo.

Tabla 5.1. *Composición química del acero ensayado.*

	C	Mn	Si	P	S	Nb	V	N	Ni	Cr	Cu	Al	Mo	CEV
%	0.107	1.419	0.237	0.0175	0.0154	0.0302	0.0105	0.00539	0.0217	0.025	0.0337	0.0399	0.0029	0.355

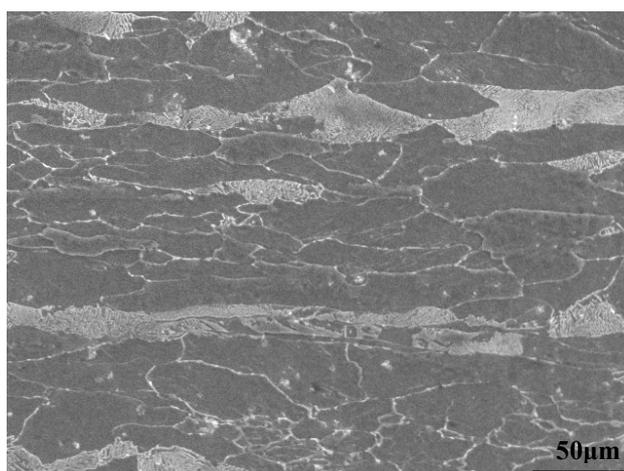


Fig. 5.1. *Microestructura del material S355JR.*

La Fig. 5.2 muestra un ejemplo del proceso por el cual se obtienen probetas a partir de los perfiles laminados. En primer lugar se corta el perfil en tramos de 710 mm de longitud y, posteriormente, se separan las alas del alma. Finalmente, de las alas se obtienen las probetas tanto para los ensayos de caracterización del material (Charpy, tenacidad y tracción) como para los ensayos estructurales de validación del modelo propuesto en este trabajo. En la parte inferior izquierda se observan las probetas para los ensayos estructurales, mientras que en el margen inferior derecho se pueden ver las probetas correspondientes a los ensayos de caracterización del material.

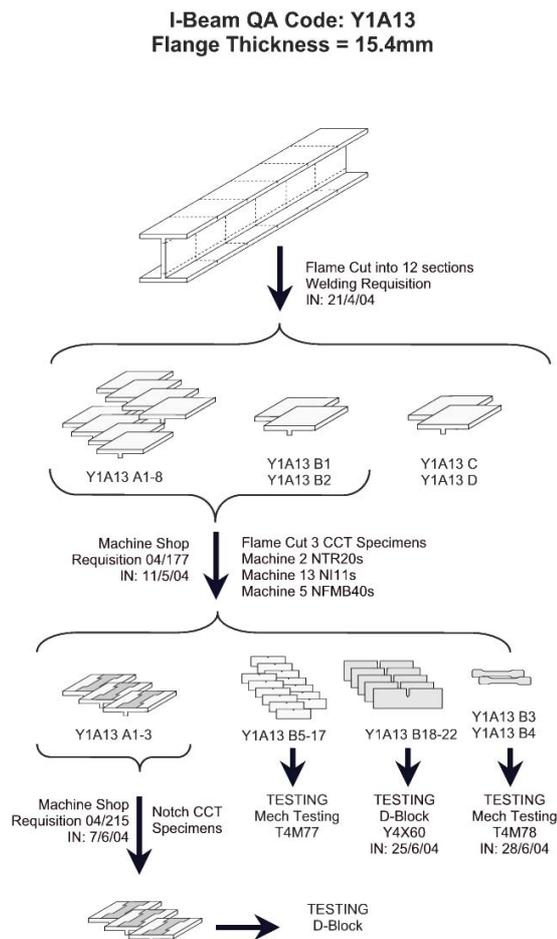


Fig. 5.2. Representación gráfica del proceso por el cual se obtienen las distintas probetas de ensayo a partir de los perfiles laminados.

5.3. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN

Con el objetivo de poder aplicar el modelo propuesto en el Capítulo 4 de este trabajo, se hace necesaria la caracterización del comportamiento mecánico del material de las probetas utilizadas en los ensayos de validación. En concreto, teniendo en cuenta que la evaluación de la integridad

estructural requiere el conocimiento del comportamiento mecánico en tracción del material así como sus propiedades de tenacidad a fractura, se han realizado los siguientes ensayos:

- Ensayos de tracción
- Ensayos Charpy
- Ensayos de tenacidad a fractura
- Ensayos de tenacidad aparente

5.3.1. Ensayos de tracción

Para la obtención de la curva tensión-deformación del material a temperatura ambiente se realizaron ensayos sobre material procedente de perfiles de distintos espesores. A su vez, las probetas se extrajeron de dos localizaciones diferentes: el centro del ala y los extremos del mismo, tal como muestra la Fig. 5.3, y según la dirección longitudinal del laminado. Todas las probetas se obtuvieron a una profundidad de dos milímetros a partir de la superficie del ala y los ensayos se realizaron siguiendo la normativa BS EN 10002-1:2001 [117].

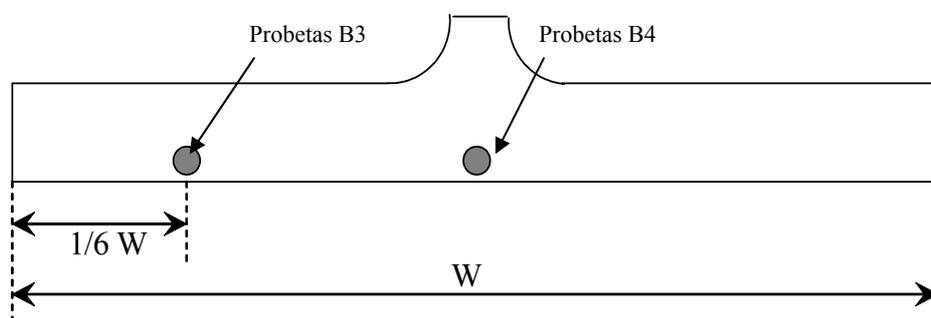


Fig. 5.3. Localización de las probetas utilizadas para la obtención de la curva tensión-deformación del material de las alas de los perfiles.

La Fig. 5.4 muestra los resultados obtenidos con las distintas probetas. Se observan un total de cinco ensayos. Los dos primeros resultados (Y1A13B3 y Y1A13B4) corresponden a las probetas procedentes del alma de menor espesor (15.4 mm), siendo la B3 la correspondiente a la probeta situada próxima al extremo del ala y la B4 la correspondiente al material del centro de la misma. Las siguientes curvas (Y1A19B3 y Y1A19B4) corresponden al espesor intermedio y la quinta y última (X4M4B4) al material del centro de las alas de mayor espesor.

Desde el punto de vista de los objetivos del presente trabajo, no se observan diferencias importantes en los resultados obtenidos y, de cara al análisis a realizar en posteriores capítulos (Diagramas de Fallo, elementos finitos,...), el material se modeliza mediante la curva mostrada en la propia Fig. 5.4, que contiene el escalón de cedencia observado en todos los casos y representa la envolvente inferior, de menor resistencia, de todas las obtenidas.

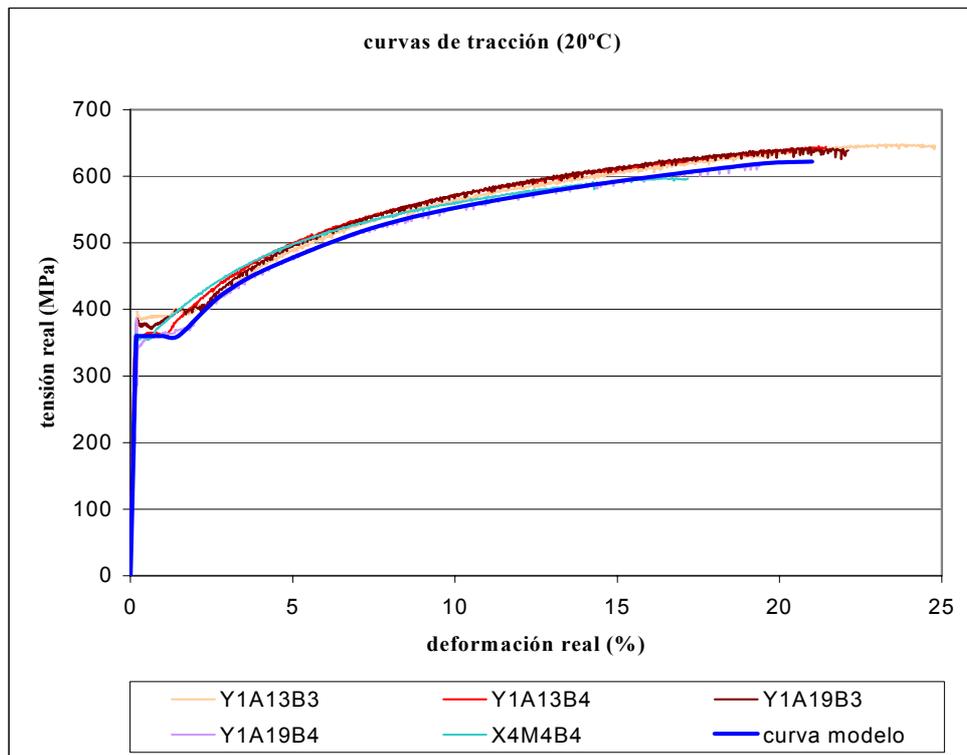


Fig. 5.4. Resultados de los ensayos de tracción a temperatura ambiente y definición de la curva modelo del material a dicha temperatura.

Finalmente se realizaron ensayos de tracción a diferentes temperaturas (-40 °C, -80 °C y -100 °C) que cubren el rango a las cuales se desarrollaron los ensayos estructurales de validación, con el objetivo de tener una caracterización fiel del material a tales temperaturas y, en consecuencia, una simulación por elementos finitos mucho más ajustada a la realidad. Los resultados y las correspondientes curvas de ajuste se muestran en las Fig. 5.5 a 5.7.

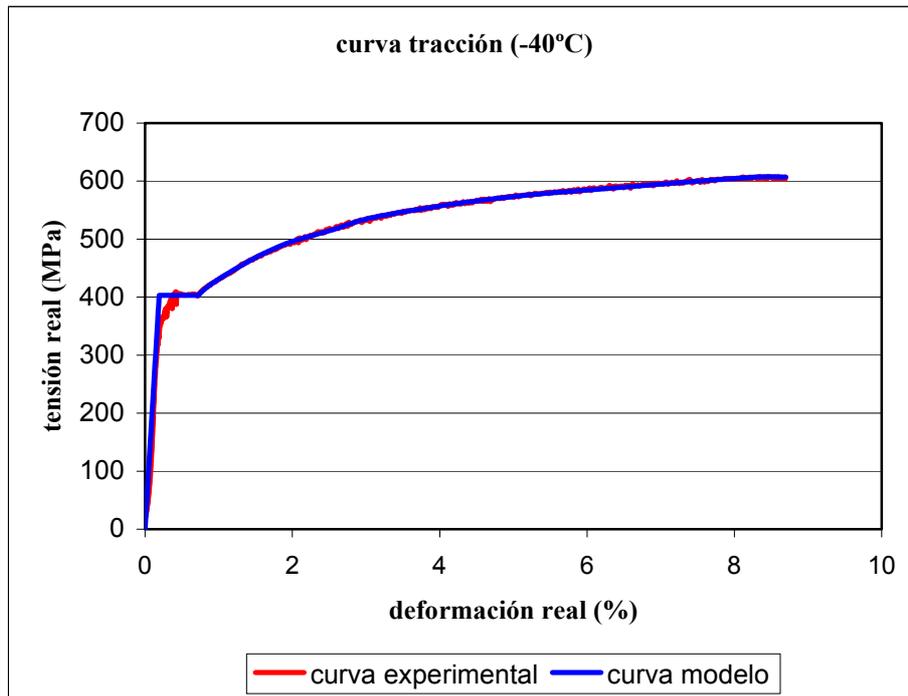


Fig. 5.5. Resultado del ensayo de tracción a -40 °C y definición de la curva modelo del material a dicha temperatura

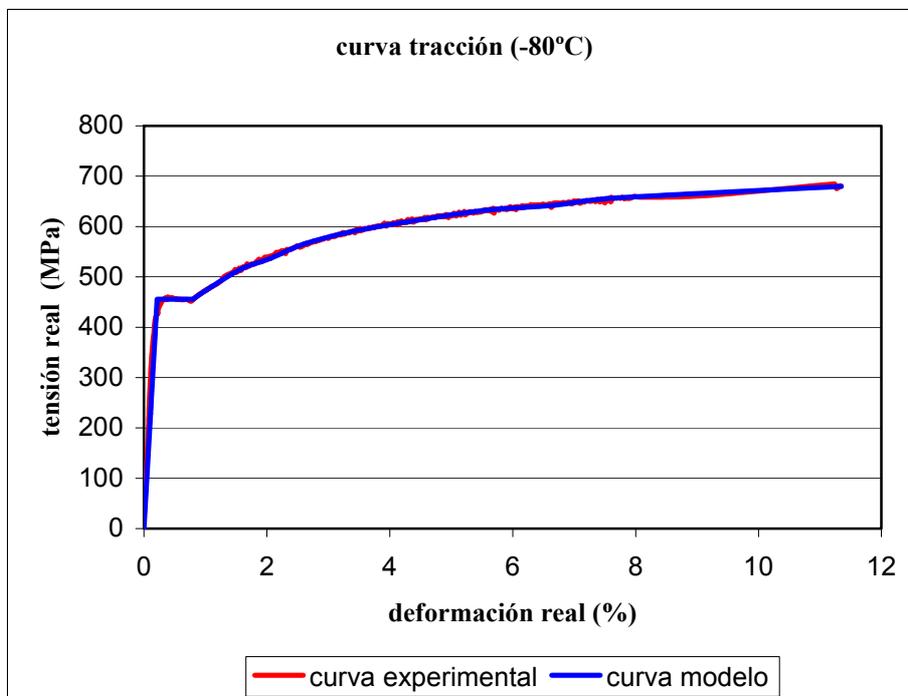


Fig. 5.6. Resultado del ensayo de tracción a -80 °C y definición de la curva modelo del material a dicha temperatura

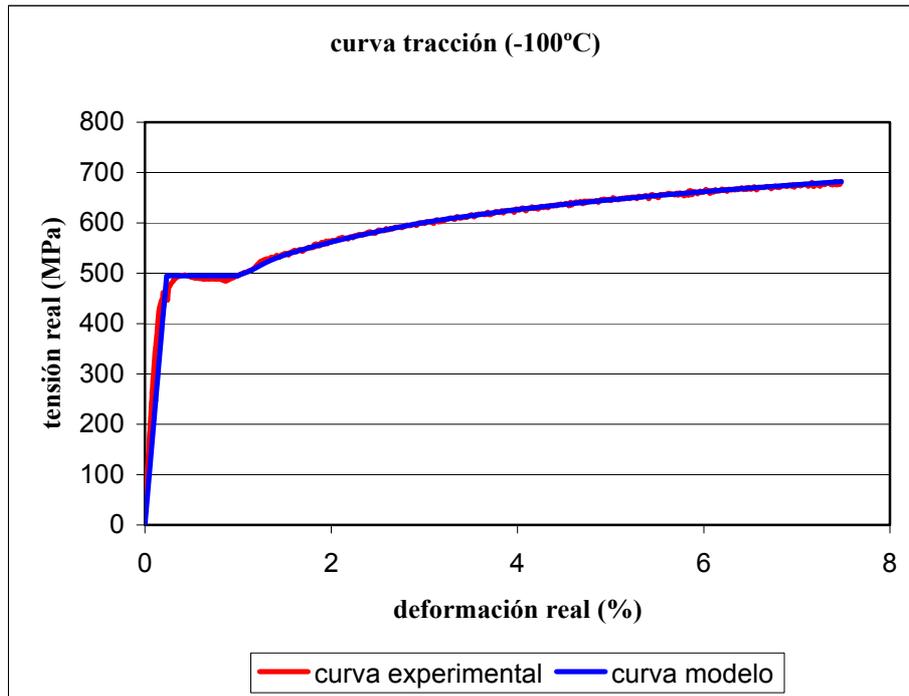


Fig. 5.7. Resultado del ensayo de tracción a -100 °C y definición de la curva modelo del material a dicha temperatura

Se tienen por lo tanto curvas de tracción a 20 °C, -40 °C, -80 °C y -100 °C. Por otra parte, dado que los ensayos estructurales se realizaron posteriormente a -20 °C, -65 °C, -80°C, -85 °C y -100 °C, se hace necesario estimar las correspondientes a -20 °C, -65 °C y -85 °C. Con este objetivo, el valor del módulo de elasticidad para una temperatura T (°C) se estima según la expresión [13,14]:

$$E=207000 - 54 \cdot T \tag{5.1}$$

en donde E viene dado en MPa y T es la temperatura en °C. A su vez, el límite elástico y la longitud del escalón de cedencia a una temperatura T (°C) se pueden estimar según (5.2) y (5.3) respectivamente [13,14]:

$$\sigma_{Y(T)} = \sigma_{Y(RT)} + \frac{100000}{491+1.8T} - 189 \text{ (MPa)} \tag{5.2}$$

$$\Delta\epsilon_{(T)} = 0.0375 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{Y(T)}}{1000}\right) \tag{5.3}$$

en donde $\sigma_{Y(T)}$ es el límite elástico a la temperatura T , $\sigma_{Y(RT)}$ es el límite elástico a temperatura ambiente y $\Delta\epsilon_{(T)}$ es la longitud del escalón de cedencia a la temperatura T .

Finalmente, en la zona de endurecimiento por deformación, para los distintos valores de deformación se interpolan linealmente valores de tensión entre las curvas reales disponibles, tal y como muestra la Fig. 5.8. El último punto de cada curva estimada se obtiene interpolando linealmente tanto el valor de la tensión de rotura como el de la deformación bajo carga máxima. La validez de este procedimiento de estimación de curvas de tracción se muestra en la Fig. 5.9, en la que se compara la curva de tracción experimental a una temperatura de -80°C con la curva estimada para esa misma temperatura siguiendo este procedimiento a partir de las curvas de tracción experimentales correspondientes a las temperaturas de -40°C y -100°C y la formulación recogida en (5.1) a (5.3).

Las curvas resultantes son las que se van a utilizar en los cálculos de integridad estructural y en las simulaciones por elementos finitos. A partir de las mismas se pueden obtener los parámetros resistentes más relevantes en relación a los cálculos analíticos y numéricos, que se resumen en la Tabla 5.2.

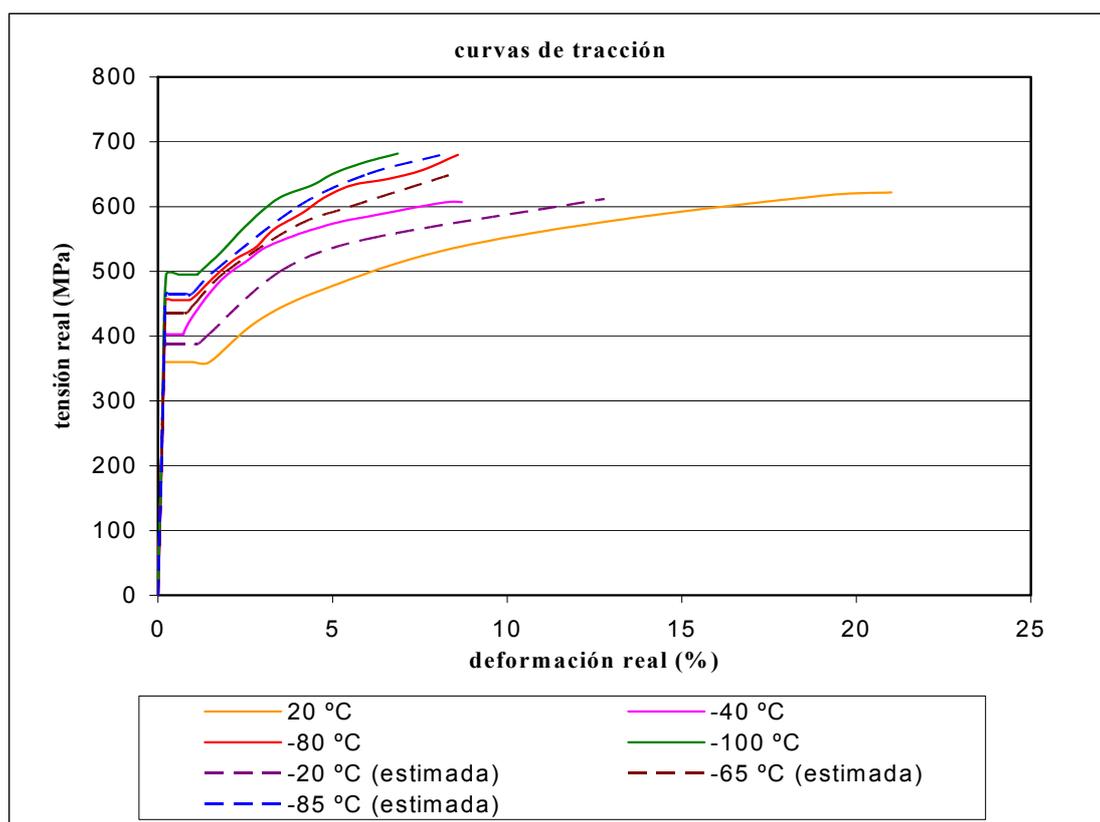


Fig. 5.8. Curvas de tracción a diferentes temperaturas. Las correspondientes a las temperaturas de 20 °C, -40 °C, -80°C y -100 °C son las curvas modelo derivadas de los ensayos de tracción, mientras que las correspondientes a -20 °C, -65 °C y -85°C se han obtenido mediante interpolación lineal a partir de las anteriores.

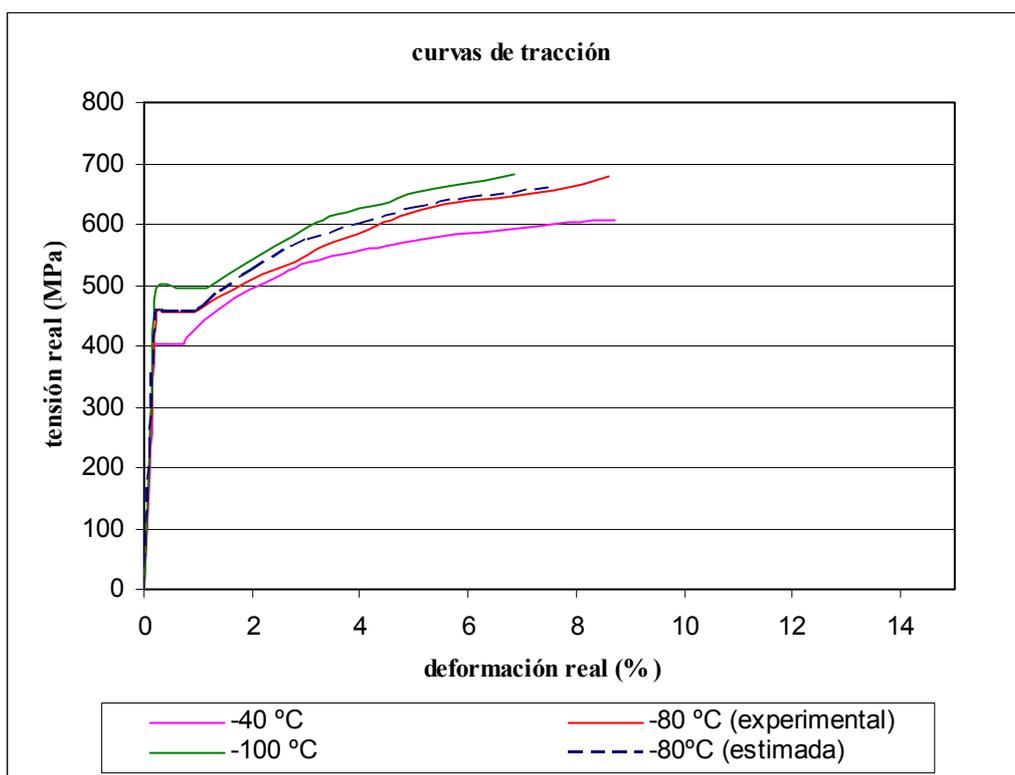


Fig. 5.9. Comparación entre las curvas experimental y estimada para una temperatura de -80°C . Se observa una buena correlación entre ambas curvas.

Tabla 5.2. Parámetros resistentes de mayor relevancia a las distintas temperaturas de interés.

TEMPERATURA ($^{\circ}\text{C}$)	E (MPa)	Límite Elástico (MPa)	Tensión de Rotura (MPa)	Coef. de endurecimiento por deformación, n
+20	207000	360.0	622.0	0.126
-20	208080	390.8	612.0	0.108
-40	209160	403.0	607.0	0.101
-65	210510	438.4	652.6	0.098
-80	211320	455.7	680.0	0.098
-85	211590	466.8	680.5	0.094
-100	212400	495.0	682.0	0.082

5.3.2. Ensayos Charpy

Tal y como se ha podido ver en la Fig. 5.2, se obtuvieron probetas Charpy de material procedente de perfiles de distinto espesor y de las mismas localizaciones. En concreto se extrajeron, para cada espesor de ala, 10 probetas Charpy procedentes del centro de las alas. La Fig. 5.10 muestra un esquema del lugar de extracción. Conforme a la situación de extracción las probetas presentan una orientación L-T.

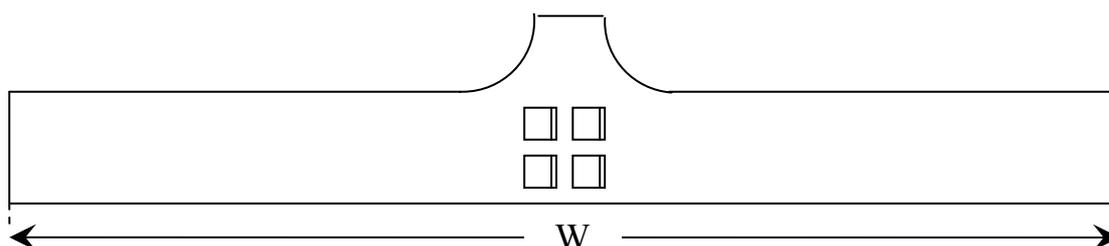


Fig. 5.10. Localización de las probetas Charpy utilizadas para la obtención de la curva de transición Charpy del material de las alas de los perfiles.

En las Fig. 5.11 a 5.13 se muestran los resultados obtenidos para los distintos espesores de alas.

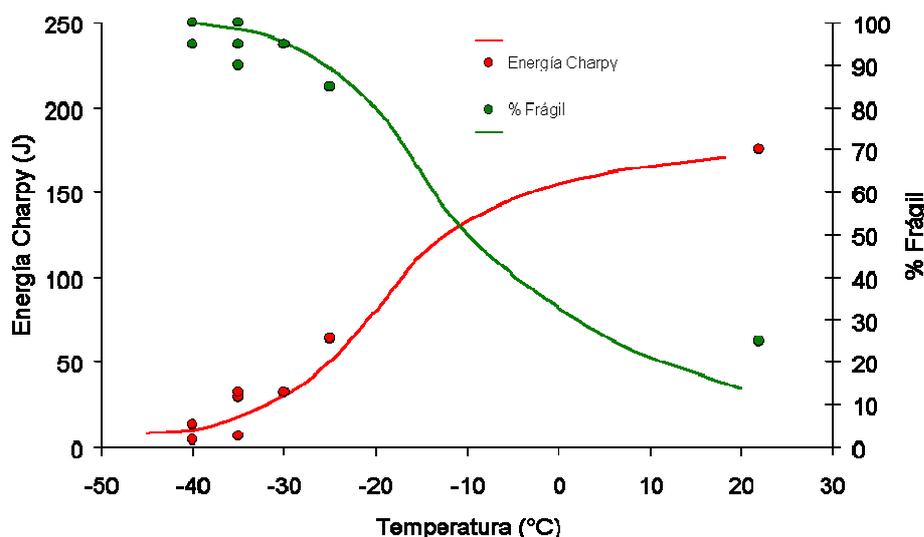


Fig. 5.11. Relación de la temperatura con la energía Charpy asociada, así como con el porcentaje frágil de la superficie de rotura. Ensayos sobre probetas procedentes de alas de 15.4 mm de espesor.

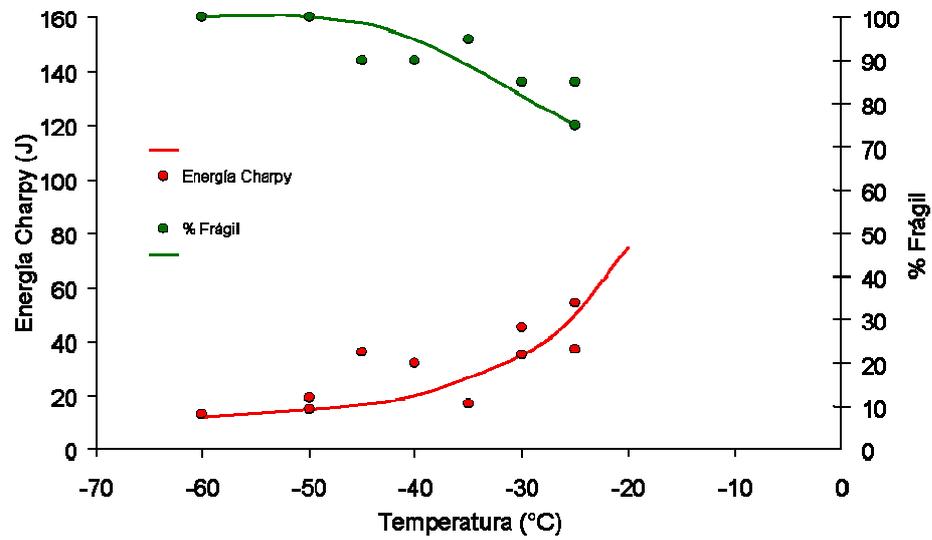


Fig. 5.12. Relación de la temperatura con la energía Charpy asociada, así como con el porcentaje frágil de la superficie de rotura. Ensayos sobre probetas procedentes de alas de 21.3 mm de espesor.

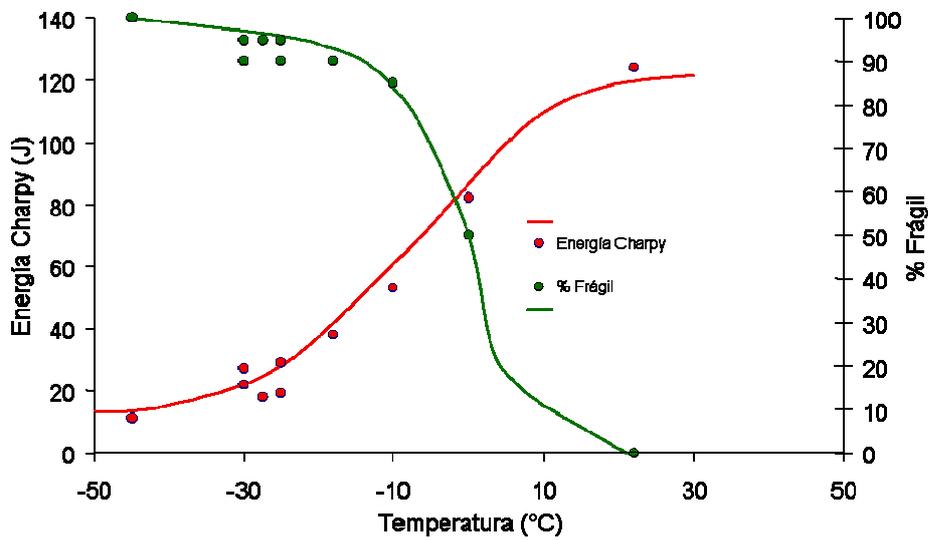


Fig. 5.13. Relación de la temperatura con la energía Charpy asociada, así como con el porcentaje frágil de la superficie de rotura. Ensayos sobre probetas procedentes de alas de 25.4 mm de espesor.

Los resultados obtenidos muestran, como cabía esperar, un comportamiento más frágil en el material procedente de las alas de mayor espesor.

5.3.3. Ensayos de tenacidad a fractura

Con el objeto de determinar la tenacidad a fractura del material para los distintos espesores, se mecanizaron cinco probetas SENB con orientación L-T para cada espesor de ala (más una adicional en el caso de 21.3 mm), todas ellas procedentes de material situado en el centro de la misma tal y como muestra la Fig. 5.14. En todas las probetas se mecanizó una entalla inicial de 6 mm de longitud y, posteriormente, se prefisuraron por fatiga hasta que el defecto alcanzó una longitud final de 10 mm. La sección de las probetas fue de 20x20 mm² en las procedentes de alas de 15.4 y 21.3 mm y de 25x25 mm² en las procedentes de las alas de 25.4 mm.

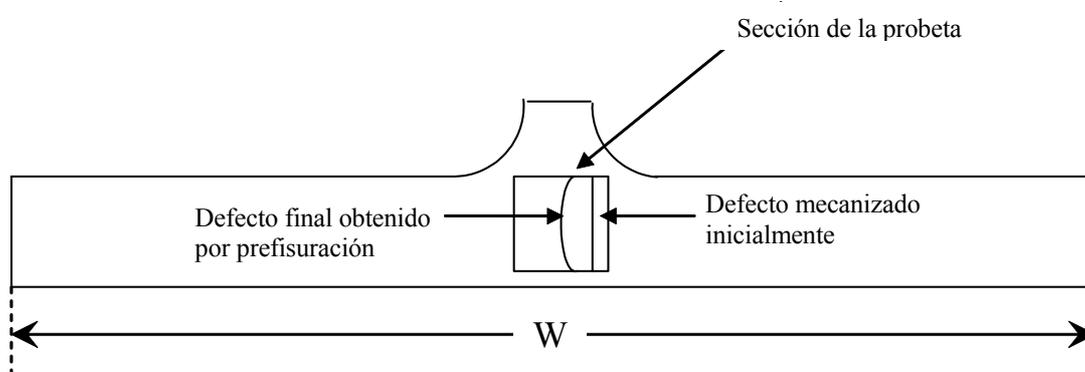


Fig. 5.14. Localización del material utilizado en los ensayos de tenacidad y orientación de las probetas.

Todos los ensayos se realizaron conforme a la normativa *BS7448: Part 1:1991* [118]. Como resultado, se obtuvieron distintos valores de tenacidades (CTOD) a diferentes temperaturas, tal y como se muestra gráficamente en la Fig. 5.15. En dicha figura se ha procedido a realizar un ajuste de los resultados por tangentes hiperbólicas según:

$$CTOD = a + bTh \left(\frac{T - T_{ref}}{c} \right) \quad (5.4)$$

Los valores de los parámetros de ajuste se muestran, para cada caso, en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3. Parámetros del ajuste de la tenacidad según tangentes hiperbólicas.

Espesor (mm)	a	b	c	T _{ref}
15.4	0.32	0.31	25.0	-55.0
21.3	0.32	0.30	9.2	-85.0
25.4	0.43	0.37	12.9	9.0

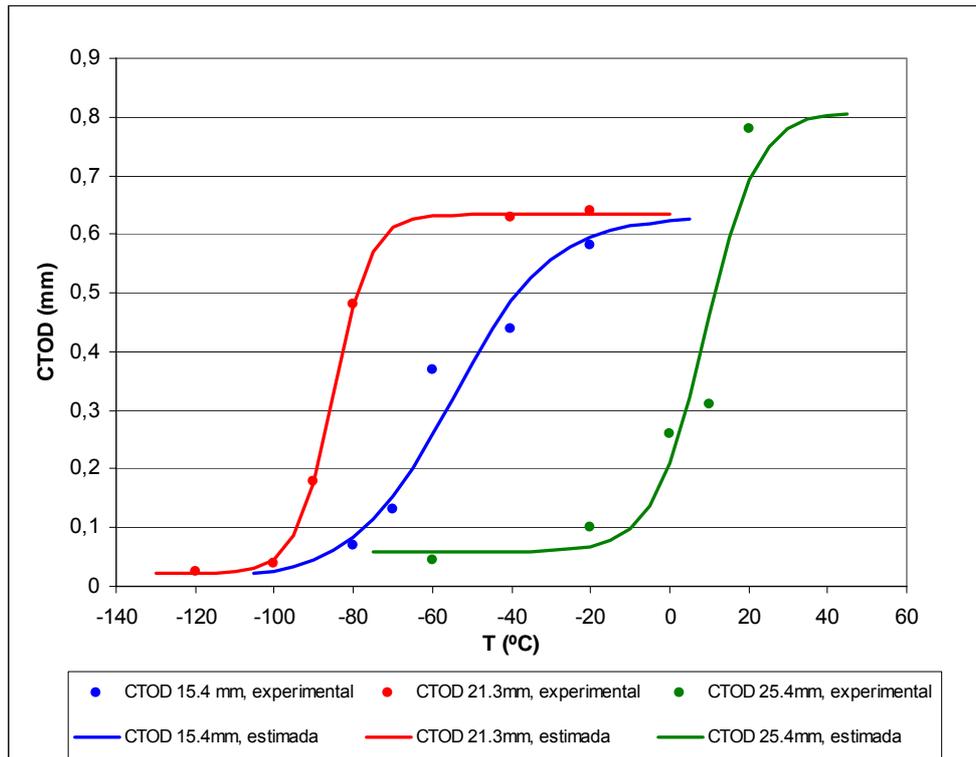


Fig. 5.15. Representación gráfica de los resultados de CTOD obtenidos en los ensayos de tenacidad a fractura y ajuste de los mismos mediante tangentes hiperbólicas.

Desde el punto de vista de la evaluación de la integridad estructural, estas curvas no caracterizarían de forma segura la tenacidad a fractura del material, ya que no recogen la dispersión existente en la Zona de Transición.

Para caracterizar correctamente la resistencia a fractura del material, en primer lugar se ha pasado de los valores de CTOD a valores de J mediante la expresión:

$$J = m\sigma_y CTOD \tag{5.5}$$

en donde m es un parámetro dependiente de la microestructura del material, siendo en general recomendable tomar un valor de 1.5 [13], y σ_y es el límite elástico del material.

A continuación se obtuvo K_{JC} según:

$$K_{JC} = \sqrt{J \cdot E'} \tag{5.6}$$

en donde $E' = E / (1 - \nu^2)$, E es el módulo de elasticidad del material, que en este caso sigue la expresión anteriormente recogida en (5.1) y ν es el módulo de Poisson del material.

Los resultados obtenidos se han utilizado para obtener la Curva Maestra del material para cada espesor de laminación, dado que se trata en realidad de tres comportamientos de material diferentes. Para ello son necesarias al menos 6 medidas de tenacidad válidas para cada espesor, según el criterio recogido en [80]. Para generar las duplas de valores de temperatura-tenacidad en cada espesor, se han tomado valores de las curvas de ajuste de la Fig. 5.15. Se ha comprobado además que los valores de K_{JC} estimados no excedían el valor de K_{JClim} , que sigue la expresión [80]:

$$K_{JClim} = \sqrt{\frac{E \cdot b_0 \cdot \sigma_y}{30 \cdot (1 - \mu^2)}} \tag{5.7}$$

en donde b_0 es el ligamento residual, σ_y es el límite elástico a la temperatura de interés y μ es el módulo de Poisson del material. En consecuencia, no se puede hablar de Curva Maestra pero sí de una curva de caracterización de la tenacidad del material (para cada espesor) en la Zona de Transición [13,80] que va a considerarse suficientemente representativa para los objetivos de esta Tesis. Las Fig. 5.16 a 5.18 recogen las citadas curvas.

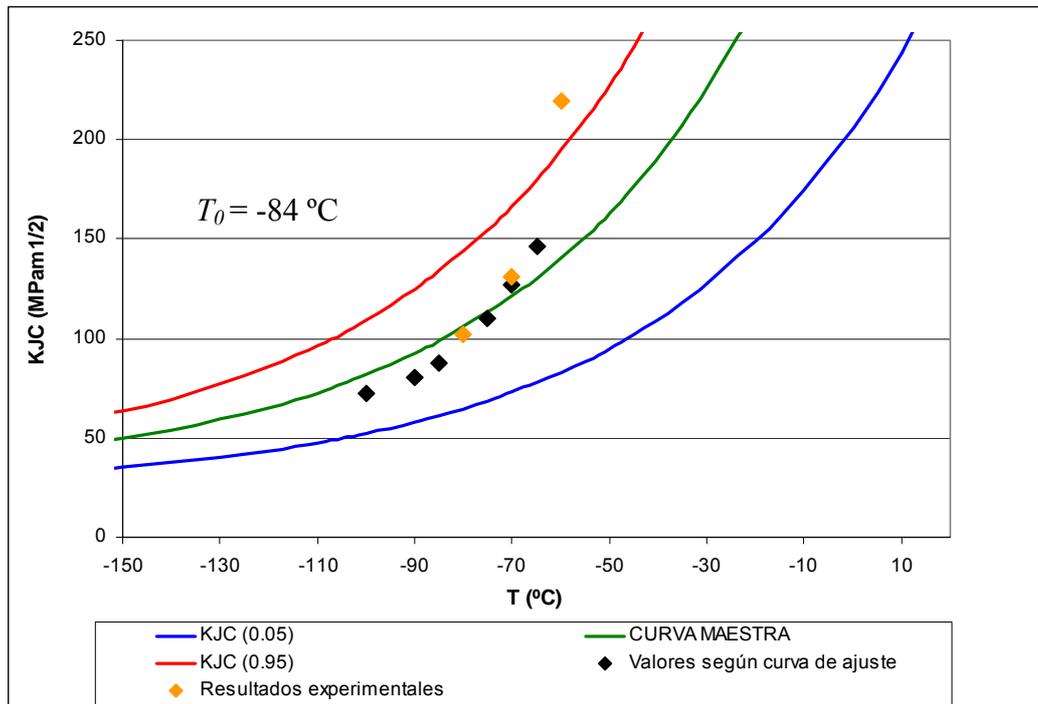


Fig. 5.16. Tenacidad del material en la Zona de Transición para material de alas de 15.4 mm de espesor. Curvas asociadas a probabilidades de fallo del 5%, 50% y 95% obtenidas a partir del ajuste correspondiente de la Fig. 5.15 según la metodología de la Curva Maestra.

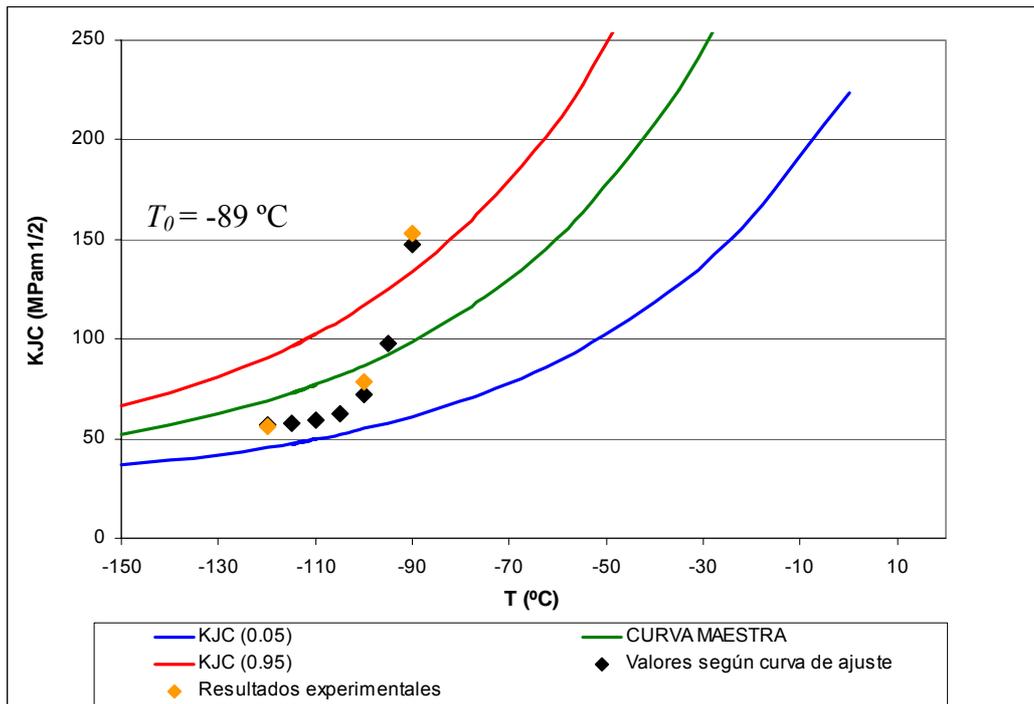


Fig. 5.17. Tenacidad del material en la Zona de Transición para material de alas de 21.3 mm de espesor. Curvas asociadas a probabilidades de fallo del 5%, 50% y 95% obtenidas a partir del ajuste correspondiente de la Fig. 5.15 según la metodología de la Curva Maestra.

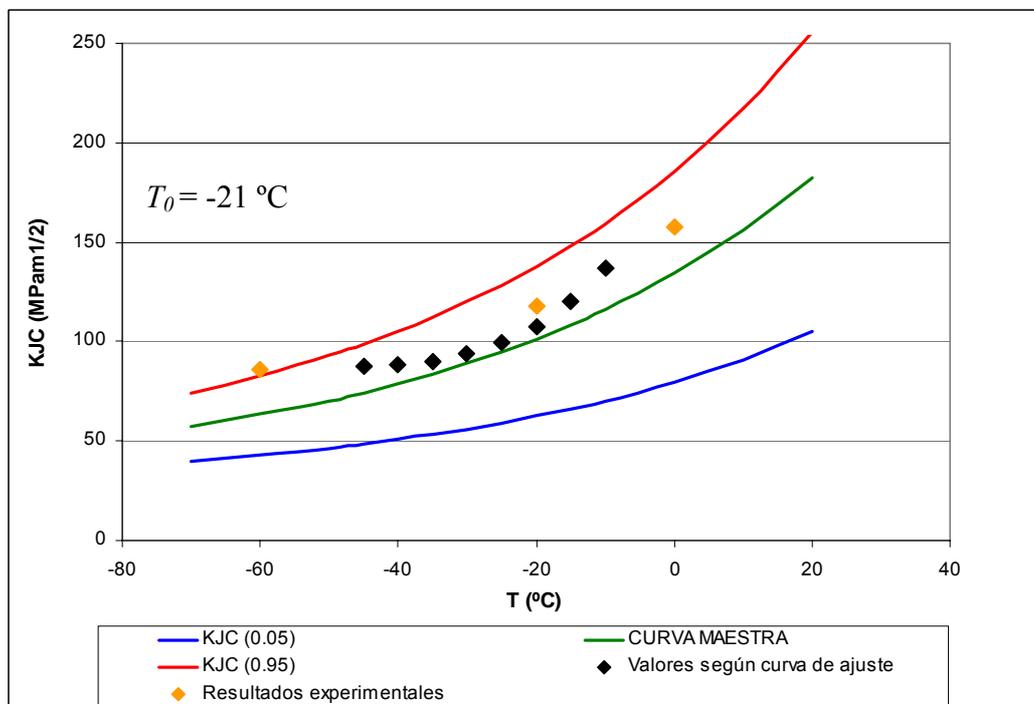


Fig. 5.18. Tenacidad del material en la Zona de Transición para material de alas de 25.4 mm de espesor. Curvas asociadas a probabilidades de fallo del 5%, 50% y 95% obtenidas a partir del ajuste correspondiente de la Fig. 5.15 según la metodología de la Curva Maestra.

Se puede observar como los materiales procedentes de las alas de 15.4 mm y de 21.3 mm se comportan a fractura de forma muy similar (con Temperaturas de Referencia T_0 respectivas de -84 °C y -89°C respectivamente), mientras que el material procedente de las alas de mayor espesor tiene un comportamiento muy frágil (con una T_0 de -21 °C).

5.3.4. Ensayos de tenacidad aparente

Como ha quedado recogido en el Capítulo 4, para establecer una evaluación más realista de componentes entallados se puede establecer la relación existente entre la tenacidad aparente (K_{IN}) y la real (K_{IC}) mediante la caracterización de ambas variables a la temperatura de interés. Para ello, y especialmente en la Zona de Transición, es necesario realizar un número mínimo de ensayos que permita obtener las diferentes bandas de confianza. Una vez obtenidas se divide el valor de K_{IN} asociado a la banda de interés entre el K_{IC} asociado a la misma banda. Con el cociente resultante se aplica la formulación recogida en (4.26) o (4.27).

Una correcta caracterización del problema analizado en este capítulo requeriría una cantidad de probetas muy elevada, ya que se analizan tres espesores a diversas temperaturas y con tres tipos de defectos distintos. Las limitaciones de material suministrado hacen que con respecto a la tenacidad aparente tan solo se haya podido realizar, para cada radio de entalla y siempre en material de espesor intermedio (21.3 mm), un ensayo sobre probeta SENB en cada una de las zonas de comportamiento en función de la temperatura. La tenacidad aparente no queda por tanto suficientemente caracterizada debido a la elevada dispersión que toman los valores de esta variable, especialmente en la Zona de Transición. En definitiva, los valores obtenidos no son estadísticamente representativos y el correspondiente cociente, en este caso K_{IN}/K_{IC} , no es más que una orientación del valor real de la relación entre ambas variables. La Tabla 5.4 muestra los resultados obtenidos junto con los correspondientes a los de K_{IC} obtenidos en probetas fisuradas.

Tabla 5.4. Resultados obtenidos en los ensayos de tenacidad aparente ($CTOD_N$) y su correspondiente valore de K_{IN} . Material correspondiente a perfiles con alas de espesor 21.3 mm.

	TEMPERATURA DE ENSAYO		
	(-80°C)	(-40°C)	(+20°C)
fisura	$K_{IC}= 298.2 \text{ MPam}^{1/2}$	$K_{IC}= 348.3 \text{ MPam}^{1/2}$	-
entalla $\rho = 1.20 \text{ mm}$	$CTOD_N= 0.38 \text{ mm}$	$CTOD_N= 2.08 \text{ mm}$	$CTOD_N= 1.65 \text{ mm}$
	$J_N = 0.26 \text{ Jmm}^{-2}$	$J_N = 1.26 \text{ Jmm}^{-2}$	$J_N = 0.97 \text{ Jmm}^{-2}$
	$K_{IN}=(J_N E)^{1/2}= 234.4 \text{ MPam}^{1/2}$	$K_{IN}=(J_N E)^{1/2}= 513.3 \text{ MPam}^{1/2}$	$K_{IN}=(J_N E)^{1/2}= 448.1 \text{ MPam}^{1/2}$
	$K_{IN}/K_{IC}= 0.78$	$K_{IN}/K_{IC}= 1.47$	-
entalla $\rho = 2.00 \text{ mm}$	$CTOD_N= 3.17 \text{ mm}$	$CTOD_N= 3.25 \text{ mm}$	$CTOD_N= 3.07 \text{ mm}$
	$J_N = 2.17 \text{ Jmm}^{-2}$	$J_N = 1.97 \text{ Jmm}^{-2}$	$J_N = 1.80 \text{ Jmm}^{-2}$
	$K_{IN}=(J_N E)^{1/2}= 677.1 \text{ MPam}^{1/2}$	$K_{IN}=(J_N E)^{1/2}= 641.9 \text{ MPam}^{1/2}$	$K_{IN}=(J_N E)^{1/2}= 610.4 \text{ MPam}^{1/2}$
	$K_{IN}/K_{IC}= 2.27$	$K_{IN}/K_{IC}= 1.84$	-

En la Fig. 5.19 se comparan los valores de la tenacidad a fractura del material mostrados en la Fig. 5.15 (junto con su correspondiente ajuste por Curva Maestra) con los valores de tenacidad aparente obtenidos para los dos radios de entalla, pudiéndose observar el importante aumento de la resistencia a fractura del material ocasionado por el efecto entalla. Este efecto a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ establece, a través de la relación K_{JN}/K_{JC} , el incremento de la tenacidad aparente frente a la real en el “Upper Shelf”. En cambio, a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ se observa una situación contrapuesta. La tenacidad aparente en la entalla de 2.0 mm se incrementa fuertemente respecto a la fisura ($\times 2.27$) al mantenerse en un comportamiento de “Upper Shelf”. Este factor aumenta aún más ($\times 6$) cuando se compara K_{JN} con el correspondiente de la Curva Maestra. Por el contrario, para la entalla de 1.2 mm se establece una importante caída, como si estuviera en la Zona de Transición. Por ello el factor K_{JN}/K_{JC} se reduce fuertemente hasta $1/3$ de los anteriores ($\times 0.78$ y $\times 2$ respectivamente)

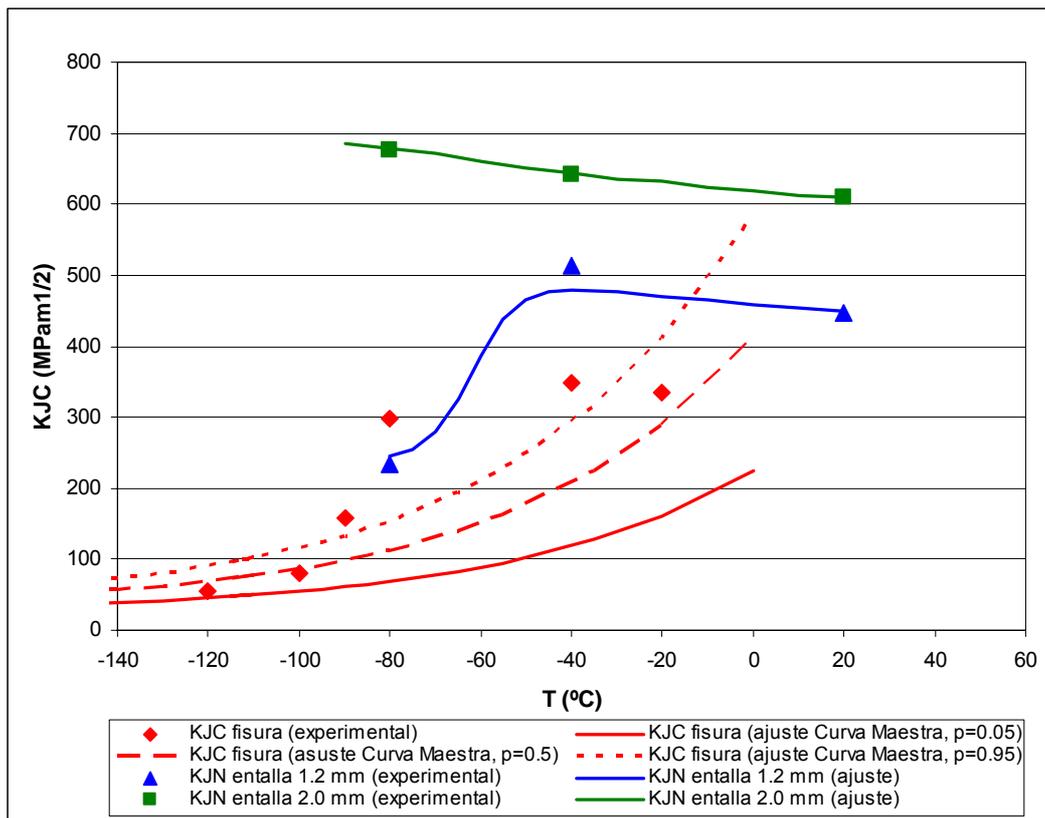


Fig. 5.19. Comparación de los valores de tenacidad a fractura obtenidos de probetas fisuradas con los valores de tenacidad aparente obtenidos a partir de probetas entalladas. p : probabilidad de fallo asociada.

A pesar de que el número de ensayos es demasiado reducido como para poder derivar conclusiones definitivas de los resultados obtenidos, se observa que para radios de entalla elevados (2.0 mm) la tenacidad aparente es aproximadamente constante en el rango de temperaturas ensayado, lo que sugiere que la Zona de Transición se encuentra por debajo de ellas. Además los valores obtenidos son muy elevados, lo que hace que el fallo del material con ese tipo de entallas y para estas temperaturas se vaya a producir fundamentalmente por procesos de colapso plástico. Una explicación a tal fenómeno podría ser que a medida que aumenta el radio de entalla las concentraciones de tensiones en el fondo del defecto se reducen considerablemente, por lo que la fractura va dejando de ser el proceso crítico. Sólo a muy bajas temperaturas la fractura sería el fenómeno dominante por lo que se podría decir que la existencia de radios finitos en el fondo del defecto provoca un desplazamiento de la curva de caracterización de la tenacidad aparente en la Zona de Transición (o en otras palabras, una reducción de la Temperatura de Referencia) de un modo análogo a como lo hace la pérdida de confinamiento debida al tipo de cargas y a la profundidad de la fisura.

En cambio, para la entalla de menor radio (1.20 mm) sí se observa un efecto de la temperatura en el valor de la resistencia a fractura. Es decir, en los ensayos realizados se ha bajado la temperatura lo suficiente como para que la fractura influya en el fallo de la probeta. Los resultados obtenidos sobre probetas con esta entalla muestran una posible Zona de Transición trasladada unos 40 °C hacia temperaturas menores con referencia a la Curva Maestra.

Estas consideraciones vienen validadas por las observaciones de las macrografías de las probetas ensayadas, tal y como muestra la Fig. 5.20.

En las figuras se puede observar como en las probetas con entalla de 2.0 mm se produce una elevada plastificación de la sección de rotura incluso a la temperatura de -80 °C, mientras que en las probetas de radio de entalla 1.20 mm sí se observa una importante fragilidad en la rotura a dicha temperatura.

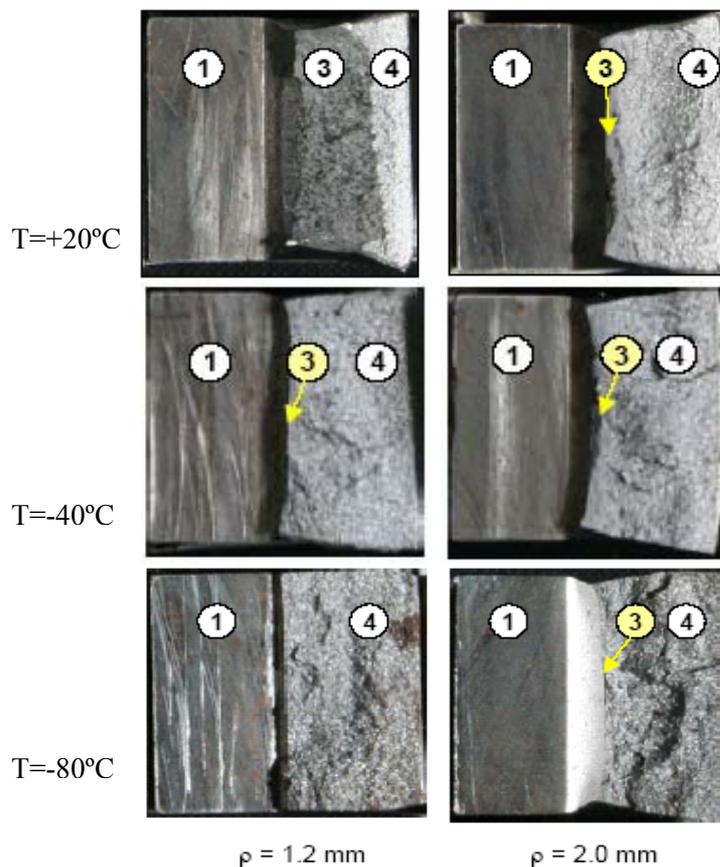


Fig. 5.20. Macrografías de las secciones de rotura de las probetas SENB utilizadas en los ensayos de tenacidad aparente. Las filas se corresponden con las distintas temperaturas de ensayo y las columnas con los diferentes radios de entalla. 1 indica la entalla mecanizada, 3 indica el desgarro dúctil producido (pequeño en todos los casos) y 4 se refiere a la superficie de fractura.

5.4. ENSAYOS ESTRUCTURALES DE VALIDACIÓN

Por ensayos estructurales se van a entender aquellos ensayos realizados sobre probetas procedentes de las alas de los perfiles laminados (Fig. 5.2, y por tanto representativos de la escala industrial) con el objeto de validar el modelo de evaluación de integridad estructural propuesto en esta Tesis.

Tabla 5.5. Matriz de trabajo correspondiente a los ensayos estructurales e identificación de las 14 probetas ensayadas.

ESPESOR DE PROBETA	TIPO DE DEFECTO	TEMPERATURA DE ENSAYO		
			-65 °C	
15.4 mm	FISURA		Y1A13A1	
	ENTALLA $\rho=1.2$ mm		Y1A13A2	
	ENTALLA $\rho=2.0$ mm		Y1A13A3	
		-100 °C	-85 °C	-20 °C
21.3 mm	FISURA	Y1A19A1	Y1A19A2	Y1A19A3
	ENTALLA $\rho=1.2$ mm	Y1A19A4	Y1A19A5	
	ENTALLA $\rho=2.0$ mm	Y1A19A6	Y1A19A7	Y1A19A8
		-80 °C		
25.4 mm	FISURA	X4M4A1		
	ENTALLA $\rho=1.2$ mm	X4M4A2		
	ENTALLA $\rho=2.0$ mm	X4M4A3		

La Tabla 5.5 muestra el esquema de trabajo con respecto a estos ensayos. En ella se observa como se mecanizaron un total de catorce probetas de ensayo. Ocho de ellas, pertenecientes al espesor de chapa intermedio (21.3 mm), se distribuyeron en tres lotes para ser ensayadas a diferentes temperaturas: -100 °C en la Zona de Transición próxima al “*Lower Shelf*”, -85 °C en plena Zona de Transición y -20 °C en el “*Upper Shelf*”. De forma general, en cada lote se ensayaron una probeta fisurada y dos probetas entalladas con radios de entalla de 1.2 mm y 2.0 mm respectivamente. Las otras seis probetas se obtuvieron de los otros dos espesores, ensayándose en un caso en el “*Lower Shelf*” (25.4 mm a -80 °C) y en el otro en la Zona de Transición cercana al “*Upper Shelf*” (-65 °C). Las temperaturas elegidas para los ensayos fueron seleccionadas de acuerdo con los resultados de los ensayos Charpy y de tenacidad recogidos en el apartado 5.3.

El objetivo de trabajo es obtener resultados en situaciones de rotura que van desde la plasticidad a pequeña escala hasta grandes plastificaciones. Los modelos utilizados para realizar la evaluación de componentes con entallas surgen de planteamientos elasticolineales y pueden extenderse a situaciones de cierta plasticidad. Los dos ensayos realizados en el “*Upper Shelf*” quedarían fuera del rango de validez, pero deben servir para obtener cierta orientación sobre las

consecuencias de la aplicación del modelo propuesto en este trabajo en situaciones muy alejadas de la elasticidad lineal.

5.4.1. Probetas de ensayo

En la Fig. 5.21 se muestra un esquema de la geometría de las probetas extraídas de acuerdo a lo establecido en la Fig. 5.2. En la Fig. 5.22 se pueden observar algunas de ellas mecanizadas en su fase primera, sin defectos. En cada una de las probetas se introdujo un defecto semielíptico no pasante de 50 mm de eje mayor, siendo el semieje menor de unos 5 mm en el caso de probetas entalladas y de 4 mm en el caso de las fisuradas. En este caso, al mecanizado de las entallas le siguió el proceso de prefisuración por fatiga.

Las Fig. 5.23 y 5.24 muestran el proceso de prefisuración de las probetas con defectos tipo fisura, realizado según la normativa ASTM E 647 [119] mediante ensayo de flexión en tres puntos. Dicho documento recomienda prefisurar bajo las cargas más bajas posibles, con velocidades de crecimiento inferiores a 10^{-8} m/ciclo y, además, la longitud de la prefisura ha de ser superior a un milímetro y al 10% del espesor de la probeta simultáneamente. La Fig. 5.25 muestra el aspecto exterior de una de las entallas mecanizadas.

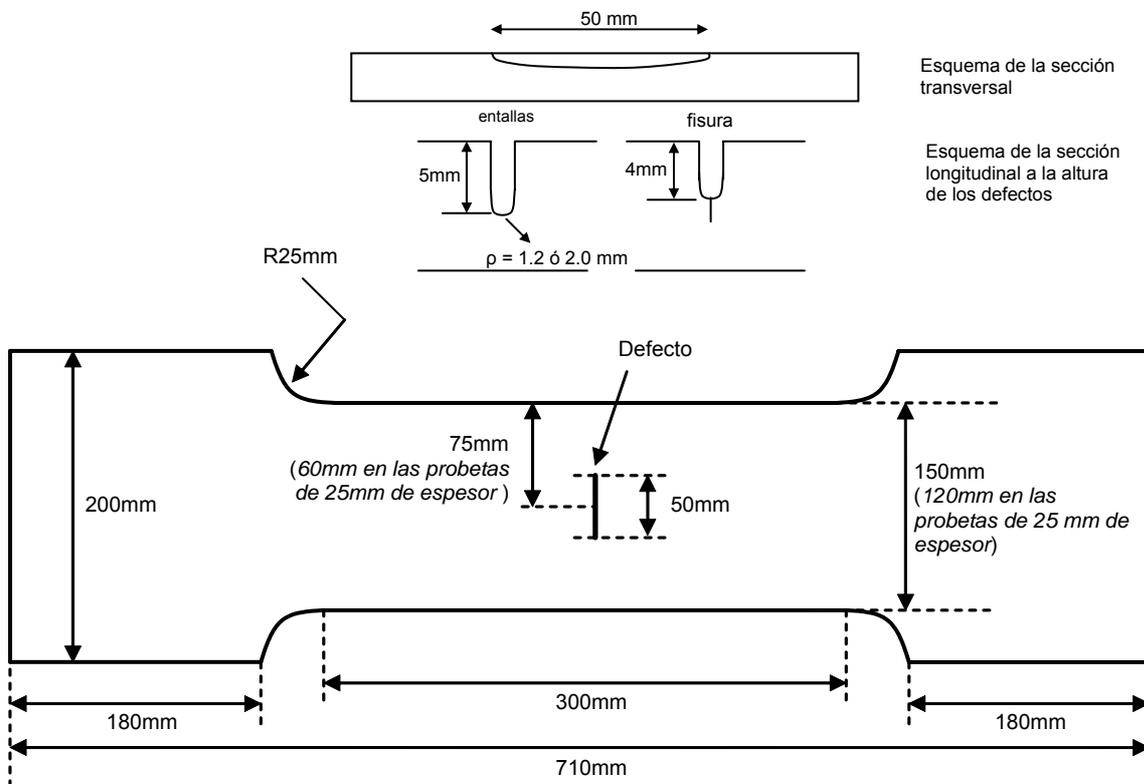


Fig. 5.21. Representación esquemática de la geometría de las probetas utilizadas en los ensayos estructurales



Fig. 5.22. Fotografía de tres de las probetas mecanizadas para la realización de los ensayos estructurales.

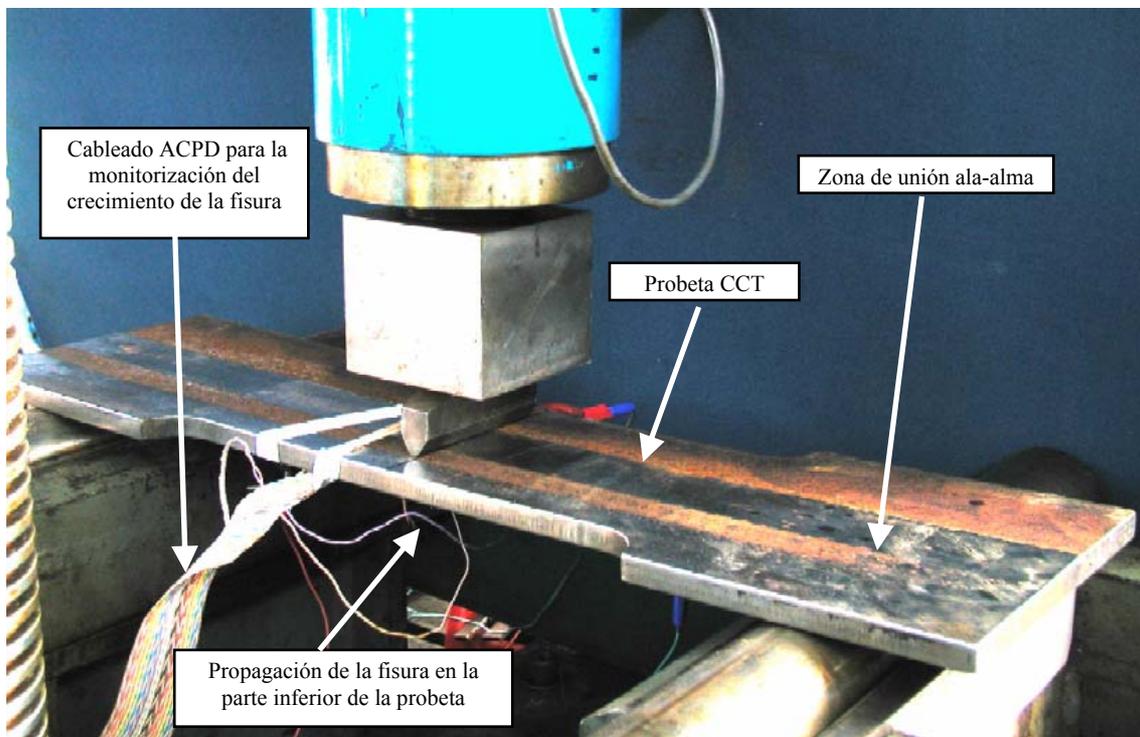


Fig. 5.23. Proceso de prefisuración de las probetas con defectos tipo fisura.

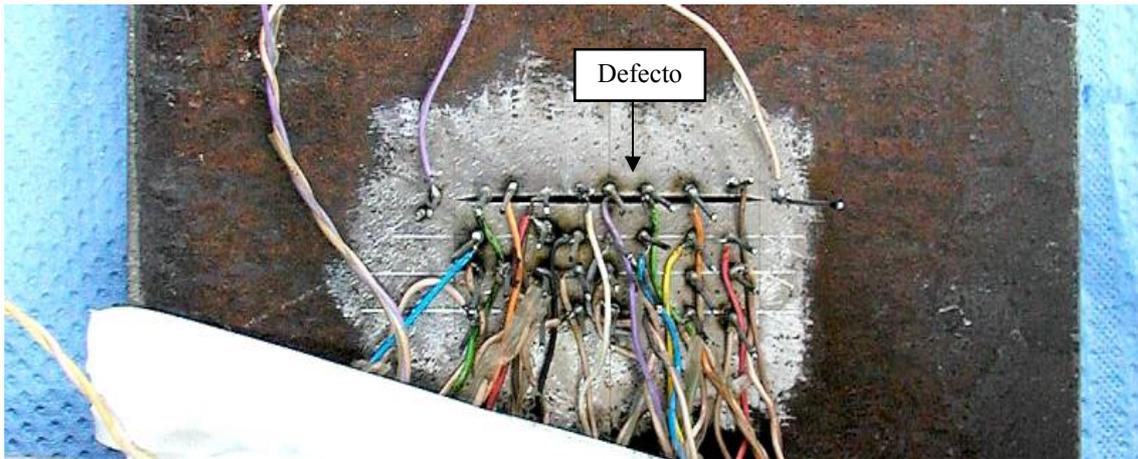


Fig. 5.24. Instrumentación ACPD (Alternating Current Potential Difference) utilizada para monitorizar el crecimiento de fisura durante la prefisuración.

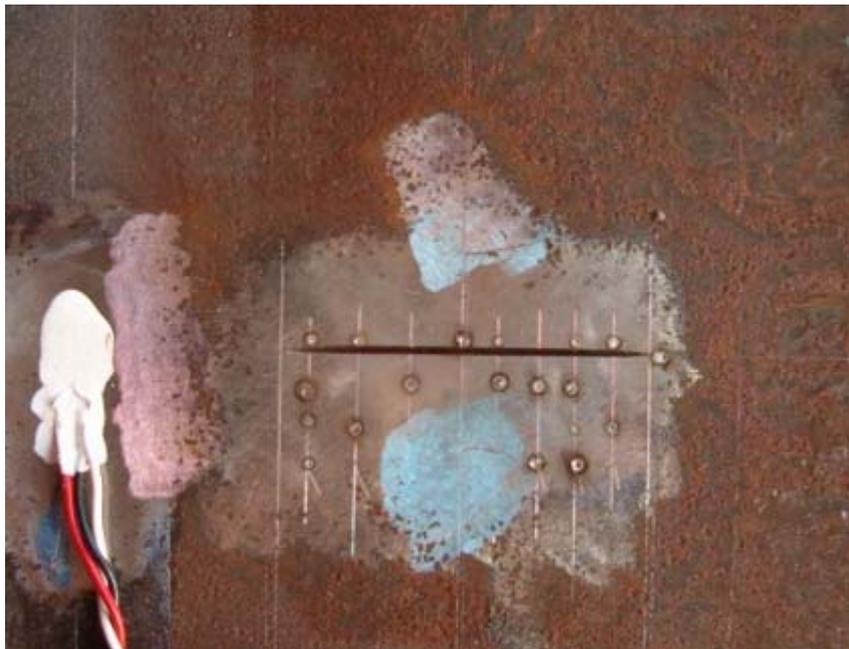


Fig. 5.25. Aspecto exterior de uno de los defectos mecanizados

5.4.2. Instrumentación y montaje del ensayo

Una vez preparados los defectos, entallas o fisuras, se procedió a la preparación de las probetas de cada ensayo. En cada una se incorporó la instrumentación mostrada en la Fig. 5.26, a fin de poder tomar datos de las siguientes magnitudes físicas [120]:

- Temperatura local, utilizando cuatro termopares localizados en la misma posición que las galgas extensométricas.
- Carga aplicada, tomada de la salida de datos de la propia máquina de ensayos.
- Desplazamiento global, mediante el uso de dos LVDT (*“Linear Voltage Displacement Transducers”*) situados en ambas caras de la probeta, en la del defecto y en la opuesta.
- Deformación local, mediante el uso de cuatro galgas extensométricas, dos de ellas (una en cada cara) situadas a 25 mm del defecto en su mismo plano y otras dos midiendo deformaciones locales remotas, con referencia a dicho plano, sobre el eje longitudinal de la probeta, también en ambas caras.
- Abertura producida entre las caras del defecto, mediante el uso de un doble extensómetro situado en el mismo. Cada extensómetro se situó junto al eje de simetría y se asumió como hipótesis, basándose en la rectitud del frente del defecto en la zona central, que ambas medidas se podían utilizar para la obtención del CTOD. Este parámetro se obtuvo haciendo uso de semejanza de triángulos tal y como se muestra en la Fig. 5.27.
- Desplazamiento entre los cabezales de la máquina.

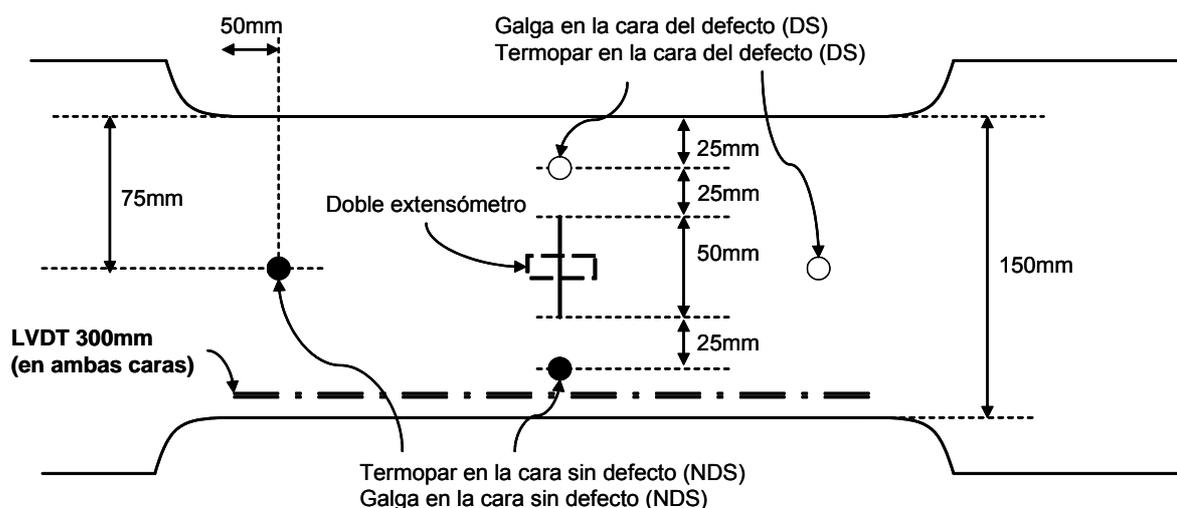


Fig. 5.26. Esquema de la instrumentación utilizada en los ensayos estructurales

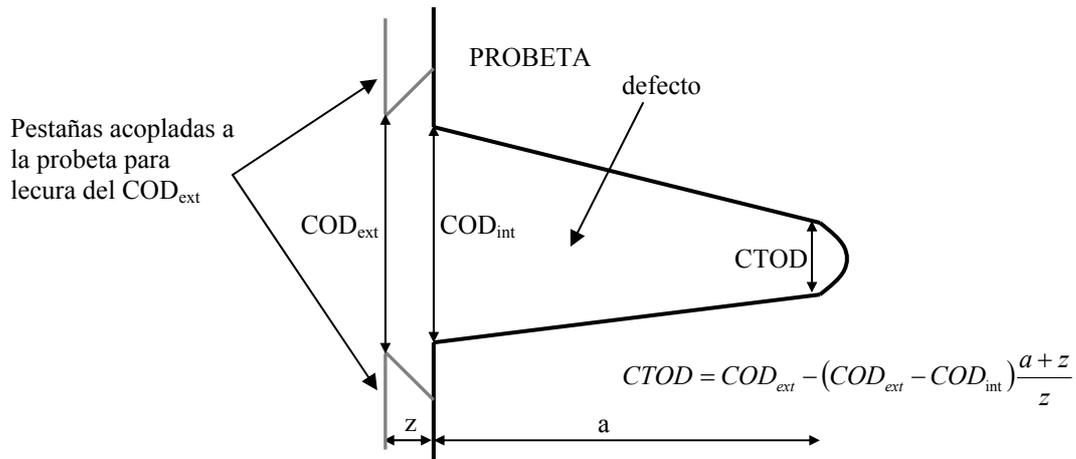


Fig. 5.27. Esquema del procedimiento de obtención del CTOD. $z=17.5mm$

La Fig. 5.28 muestra el montaje de una probeta en la máquina de ensayo.

Antes de la realización de cada ensayo, en ambas caras de la probeta se situaron paneles de enfriamiento con el objetivo de distribuir de forma uniforme el nitrógeno líquido con el que se enfriaron las probetas. Tanto la probeta como los paneles de enfriamiento se rodearon de material aislante con el objetivo de facilitar la obtención de la temperatura de ensayo (Fig. 5.29). Este proceso se realizó siempre con sumo cuidado, extremando las precauciones al objeto de no afectar a la instrumentación. Una vez terminado el montaje se introdujo nitrógeno líquido en cantidad suficiente como para alcanzar la temperatura deseada. Cada probeta se mantuvo a la temperatura de ensayo durante al menos una hora con el objetivo de asegurar la homogeneidad térmica.

En la mayoría de los ensayos se obtuvo una medida adecuada en ambos LVDT. Cuando así fue, se tomó la media de ambos registros como medida de desplazamiento. En los ensayos que solo hubo un registro válido de los dos LVDT se tomó ese único valor como representativo. Finalmente, en dos ensayos (probetas Y1A19A4 y Y1A19A6) no hubo registro alguno de los LVDT. En estos dos casos se estimó inicialmente el registro de los LVDT a partir del desplazamiento entre mordazas de la máquina, ya que en el resto de ensayos se observó que la ratio entre dicho desplazamiento y el registro de los LVDT presentaba una evolución semejante.

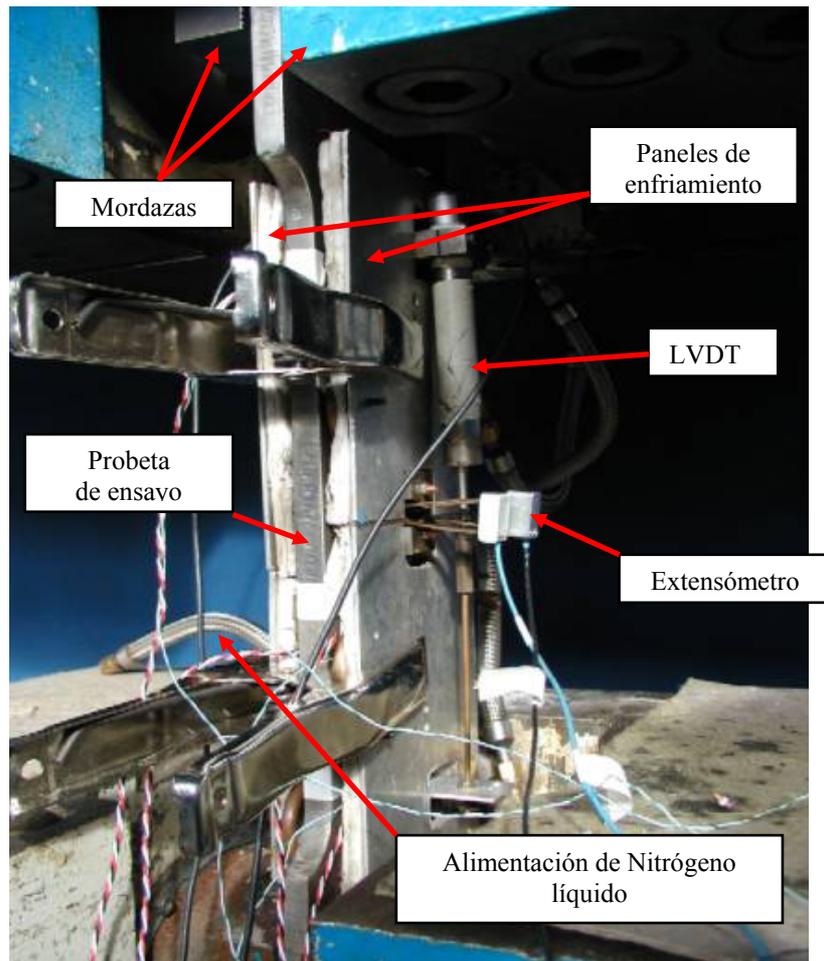


Fig. 5.28. Probeta de ensayo situada en la máquina de tracción



Fig. 5.29. Material aislante rodeando la probeta de ensayo.

5.4.3. Problemas surgidos durante la realización de los ensayos

Durante la realización de los ensayos estructurales se encontraron una serie de incidentes que han tenido consecuencias en algunas de las salidas de resultados [120]. Por lo tanto, se hace necesaria la descripción y el análisis de tales incidencias con el fin de realizar una correcta interpretación de los resultados experimentales.

- Formación de hielo

La mayoría de los ensayos se realizaron bajo condiciones ambientales de elevada humedad que, en combinación con las bajas temperaturas de ensayo, provocaron la formación de gran cantidad de hielo en algunos casos.

Este fenómeno incidió principalmente en las medidas tomadas por los LVDT, algunos de los cuales se congelaron y dieron un registro incorrecto del desplazamiento. En concreto, algunos ensayos no tienen registro de uno de los LVDT durante los primeros instantes de aplicación de la carga. Llegado un momento el movimiento del sistema es suficiente para expulsar el hielo, lo que produce un salto súbito en el registro y un escalón en la lectura del desplazamiento. A partir de ese instante el registro es absolutamente normal. La Fig. 5.30 aclara este fenómeno.

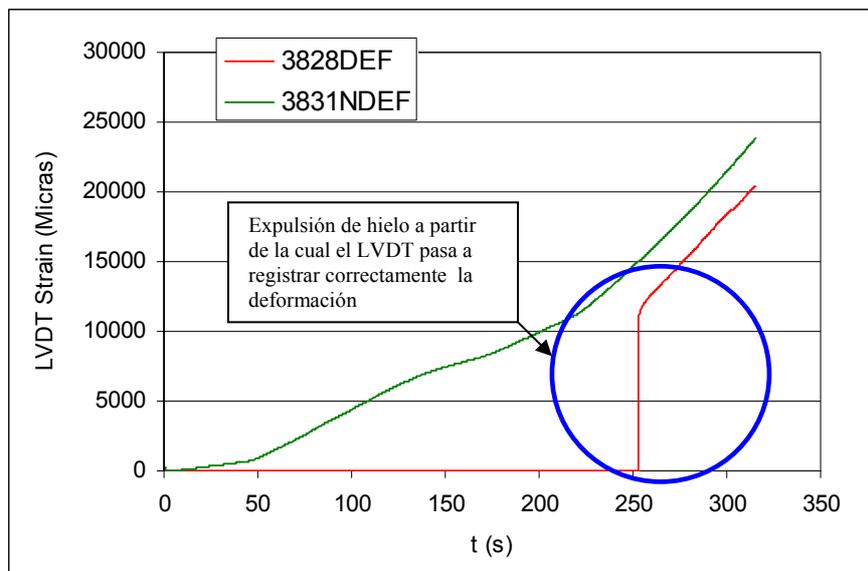


Fig. 5.30. Registro de los dos LVDT en el ensayo de la probeta Y1A13A3, con salto brusco en una de las curvas debido a la formación de hielo en el LVDT correspondiente y su posterior desprendimiento.

- Deslizamiento en las mordazas

En cuatro de los ensayos realizados, la máquina perdió momentáneamente el agarre con la probeta dando lugar a un deslizamiento súbito de la misma con respecto a las mordazas. Este fenómeno va acompañado de una rápida caída de la carga aplicada, tal y como muestra la Fig. 5.31, seguida de una recuperación de la misma hasta un valor ligeramente mayor que el alcanzado antes del deslizamiento.

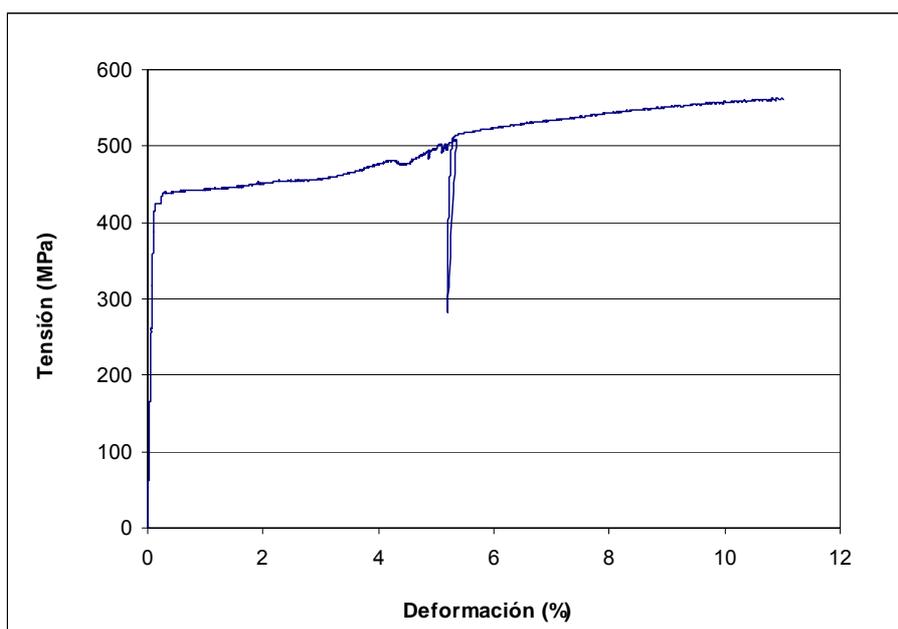


Fig. 5.31. Curva tensión-deformación en el ensayo de la probeta Y1A19A7, con deslizamiento de la probeta con respecto a las mordazas en mitad de la prueba.

La variación del espesor de la probeta a lo largo de su anchura y su propia curvatura ocasionada al separar las alas del perfil laminado del alma del mismo, pueden estar en el origen de esta falta de capacidad de agarre. Este problema se trató de resolver con un rectificado tras separar el alma de las alas, aunque no siempre fue efectivo.

El deslizamiento de la probeta en las mordazas provocó que en tres de los ensayos se perdiese la lectura de los extensómetros debido al salto de los mismos.

- Rotura no localizada en torno al defecto

El fallo de la probeta Y1A19A6 se produjo en su zona de acuerdo curvo próxima a las mordazas y no a partir del defecto mecanizado. La probeta fue ensayada en el “*Lower Shelf*” y tenía una entalla mecanizada con radio de 2 mm. La causa de la rotura se achaca a la existencia de otro defecto provocado durante el mecanizado de la probeta en torno al cual se producía un estado tensional más exigente que el aparecido en el frente de la entalla. La Fig. 5.32 aclara este fenómeno.

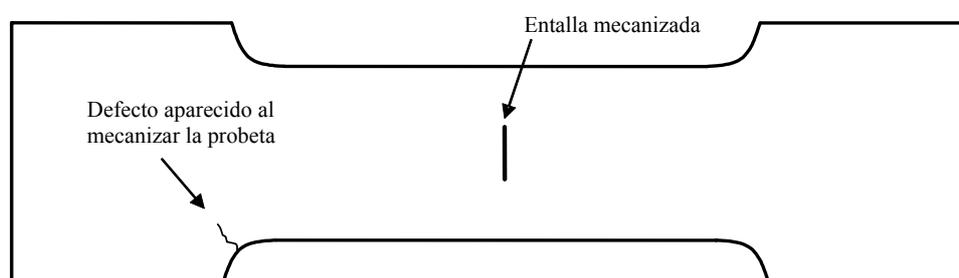


Fig. 5.32. Probeta Y1A19A6 con la entalla mecanizada en su parte central y con el defecto aparecido durante el mecanizado de la probeta que ocasionó, finalmente, la rotura de la misma.

Como consecuencia, y aunque la carga de rotura del ensayo representa un límite inferior de la carga de rotura real asociada a la entalla de 2.0 mm, los resultados de este ensayo no se tuvieron en cuenta en el análisis posterior.

5.4.4. Resultados experimentales

En este apartado se recogen los aspectos más relevantes en relación a los distintos ensayos estructurales. Los resultados obtenidos se van a presentar en cinco grupos diferentes en función de la temperatura de ensayo, tal y como se puede deducir de la Tabla 5.5. Son los siguientes:

- Ensayos a -20 °C en probetas de 21.3 mm de espesor, realizados en condiciones de “*Upper Shelf*” y, por lo tanto, dando lugar a roturas con elevada plasticidad.
- Ensayos a -65 °C en probetas de 15.4 mm de espesor, condiciones asociadas a material en la Zona de Transición pero a temperaturas mayores de la de referencia, T_0 .

- Ensayos a -85 °C en probetas de 21.3 mm de espesor, condiciones asociadas a material en la Zona de Transición a una temperatura muy próxima a T_0 .
- Ensayos a -100 °C en probetas de 21.3 mm de espesor, con el material en la Zona de Transición a temperatura inferior a T_0 .
- Ensayos a -80 °C en probetas de 25.4 mm de espesor, con el material en el “*Lower Shelf*” y por lo tanto dando lugar a roturas frágiles.

Para realizar un adecuado análisis de los resultados se ha establecido una presentación común de lectura de datos y de correlaciones para cada ensayo, distribuidas en dos grandes bloques:

a) Lecturas de registros de señal a lo largo del ensayo:

- *Temperatura-tiempo*: con el objeto de comprobar la estabilidad y adecuación de la temperatura a la establecida en la planificación.
- *Carga aplicada-tiempo*: establecidas bajo condiciones de velocidad de desplazamiento constante (0.05 mm/s).
- *Desplazamientos y deformaciones frente al tiempo*:
 - Generales: ·Lectura del LVDT.
 - Locales: ·Lectura de las dos galgas extensométricas alejadas del defecto.
·Lectura de las dos galgas extensométricas situadas en el plano del defecto.
·Lectura de los dos extensómetros o “*clip gauges*” para determinación del CTOD

b) Correlaciones entre los valores del ensayo

- *Correlaciones tensión-deformación*
 - General: $\sigma - \varepsilon$ (LVDT)
 - Local: $\sigma - \text{CTOD}$
- *Correlaciones entre estados globales y locales de deformación*
 - LVDT-Deformación en galgas
 - LVDT-CTOD

5.4.4.1. Ensayos a -20 °C en probetas de 21.3 mm de espesor

Las probetas ensayadas son la Y1A19A3 y la Y1A19A8. La primera de ellas tiene un defecto tipo fisura y la segunda una entalla de radio 2.0 mm. Las condiciones del material son propias del “*Upper Shelf*”.

a) Probeta fisurada

En la Fig. 5.33, se muestran los datos obtenidos en el ensayo de la probeta Y1A19A3.

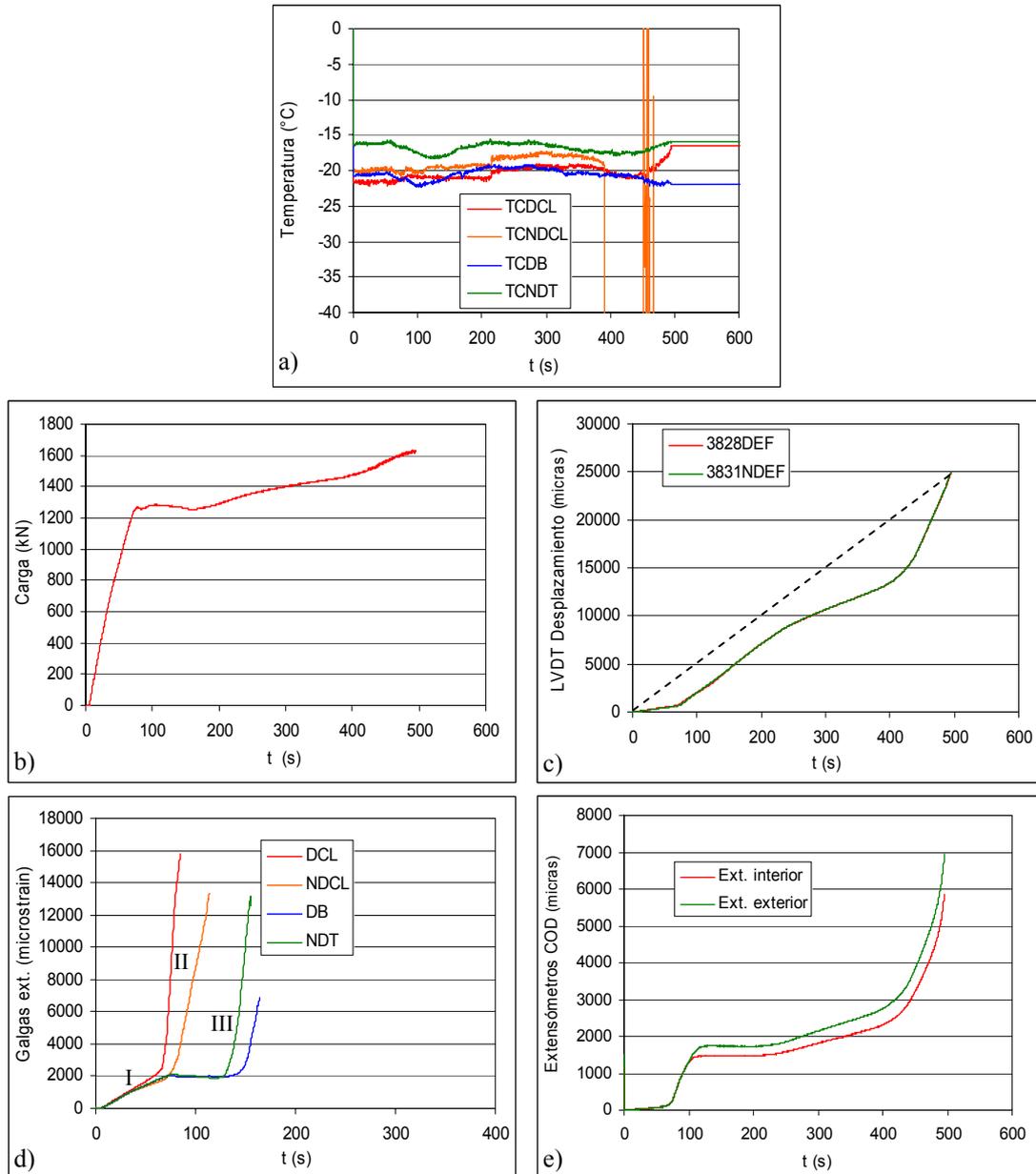


Fig. 5.33. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta fisurada Y1A19A3. a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

La identificación de las curvas (de aplicación en el resto de ensayos realizados) responde al siguiente criterio, de acuerdo con la Fig. 5.26:

- TCDCL: Termopar situado en la cara del defecto y en el plano del mismo (*“Termocouple Defect Centre Line”*).
- TCNDCL : Termopar situado en la cara sin defecto y en el plano del mismo (*“Termocouple Non Defect Centre Line”*).
- TCDB: Termopar situado en la cara del defecto y en la parte inferior de la chapa (*“Termocouple Defect Bottom”*).
- TCNDT: Termopar situado en la cara sin defecto y en la parte superior de la chapa (*“Termocouple Non Defect Top”*).
- DEF: LVDT situado en la cara del defecto.
- NDEF: LVDT situado en la cara sin defecto.
- DCL: galga extensométrica situada en la cara del defecto y en el plano del mismo.
- NDCL: galga situada en la cara sin defecto y en el plano del mismo.
- DB: galga situada en la cara del defecto y en la parte inferior de la probeta.
- NDT: galga situada en la cara sin defecto y en la parte superior de la probeta.

En la Fig. 5.33a se observa que la temperatura está muy próxima a los $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la mayoría de los termopares, salvo el situado en la cara sin defecto y en la parte superior de la chapa (el mas alejado del defecto). La desviación máxima de la temperatura en los termopares situados próximos al defecto (los situados en su plano) no llega a los $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esta variación se considera aceptable, más aún cuando el material está en condiciones de *“Upper Shelf”* y su resistencia a fractura no se ve muy afectada por la temperatura.

En la Fig. 5.33b se distinguen tres zonas de comportamiento del material. En la primera se observa una relación lineal entre la carga aplicada y el tiempo. Dado que el tiempo y el desplazamiento tienen una relación constante (0.05 mm/s), resulta una relación lineal entre carga y desplazamiento. Esta zona se corresponde con el comportamiento elástico-lineal del

material. A continuación se observa una recta aproximadamente horizontal que se corresponde con el escalón de cedencia y finalmente se distingue la zona de endurecimiento por deformación.

En la Fig. 5.33c se observa la evolución de los registros de los LVDT a lo largo del tiempo, observándose distintas variaciones de la pendiente. En esta figura se ha incluido la recta que relaciona la igualdad teórica entre desplazamientos en el cabezal y en los LVDT. Se observa una primera recta de menor pendiente que la teórica correspondiente a la zona de comportamiento elástico del material y en la que parte del movimiento del cabezal se dedica a ajustar todos los elementos de la columna de trabajo. A continuación se observa un tramo con pendiente variable que discurre sensiblemente paralelo al teórico y que corresponde a la zona de comportamiento plástico del material. Finalmente las deformaciones (LVDT) medidas se aceleran con respecto al desplazamiento en la fase previa a la rotura.

Los registros de las galgas extensométricas (Fig. 5.33d) muestran una primera zona en la que los cuatro registros reflejan el comportamiento elástico del material (I). Tras esa zona, las galgas próximas al defecto registran un incremento brusco de las deformaciones asociado a procesos de plastificación local (II), en tanto que las galgas alejadas de la fisura apenas registran incrementos de deformación. Finalmente, estas últimas galgas recogen las deformaciones plásticas que se llegan a producir en zonas alejadas de la fisura (III).

En la Fig. 5.33e se observan las lecturas de los extensómetros utilizadas para la determinación del CTOD. Se aprecia, como es lógico, un mayor registro del extensómetro exterior y una buena proporcionalidad entre ambos registros. En primer lugar se advierte un tramo recto de pequeña pendiente que se corresponde con el comportamiento elástico del material. A continuación comienza a plastificar el fondo de la fisura y crece muy rápidamente el registro de ambos extensómetros. Cuando el fondo de la fisura está muy plastificado la probeta transmite la nueva sollicitación que recibe a zonas menos dañadas, por lo que el registro apenas crece en el tiempo. En la última etapa vuelve a aumentar el registro de los extensómetros tras el inicio del endurecimiento, produciéndose finalmente un crecimiento brusco que precede a la rotura.

A continuación, en la Fig. 5.34, se muestran las correlaciones obtenidas a partir de los datos recogidos en la Fig. 5.33. En este caso, al igual que en el resto de ensayos, la tensión representada se obtiene de dividir la carga aplicada entre la sección neta de la probeta sin defectos.

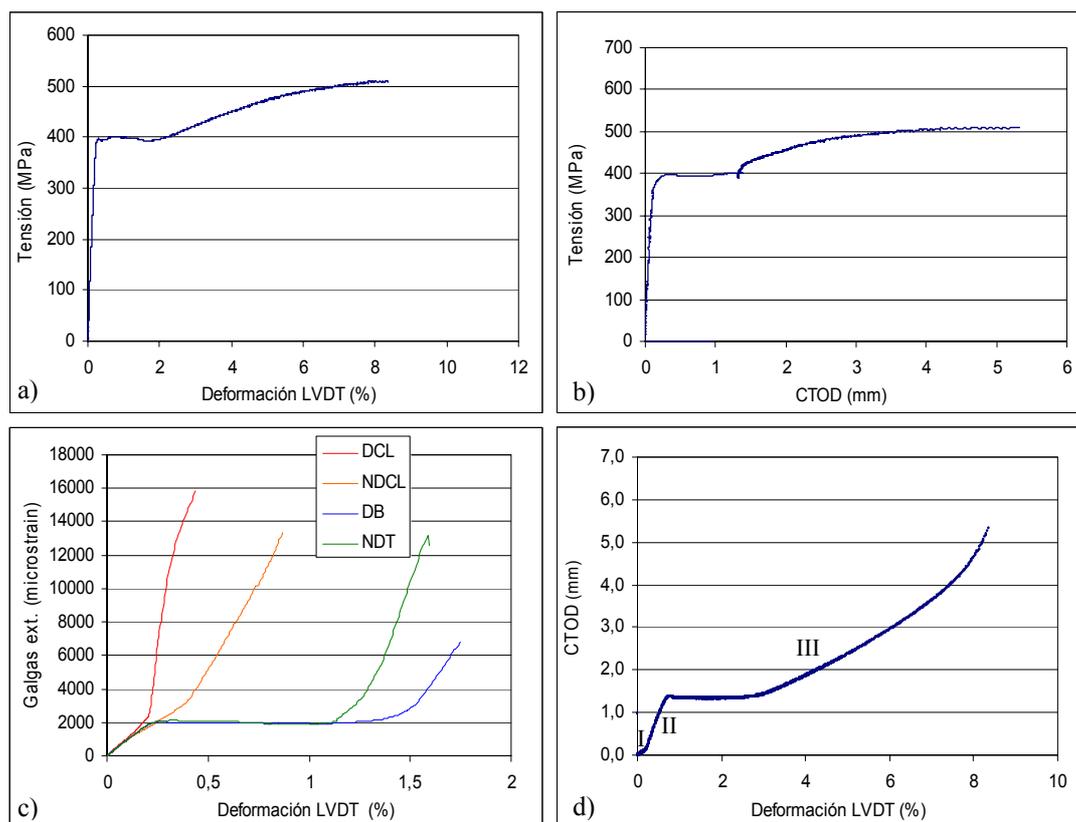


Fig. 5.34. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta Y1A19A3. a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

En las Fig. 5.34a y 5.34b se pueden distinguir (al igual que en la 5.33b) las tres zonas de comportamiento del material (elástico-lineal, cedencia y endurecimiento por deformación). Es de destacar el hecho de que la tensión a la cual comienza el escalón de cedencia coincide con el límite elástico estimado y recogido en la Tabla 5.2 (390.2 MPa) y que la tensión neta en rotura (510.2 MPa) es sensiblemente inferior a la tensión de rotura estimada (612.0 MPa) debido al efecto de la fisura. También se observa una reducción de la deformación global en rotura con respecto a la correspondiente al material sin fisurar. En la Fig. 5.34b se observa como el CTOD se estabiliza al iniciarse el endurecimiento general.

En la Fig. 5.34c se observa una similitud con la 5.33d (deformación en galgas a lo largo del tiempo), algo lógico si se tiene en cuenta que la deformación del LVDT crece de forma sensiblemente proporcional con el tiempo.

Finalmente, en la Fig. 5.34d se aprecia la diferencia entre la deformación global de la probeta medida por los LVDT con las deformaciones locales de la zona del defecto registradas a través de los extensómetros. Al comenzar el ensayo todas las deformaciones son elásticas, tanto cerca como lejos del defecto, y por lo tanto ambos registros guardan una relación lineal y apenas apreciable (I). A continuación el valor CTOD se dispara al concentrarse en el fondo de la fisura la deformación plástica (II), lo que corresponde a la cedencia. De nuevo, llegado un momento, la zona próxima a la fisura se encuentra más solicitada y ha plastificado y, con el objeto de admitir más sollicitación externa, la probeta lleva los nuevos incrementos tensionales a zonas alejadas del defecto. En consecuencia, mientras que la deformación global aumenta de forma rápida, la deformación medida por los extensómetros crece de forma mucho más lenta, dando lugar a una zona prácticamente horizontal. Finalmente, la plastificación afecta a toda la probeta en la zona de endurecimiento (III) y ambos registros vuelven a seguir una relación aproximadamente lineal hasta que se inicia un crecimiento mayor de la medida del CTOD que antecede a la rotura.

La Tabla 5.6 recoge los principales parámetros del ensayo necesarios para realizar el posterior análisis de integridad estructural que se va a realizar en el Capítulo 6, así como algunos otros que justifican el comportamiento de la probeta.

Tabla 5.6. Profundidad del defecto, tensión, deformación bajo carga máxima y valores de CTOD en el ensayo realizado sobre la probeta Y1A19A3 (espesor 21.3 mm, fisurada).

PROBETA	PROF. DEL DEFECTO (mm)	TENSIÓN ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN EN ROTURA, LVDT (%)	CTOD inicio inestabilidad (mm)	CTOD rotura (mm)
Y1A19A3	5.42	510.2	8.36	3.0	5.3

b) Probeta entallada

En las Fig. 5.35 y 5.36 se presentan, respectivamente y de forma análoga al caso anterior, los datos registrados en el ensayo de la probeta Y1A19A8 (entalla de radio 2.0 mm) y las correlaciones obtenidas a partir de los mismos.

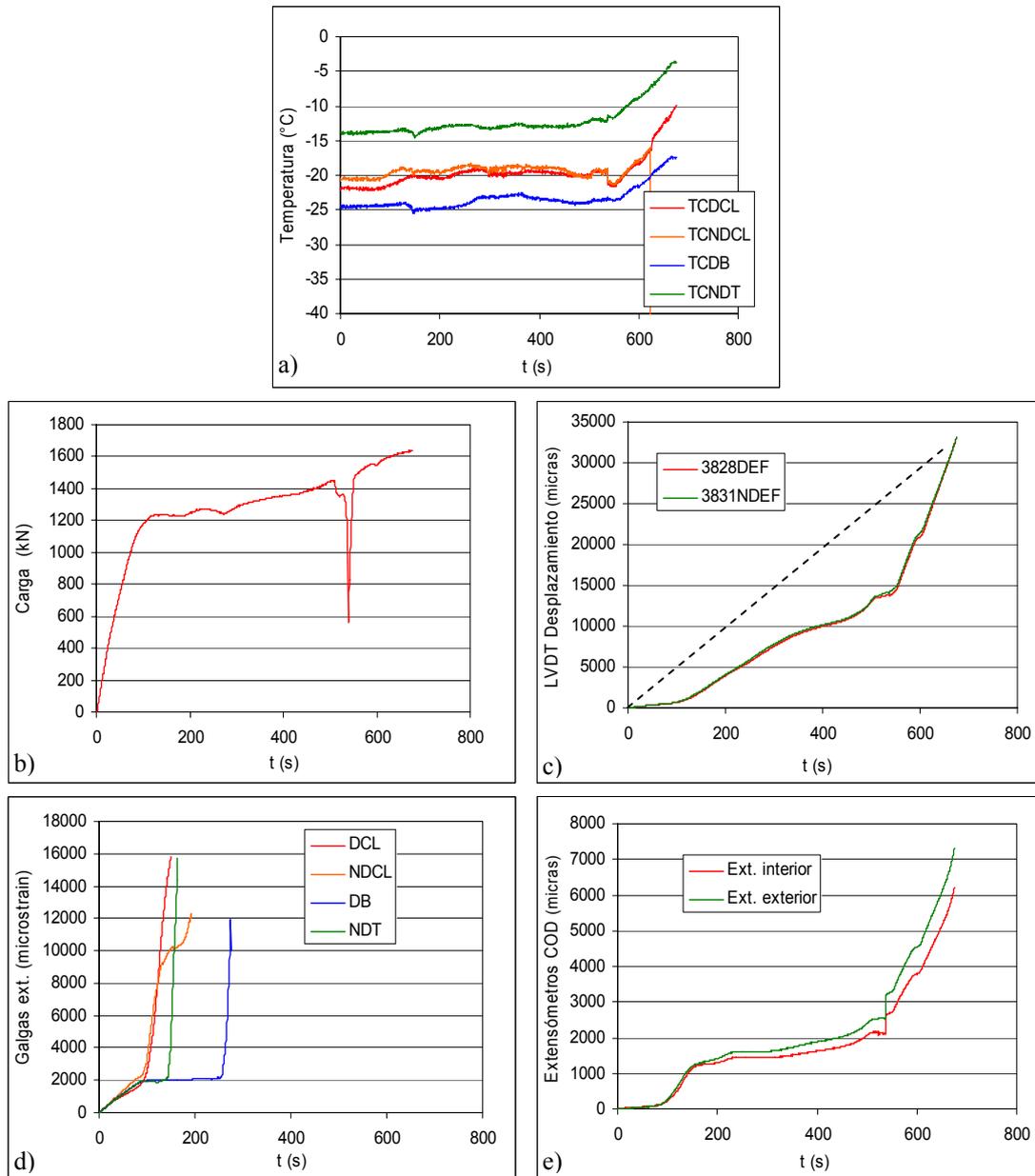


Fig. 5.35. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta entallada ($\rho=2.0$ mm) Y1A19A8.
 a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

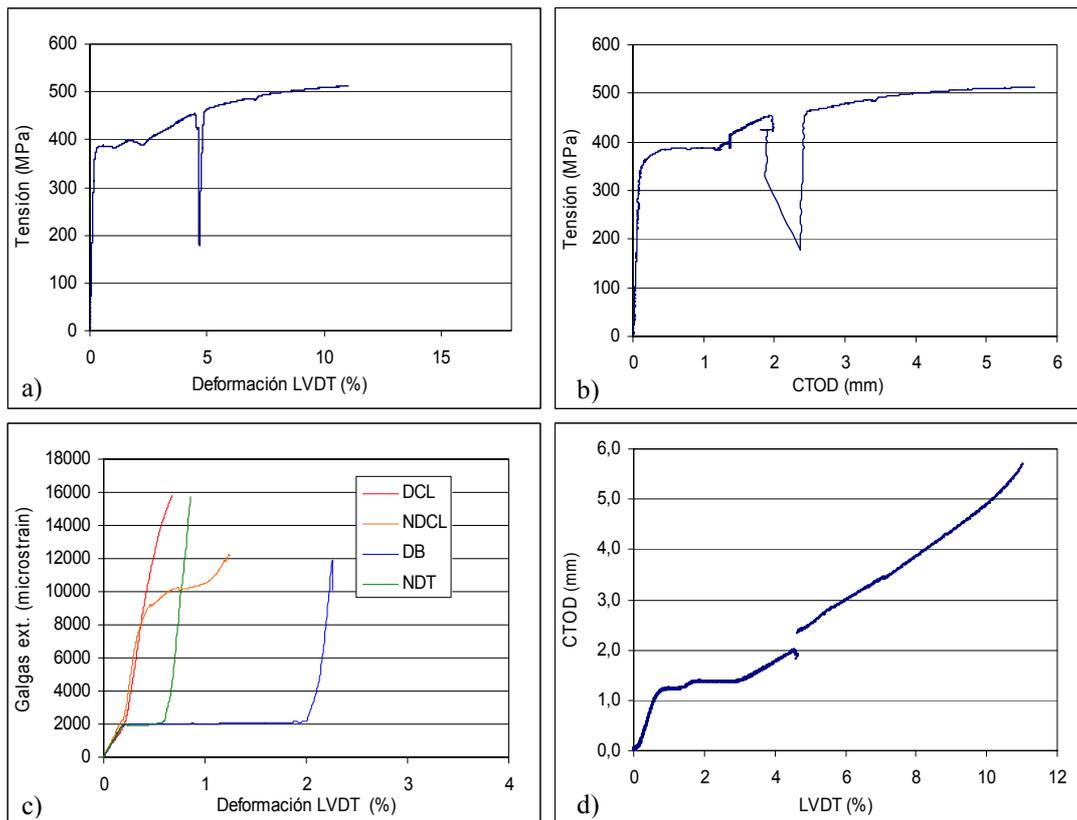


Fig. 5.36. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta entallada ($\rho=2.0$ mm) Y1A19A8. a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

En la Fig. 5.35b, análogamente a lo visto en la Fig. 5.33b, se distinguen dos zonas de comportamiento del material correspondientes al comportamiento elástico-lineal (con un crecimiento lineal de la carga en el tiempo asociado a una velocidad de desplazamiento constante en cabezales) y al comportamiento elastoplástico (que incluye la cedencia y el endurecimiento por deformación). Además se aprecia una descarga de la probeta en el momento en que los procesos de deformación local se aceleran con respecto al desplazamiento. Las cargas a las cuales comienza la plastificación y se produce el fallo son muy similares a las del ensayo anterior, por lo que el efecto del radio de entalla al respecto no es apreciable. Por lo tanto, en función de lo visto en estos dos ensayos, en situaciones de elevada plasticidad el efecto entalla es muy pequeño o inexistente. La razón es que al ir aumentando la sollicitación, la fisura va enromándose progresivamente y adopta una configuración entallada, dependiendo la rotura de las dimensiones del defecto y de la sección de la probeta y no del radio existente en el fondo del defecto. Este análisis viene confirmado por el hecho de que las medidas de los extensómetros

COD en rotura son prácticamente coincidentes para ambas configuraciones de defecto (ver Fig. 5.33e y Fig. 5.35e).

En la Fig. 5.35c se distingue una zona de comportamiento lineal y pendiente reducida seguido de una zona en la que la pendiente de la curva varía en el tiempo (correspondiente a la cedencia y al endurecimiento por deformación del material) discurriendo paralela a la relación teórica deformación-desplazamiento. Los registros de los dos LVDT vuelven a ser coincidentes y muy similares a los mostrados en la Fig. 5.33c. En definitiva, no se encuentran diferencias apreciables entre los registros del ensayo Y1A19A3 (probeta fisurada) y del Y1A19A8 (probeta entallada).

La Fig. 5.35d muestra el registro de las galgas extensométricas, que al igual que en el ensayo anterior, muestran como las galgas próximas al defecto marcan la deformación plástica local producida en su entorno al inicio de la plastificación, mientras que las alejadas quedan estabilizadas.

Por último, en la Fig. 5.35e se observan las lecturas de los extensómetros utilizadas para la determinación del CTOD, con las mismas zonas y asociadas a los mismos fenómenos que los explicados en el ensayo anterior. De nuevo se aprecia un mayor registro del extensómetro exterior y una buena correlación entre ambos registros. Los valores en rotura son ligeramente superiores a los alcanzados en la probeta fisurada, aunque la diferencia es muy pequeña. Además, ambos extensómetros registran el deslizamiento producido en las mordazas.

En las cuatro gráficas (Fig. 5.35b a Fig. 5.35e) se pone de manifiesto, por tanto, la similitud de comportamiento con la probeta fisurada, con la única diferencia de que cada zona queda asociada a mayores desplazamientos en el caso de la probeta entallada.

En cuanto a las correlaciones obtenidas a partir de los registros de los ensayos, en las Fig. 5.36a y 5.36b se distinguen (al igual que en la 5.35b y de forma análoga a lo visto en las Fig. 5.34a y 5.34b) las tres zonas de comportamiento del material ya mencionadas (elástica, cedencia y endurecimiento). De nuevo, la tensión a la cual comienza el escalón de cedencia coincide aproximadamente con el límite elástico estimado (390.2 MPa). La tensión neta en rotura (511.7 MPa) es sensiblemente inferior a la tensión de rotura estimada (612.0 MPa) debido al efecto de la entalla y muy similar a la de la probeta fisurada. En la Tabla 5.7 se muestran los parámetros resistentes y geométricos obtenidos en el ensayo que serán utilizados más adelante en las evaluaciones de integridad estructural. Se observa que, si bien la carga de rotura es prácticamente igual que la de la probeta fisurada, la capacidad de deformación de la probeta entallada ha resultado sensiblemente mayor (11.03% frente a 8.36%) debido a la mayor

capacidad de deformación global a medida que aumenta el radio de entalla. Este hecho se observa también en los mayores valores de CTOD de inicio de la inestabilidad (3.8 mm frente a 3.0 mm) y de rotura (5.7 mm frente a 5.3 mm)

Tabla 5.7. Profundidad del defecto, tensión, deformación bajo carga máxima y valores de CTOD en el ensayo realizado sobre la probeta Y1A19A8 (espesor 21.3 mm, entallada, $\rho=2.0$ mm).

PROBETA	PROF. DEL DEFECTO (mm)	TENSIÓN ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN EN ROTURA, LVDT (%)	CTOD inicio inestabilidad (mm)	CTOD rotura (mm)
Y1A19A8	5.12	511.7	11.03	3.8	5.7

Al igual que en el ensayo sobre la probeta fisurada, se observa una similitud entre la Fig. 5.36c (lectura de galgas frente a lectura del LVDT) y la 5.35d (deformación en galgas a lo largo del tiempo) ocasionada por las razones expuestas en el anterior ensayo.

En la Fig. 5.36d, en la que se correlacionan la deformación global con las deformaciones locales, vuelve a observarse una relación lineal apenas apreciable entre ambas magnitudes al comienzo del ensayo en régimen elástico. De nuevo el CTOD aparece señalando la plastificación local para que, a partir de un determinado momento (que ocurre para valores de deformación en LVDT ligeramente superiores a los del ensayo sobre la probeta fisurada), la deformación global crezca mucho más rápido que la local. Finalmente, la pendiente de la curva crece y se mantiene sensiblemente constante. Las razones de este comportamiento son idénticas a las comentadas para el anterior ensayo.

En definitiva, los dos ensayos realizados a -20 °C tuvieron resultados muy similares. La principal diferencia corresponde a la deformación global alcanzada bajo carga máxima y a los valores de deformación local, que resultaron sensiblemente mayores en la probeta entallada. En cualquier caso, las escasas diferencias encontradas entre ambos ensayos llevan a la conclusión de que el efecto del radio de entalla es muy reducido en el “Upper Shelf”.

5.4.4.2. Ensayos a -65 °C en probetas de 15.4 mm de espesor

En este caso se ensayaron tres probetas de material procedente de alas de 15.4 mm de espesor (Tabla 5.5). Una de las probetas de ensayo, la Y1A13A1, tenía un defecto tipo fisura, la probeta Y1A13A2 presentaba una entalla con radio en el fondo de 1.2 mm y la probeta Y1A13A3 tenía una entalla con radio de 2.0 mm. La temperatura de ensayo corresponde con la Zona de

Transición a temperaturas superiores a T_0 (tal y como se desprende del apartado 5.3.3), y por lo tanto supone una situación en la que los mecanismos de rotura comienzan a ofrecer resultados de cierta fragilización con referencia al comportamiento asociado a la plasticidad.

a) Probeta fisurada

En las Fig. 5.37 y 5.38 se muestran, respectivamente, los resultados de los datos recogidos en el ensayo realizado sobre la probeta fisurada y las correspondientes correlaciones.

En la Fig. 5.37a se observa que la temperatura está muy próxima a los -65 °C en los termopares situados en el plano de la fisura, con desviaciones máximas de $\pm 3\text{ °C}$, lo que indica que la zona de proceso sí se encuentra a la temperatura teórica del ensayo. Los situados en las partes inferior y superior de la chapa se alejan de dicha temperatura en gran parte del ensayo (incluso más de 20 °C).

En la Fig. 5.37b se observa una primera zona sin incremento de carga a lo largo del tiempo debida al ajuste inicial del sistema probeta-mordazas. Posteriormente se distinguen las zonas de comportamiento elástico, cedencia y endurecimiento por deformación, alcanzándose la rotura en esta última zona sin llegar a producirse una estabilización de la carga como sucedía en la probeta fisurada ensayada a -20 °C . La carga de rotura es sensiblemente inferior a la alcanzada en los ensayos a -20 °C pero también lo es la sección transversal de la probeta, por lo que la comparación de la capacidad resistente hay que hacerla en tensión aplicada y no en carga.

En el registro de los LVDT (Fig. 5.37c) se distingue también el periodo de falta de acoplamiento seguido de una evolución semejante a la observada en las probetas analizadas previamente. La relación teórica entre desplazamientos se ha marcado desde el inicio de la lectura de la señal de los LVDT. De nuevo se observa como, con referencia a ella, la señal es menor en régimen elástico, prácticamente paralela en el plástico y finalmente crece antes de la inestabilidad. Los registros de los dos LVDT son prácticamente coincidentes y alcanzan un valor máximo muy inferior al alcanzado en los ensayos realizados en el “*Upper Shelf*”, observándose de esta manera un primer y claro efecto de la temperatura en la capacidad de deformación del componente fisurado.

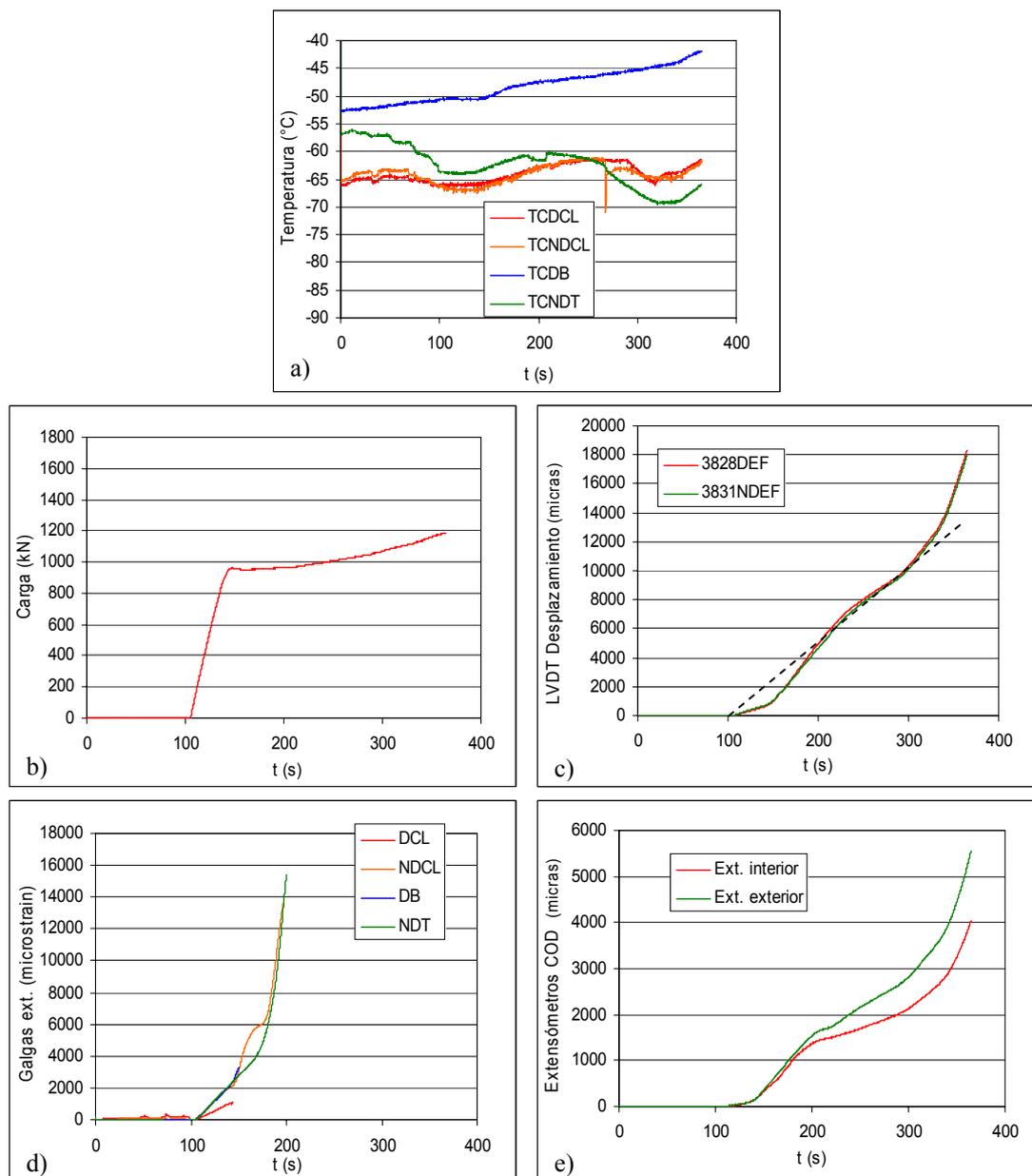


Fig. 5.37. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta fisurada Y1A13A1. a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

La Fig. 5.37d muestra el registro de las galgas extensométricas, en el que se observa un periodo sin registro de deformación (debido al acoplamiento) seguido de un aumento lineal de la deformación hasta el inicio de la detección de los efectos locales, tal y como sucedía en la probeta ensayada a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. La señal de las galgas no se pudo mantener hasta el final del ensayo debido a las altas deformaciones registradas.

Finalmente, en la Fig. 5.37e se observan las lecturas de los extensómetros. Tras el acoplamiento, en el que el registro se mantiene nulo a lo largo del tiempo, se producen las mismas cuatro etapas que en ensayos anteriormente analizados, asociados a procesos similares. Los valores en rotura son sensiblemente inferiores a los alcanzados en la probeta fisurada ensayada a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que se observa un claro efecto de la temperatura en la rotura de estos componentes.

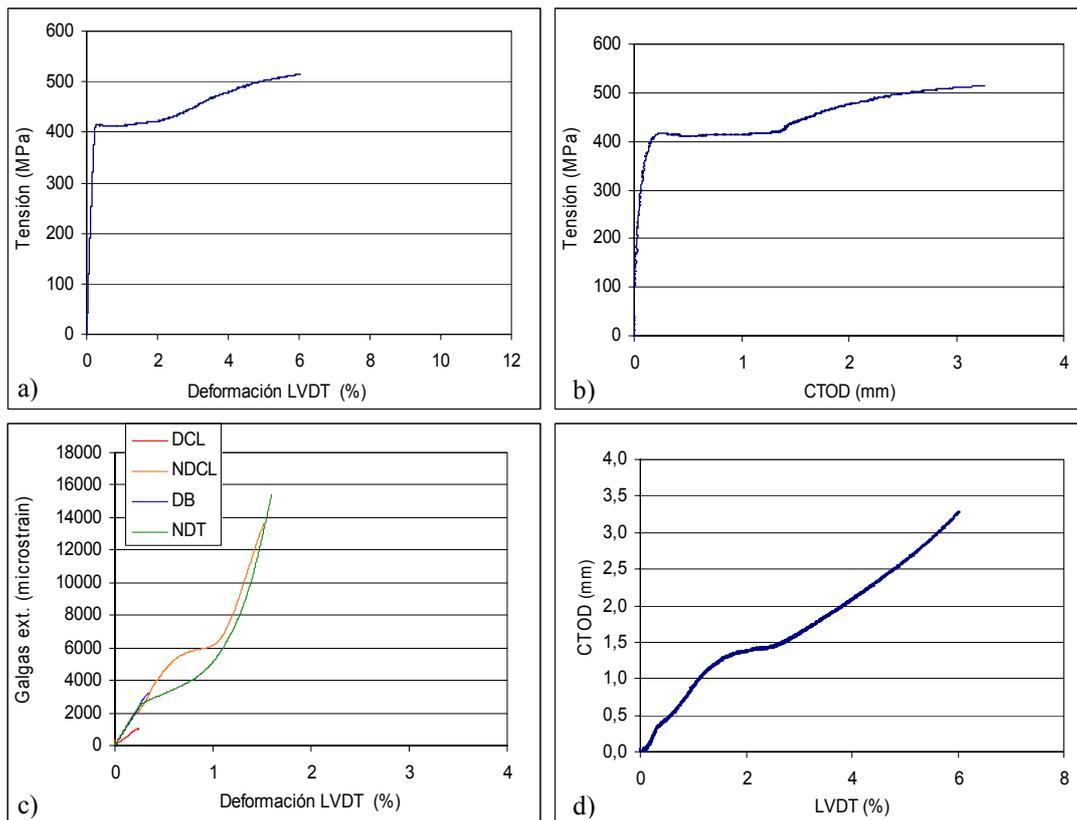


Fig. 5.38. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta fisurada Y1A13A1. a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

Por lo que respecta a las correlaciones obtenidas a partir de los registros de los ensayos, en las Fig. 5.38a y 5.38b se distinguen nuevamente las tres zonas de comportamiento del material ya mencionadas: elástica, cedencia y de endurecimiento. La tensión a la cual comienza el escalón de cedencia coincide aproximadamente con el límite elástico estimado (en este caso 438.4 MPa) y la tensión neta en rotura (514.4 MPa) es sensiblemente inferior a la tensión de rotura a tracción estimada (652.6 MPa) debido al efecto de la fisura. La diferencia, cuyo origen se encuentra en el efecto de la fragilización, es mayor que la producida a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La lectura de las galgas (Fig. 5.38c) y la correlación entre la deformación global y las deformaciones locales (Fig. 5.38d) siguen comportamientos análogos a los observados en los ensayos anteriores. Las razones de los comportamientos observados son las ya esgrimidas. En este caso se observa, con menos claridad que a -20 °C , el escalón de parada en la evolución del valor de CTOD asociado a la extensión de la plastificación, aunque se produce para valores de CTOD semejantes (1.5 mm). La mayor diferencia se manifiesta en la proximidad existente entre los procesos de inestabilidad (CTOD = 2.8 mm) y rotura (CTOD = 3.3 mm) lo que, de nuevo, implica el efecto fragilizante de la temperatura.

En la Tabla 5.8 se muestran los parámetros resistentes y geométricos obtenidos en el ensayo. Con respecto al ensayo realizado a -20 °C en chapa fisurada (probeta Y1A19A3) se observa que aunque la tensión de rotura apenas varía, la deformación en rotura se ha reducido considerablemente (6.02 % frente a 8.36%). Esta última comparación puede establecerse de forma directa, ya que las longitudes de fisura son prácticamente iguales (5.50 mm y 5.42 mm respectivamente). Los valores de deformación local al inicio de la inestabilidad son próximos, en tanto que el CTOD en rotura es considerablemente menor, pasando de 5.3 mm a 3.3 mm.

Tabla 5.8. Profundidad del defecto, tensión, deformación bajo carga máxima y valores de CTOD en el ensayo realizado sobre la probeta Y1A13A1 (espesor 15.4 mm, fisurada).

PROBETA	PROF. DEL DEFECTO (mm)	TENSIÓN ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN EN ROTURA, LVDT (%)	CTOD inicio inestabilidad (mm)	CTOD rotura (mm)
Y1A13A1	5.50	514.4	6.02	2.8	3.3

b) Probetas entalladas

En las Fig. 5.39 y 5.40 se muestran los datos y las correlaciones correspondientes al ensayo a -65 °C realizado en la probeta entallada Y1A13A2, con su radio de entalla ρ de 1.2 mm.

En la Fig. 5.39a se observa que la temperatura de ensayo está próxima a los -65 °C en los termopares situados en el plano de la fisura, con desviaciones máximas de $\pm 4\text{ °C}$, mientras que en el situado en las parte inferior la desviación llega a alcanzar los 8 °C y el situado en la parte superior no ha realizado registro alguno. En definitiva, la zona de proceso parece estar aproximadamente a la temperatura teórica del ensayo, teniendo siempre en cuenta que hay pequeñas desviaciones.

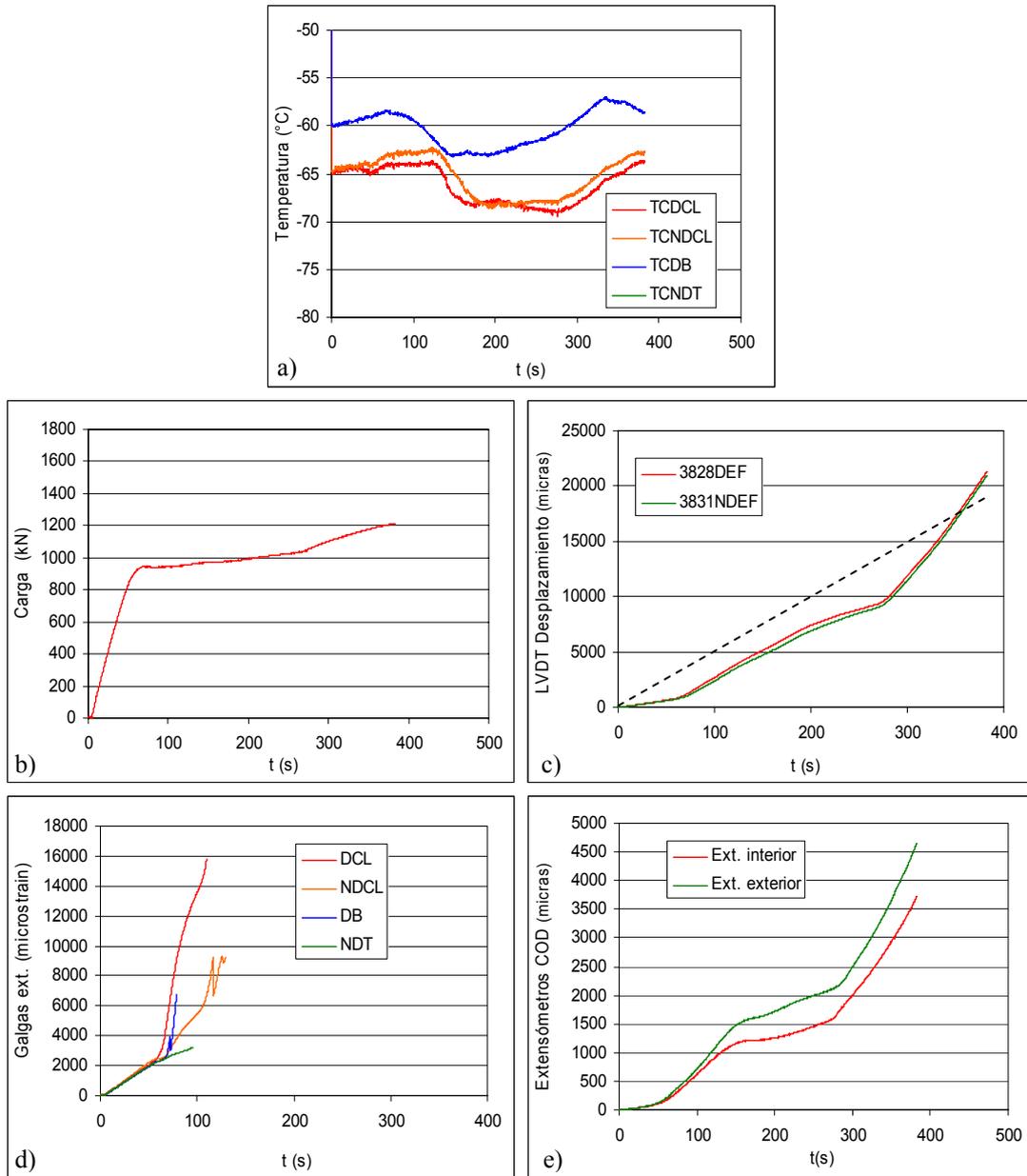


Fig. 5.39. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta entallada ($\rho=1.2$ mm) Y1A13A2.

a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

En la Fig. 5.39b se distinguen las zonas de comportamiento elástico, cedencia y endurecimiento por deformación. La carga de rotura es ligeramente superior a la alcanzada en la probeta fisurada, aunque para comparar ambas magnitudes hay que considerar también la profundidad del defecto.

En el registro de los LVDT (Fig. 5.39c) se aprecia un comportamiento similar al de los ensayos previos. El valor alcanzado en rotura (unas 21500 μm) es superior al alcanzado en la probeta fisurada (18000 μm) por lo que parece que, al igual que ocurría en el “*Upper Shelf*”, el efecto entalla provoca un aumento de la capacidad de deformación global de la probeta. Aun así, dicho valor está muy alejado de los valores alcanzados en las probetas ensayadas en el “*Upper Shelf*”, en el entorno de 30000 μm .

En la Fig. 5.39d se muestra el registro de las galgas extensométricas, de nuevo similar a los presentados previamente, ya que alrededor de los 2000 microstrains se observa el reflejo de la deformación local en las galgas próximas al defecto.

Por último, en la Fig. 5.39e se muestra el registro de los extensómetros COD, con un aspecto similar a los observados con anterioridad. Los valores en rotura son algo inferiores (10%) a los alcanzados en la probeta fisurada ensayada a la misma temperatura y muy inferiores (40%) a los alcanzados en las probetas ensayadas a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Por lo que respecta a las correlaciones obtenidas a partir de los registros de los ensayos, en las Fig. 5.40a y 5.40b se distinguen nuevamente las tres zonas de comportamiento del material observadas en el resto de los ensayos. Al igual que en los casos anteriores, la tensión a la cual comienza el escalón de cedencia coincide aproximadamente con el límite elástico estimado, aunque es ligeramente inferior. Por su parte, la tensión neta en rotura (526.2 MPa) es sensiblemente inferior a la tensión de rotura a tracción estimada (652.6 MPa) debido al efecto de la entalla y ligeramente superior a la obtenida en el ensayo con el componente fisurado.

La Fig. 5.40c (lectura de galgas frente a lectura del LVDT) vuelve a ser análoga a su correspondiente 5.39d (deformación en galgas a lo largo del tiempo), como en todos los casos anteriores.

Por último, en la Fig. 5.40d la correlación entre deformaciones globales y locales no difiere de lo observado en resultados anteriores. Particularmente, se reproduce el comportamiento del componente fisurado en cuanto a valores de CTOD, aunque con valores ligeramente superiores de deformación global, tal como sucedía a -20°C . No se observa, como en la fisurada, diferencia entre inestabilidad y rotura.

En la Tabla 5.9 se muestran los parámetros resistentes y geométricos obtenidos en el ensayo. Con respecto al ensayo de la probeta fisurada Y1A13A1, se observa que la tensión de rotura es ligeramente superior (526.2 MPa frente a 514.4 MPa) y que la deformación global en rotura también es mayor (7.03 % frente a 6.02%). Estas diferencias son debidas tanto a la diferente

profundidad de los defectos correspondientes (5.17 mm y 5.50 mm respectivamente) como al efecto entalla.

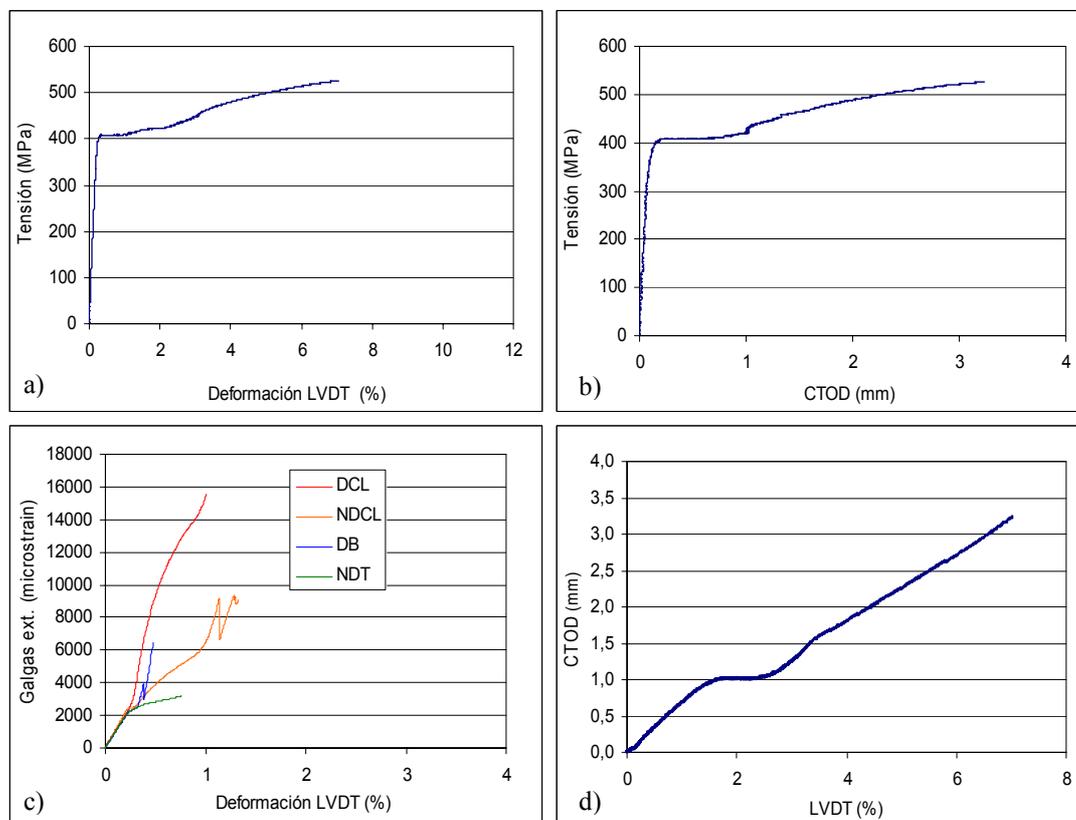


Fig. 5.40. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta entallada ($\rho=1.2$ mm) Y1A13A2. a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

Tabla 5.9. Profundidad del defecto, tensión, deformación bajo carga máxima y valores de CTOD en el ensayo realizado sobre la probeta Y1A13A2 (espesor 15.4 mm, entallada, $\rho=1.2$ mm).

PROBETA	PROF. DEL DEFECTO (mm)	TENSIÓN ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN EN ROTURA, LVDT (%)	CTOD inicio inestabilidad (mm)	CTOD rotura (mm)
Y1A13A2	5.17	526.2	7.03	3.3	3.3

A continuación, en las Fig. 5.41 y 5.42 se muestran los datos y las correlaciones correspondientes al último de los ensayos realizados a -65 °C, correspondiente a la probeta entallada Y1A13A3 ($\rho = 2.0$ mm).

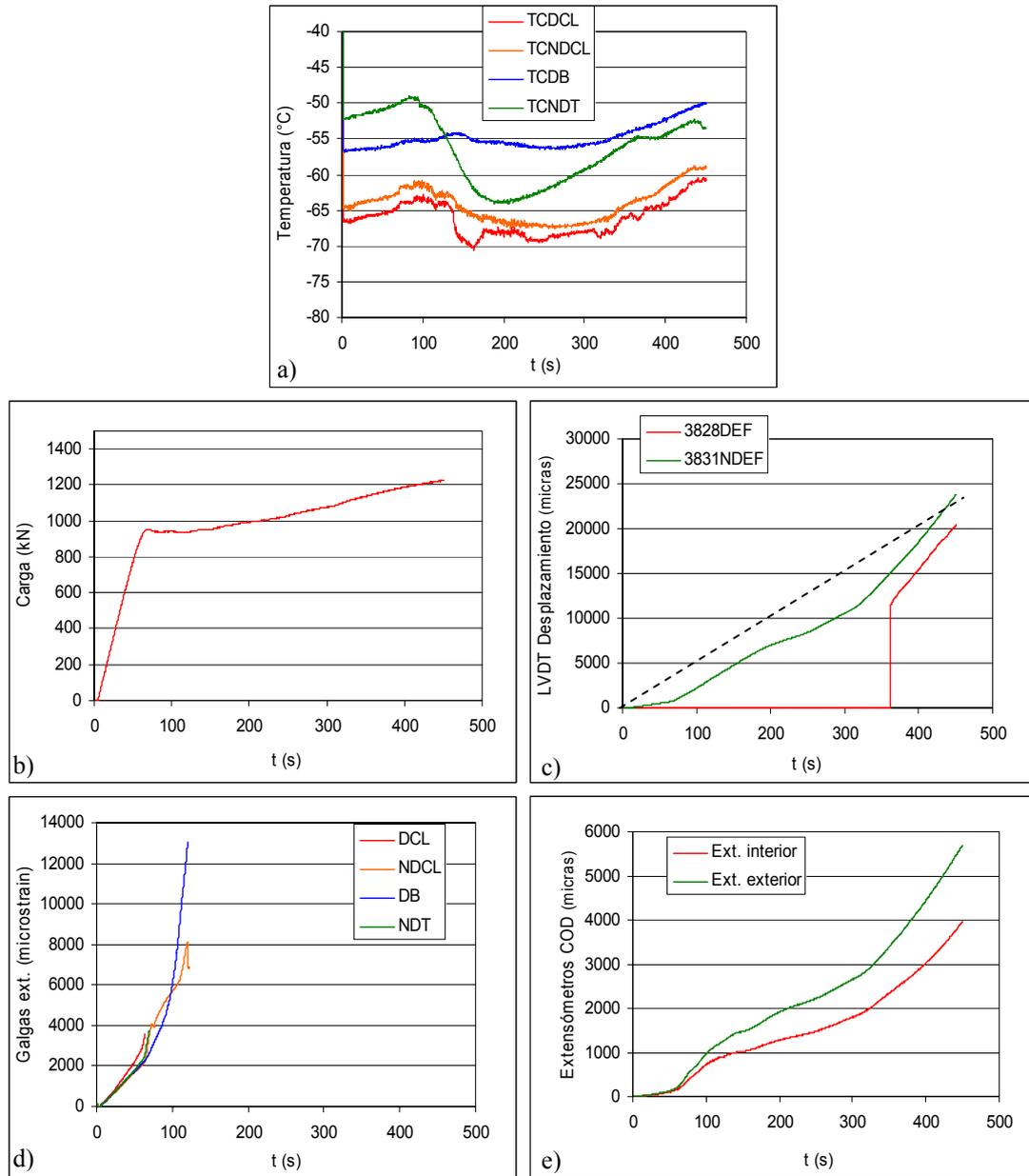


Fig. 5.41. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta entallada Y1A13A3 ($\rho=2.0$ mm).

a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

En la Fig. 5.41a se observa que las desviaciones máximas de la temperatura con respecto a la temperatura teórica del ensayo son de aproximadamente 5 °C en los termopares próximos a la zona de proceso. En los termopares alejados del defecto la desviación con respecto a los -65 °C llega a ser de casi 17 °C.

En la Fig. 5.41b se distinguen, al igual que en todos los ensayos previos, las zonas de comportamiento elástico, cedencia y endurecimiento por deformación.

La Fig. 5.41c muestra uno de los problemas encontrados en los ensayos mencionados en el apartado 5.4.3. Se trata de la formación de hielo, que evita el movimiento de uno de los LVDT. Hasta que el desplazamiento no alcanza un valor suficiente el LVDT no logra liberarse. A partir de ese momento su registro es completamente normal, aunque en este caso no llega a alcanzar a la lectura del otro LVDT. Por lo demás, el aspecto del registro tiene las mismas partes que las observadas en casos anteriores, con un valor en rotura algo superior (2600 μm) al de la probeta con entalla de 1.2 mm de radio, mayor a su vez que el de la probeta fisurada y muy inferior al de los ensayos realizados a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La Fig. 5.41d muestra el registro de las galgas, similar al observado en las probetas analizadas previamente.

Finalmente, la Fig. 5.41e muestra el registro de los extensómetros COD. Su forma es muy similar a la de los anteriores ensayos y los valores en rotura son algo mayores que los alcanzados en la probeta con entalla de 1.2 mm y similares a los de la probeta fisurada. Sin embargo, todos ellos son muy inferiores (35%-40%) a los alcanzados en los ensayos del “*Upper Shelf*”.

En lo relativo a las correlaciones obtenidas, en las Fig. 5.42a y 5.42b se aprecian las tres zonas de comportamiento del material. Como en los ensayos anteriores, la tensión a la cual comienza el escalón de cedencia coincide aproximadamente con el límite elástico estimado, aunque es ligeramente inferior, y la tensión neta en rotura (530.3 MPa) es sensiblemente inferior a la tensión de rotura a tracción estimada (652.6 MPa) debido al efecto de la entalla. El valor obtenido supera al de la entalla de 1.2 mm, incidiendo en el efecto del radio del fondo de las mismas.

La Fig. 5.42c no ofrece ningún comportamiento diferente al de las figuras análogas de ensayos anteriores y la Fig. 5.42d vuelve a mostrar una relación entre deformaciones globales y locales con un comportamiento muy similar al de los anteriores ensayos. En este caso sí pueden distinguirse ligeramente los valores de CTOD propios del inicio de la inestabilidad y de la rotura.

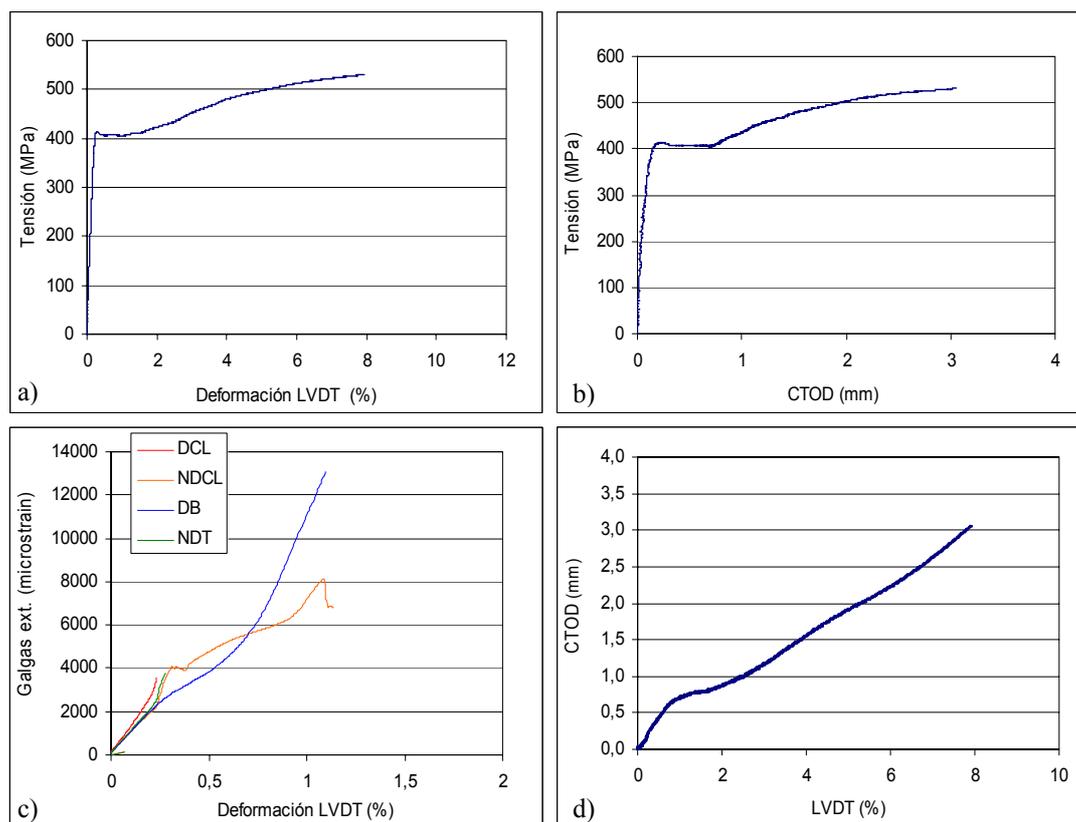


Fig. 5.42. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta Y1A13A3. a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

En la Tabla 5.10 se muestran los parámetros resistentes y geométricos del ensayo. Con respecto a los ensayos realizados a la misma temperatura se observa que la tensión de rotura es ligeramente superior y que la deformación global en rotura también es mayor. Teniendo en cuenta la diferencia en la profundidad del defecto se observa que el efecto entalla genera aumentos de la carga y de deformación en rotura al aumentar su radio de fondo.

Tabla 5.10. Profundidad del defecto, tensión, deformación bajo carga máxima y valores de CTOD en el ensayo realizado sobre la probeta Y1A13A3 (espesor 15.4 mm, entallada, $\rho=2.0$ mm).

PROBETA	PROF. DEL DEFECTO (mm)	TENSIÓN ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN EN ROTURA, LVDT (%)	CTOD inicio inestabilidad (mm)	CTOD rotura (mm)
Y1A13A3	5.36	530.3	7.94	2.6	3.0

5.4.4.3. Ensayos a $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ en probetas de 21.3 mm de espesor

En esta ocasión se realizaron tres ensayos sobre material procedente de alas de 21.3 mm de espesor (Tabla 5.5). Se volvieron a utilizar una probeta fisurada (Y1A19A2), una entallada con radio de entalla de 1.2 mm (Y1A19A5) y otra entallada con radio de entalla de 2.0 mm (Y1A19A7). La temperatura de ensayo corresponde con la Zona de Transición a temperaturas muy próximas a T_0 , y por lo tanto vuelve a suponer una situación de mayor fragilidad que las vistas con anterioridad.

a) *Probeta fisurada*

En las Fig. 5.43 y 5.44 se muestran los datos y correlaciones del ensayo de la probeta Y1A19A2.

En la Fig. 5.43a se observa que las desviaciones máximas de la temperatura con respecto a la temperatura teórica del ensayo son de aproximadamente de entre $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en los termopares próximos a la zona de proceso. En los termopares alejados del defecto la desviación con respecto a los $-85\text{ }^{\circ}\text{C}$ llega a ser de casi $13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por lo tanto cabe pensar que el ensayo es representativo del material en temperaturas próximas a T_0 ($-89\text{ }^{\circ}\text{C}$) al estar condicionado por las condiciones de la zona de proceso próximas a la fisura preestablecida.

Al contrario que en los ensayos vistos hasta el momento, en la Fig. 5.43b se distinguen tan solo una zona de comportamiento lineal (elástica) seguida de otra en la que la carga permanece más o menos constante (cedencia), no apareciendo fenómenos de endurecimiento. También se aprecian unos segundos iniciales sin sollicitación, que indican el tiempo del proceso de acomodo del ensayo hasta entrar en carga. Como consecuencia del cambio de comportamiento respecto a las probetas anteriormente analizadas se justifica que la duración del ensayo sea muy corta, sin necesidad de grandes desplazamientos y con una rotura producida de forma frágil sin grandes plastificaciones.

La Fig. 5.43c (deformación de los LVDT) resulta, lógicamente, diferente de las observadas en anteriores ensayos, por lo que ha de ser representada a escala diferente. En esta ocasión tras la relación inicial de menor pendiente correspondiente a la zona elástica, el LVDT recoge un aumento de deformación por encima del teórico que conduce a la rotura.

La Fig. 5.43d muestra un registro lineal de las galgas próximas al defecto que en esta ocasión si recogen datos hasta el momento de la rotura, dado que las deformaciones registradas (≤ 5000

microstrains) en ningún caso se aproximan a las que originaron la rotura en anteriores ensayos (≥ 12000 microstrains). El comportamiento observado es semejante al observado previamente, mostrando el diferente comportamiento de las galgas que registran la plastificación local en la zona del defecto.

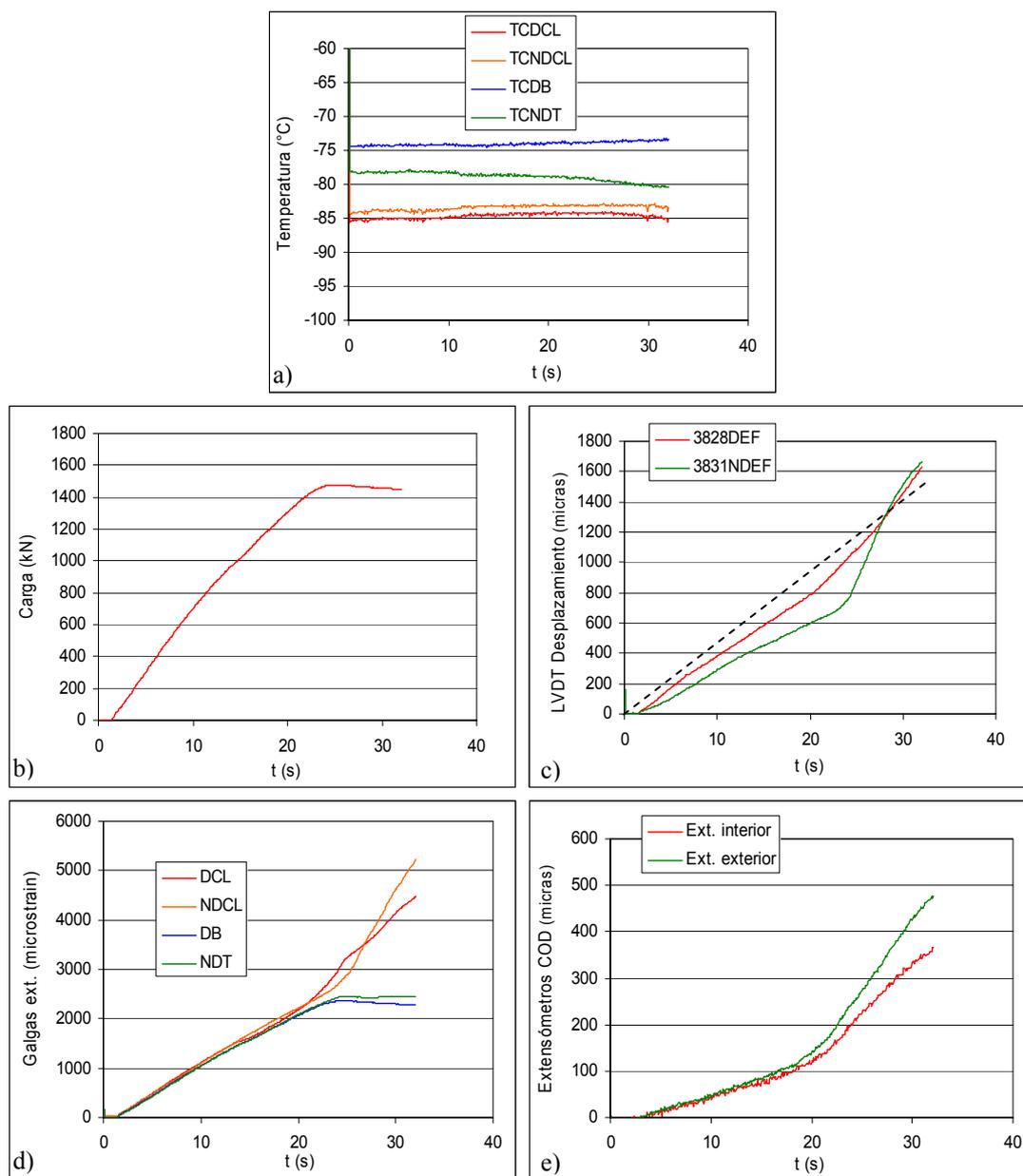


Fig. 5.43. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta fisurada Y1A19A2. a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

Finalmente, en la Fig. 5.43e (registro de los extensómetros COD) se aprecia proporcionalidad entre los dos registros pero, como cabe esperar, la curva tiene únicamente dos tramos de distinta pendiente. El primero está asociado al comportamiento elástico y el segundo, de mayor pendiente, asociado al comienzo de las deformaciones plásticas en el fondo de la fisura. Tanto la lectura de los extensómetros en rotura como la correspondiente de los LVDT son muy inferiores a las observadas en los ensayos previos realizados sobre probetas fisuradas (un orden de magnitud menor). Por lo tanto se aprecia un claro ejemplo de fragilización por temperatura.

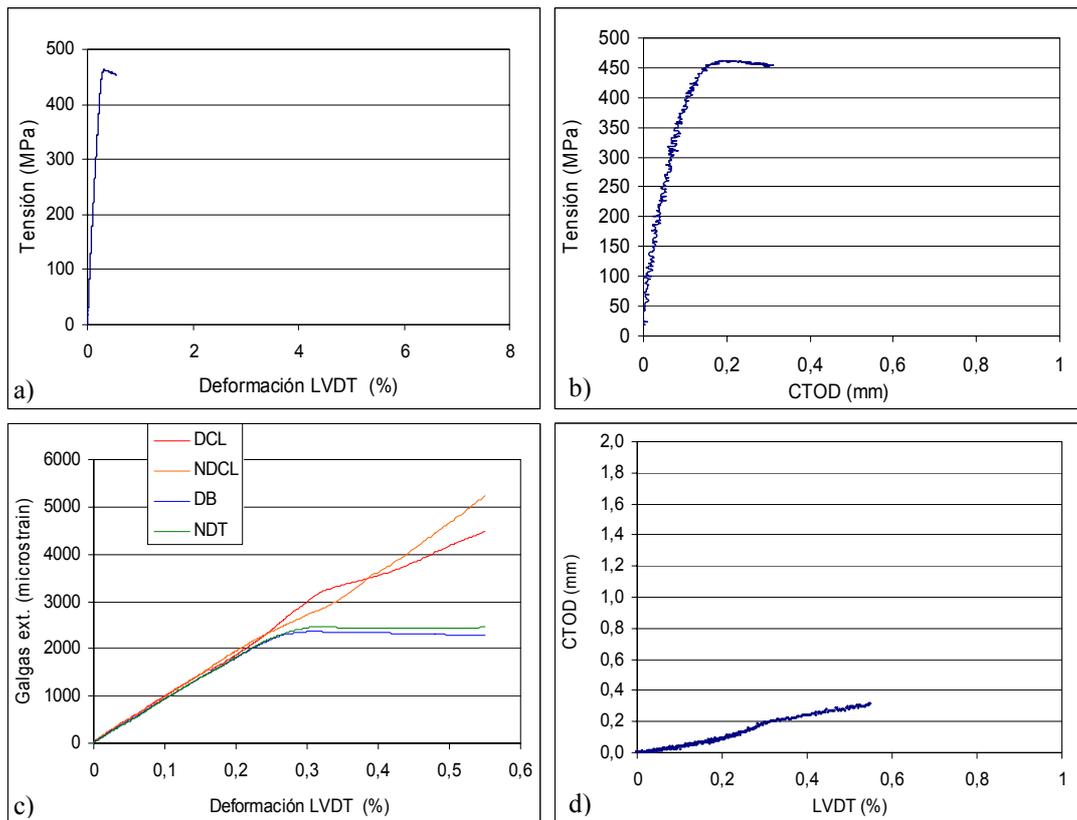


Fig. 5.44. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta fisurada Y1A19A2. a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

En lo relativo a las correlaciones obtenidas, en las Fig. 5.44a y 5.44b se aprecian dos únicas zonas comportamiento del material. La primera, elásticolineal, y la segunda correspondiente a la rotura y en la que apenas se ha producido plastificación previa. Como en los ensayos anteriores, la tensión a la cual comienza la plastificación coincide aproximadamente con el límite elástico estimado (454.0 MPa frente a 466.8 MPa), aunque es ligeramente inferior. Esta relación de valores, junto con la observación de los resultados de deformación, hace pensar que la rotura se

puede haber producido fundamentalmente en zona elástica. La tensión neta en rotura coincide con la anterior, quedando muy alejada de la tensión de rotura a tracción estimada (680.5 MPa) debido al efecto conjunto de la fisura y de la fragilización ocasionada por la temperatura.

La Fig. 5.44c muestra la situación (0.30% de deformación global y 2300 microstrains) para la que se empieza a mostrar el efecto de la plastificación local en el fondo de fisura. La relación entre deformaciones globales y locales (Fig. 5.44d) muestra en esta ocasión una relación lineal dentro de la primera zona de comportamiento que lleva hasta rotura, con unos valores críticos de ambas reducidos, hasta un orden de magnitud menores que los obtenidos en los ensayos analizados anteriormente.

En la Tabla 5.11 se muestran los parámetros resistentes y geométricos del ensayo. También se destaca el reducido valor del CTOD en rotura si se compara con cualquiera de los ensayos vistos previamente.

Tabla 5.11. Profundidad del defecto, tensión, deformación bajo carga máxima y valores de CTOD en el ensayo realizado sobre la probeta Y1A19A2 (espesor 21.3 mm, fisurada).

PROBETA	PROF. DEL DEFECTO (mm)	TENSIÓN ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN EN ROTURA, LVDT (%)	CTOD inicio inestabilidad (mm)	CTOD rotura (mm)
Y1A19A2	5.53	462.9	0.55	0.3	0.3

b) Probetas entalladas

En las Fig. 5.45 y 5.46 se muestran los datos y correlaciones del ensayo de la probeta Y1A19A5 (entalla de 1.2 mm de radio).

En la Fig. 5.45a se observan, en los termopares próximos al defecto, importantes desviaciones de la temperatura con respecto al valor teórico del ensayo, alcanzando los 10 °C en rotura. Ésta se produce estando la zona de proceso a -75 °C en vez de a -85 °C. En los termopares alejados las desviaciones son aún mayores. Este aspecto es necesario tenerlo en cuenta a la hora de interpretar el resto de resultados, ya que la temperatura de ensayo resultante es significativamente mayor (14 °C más alta) que T_0 . Por lo tanto, en principio, el material se encontraría en la Zona de Transición en un estado próximo al de las probetas recogidas en el apartado 5.4.4.2 (ensayos a -65 °C en probetas de 15.4 mm de espesor)

En la Fig. 5.45b se observa un comportamiento mucho más plástico que en el ensayo de la probeta fisurada (Y1A19A2), distinguiéndose la zona de comportamiento elasticolineal seguida

de la cedencia y del endurecimiento por deformación. También se aprecia una descarga en la parte final del ensayo. Tanto el efecto de la temperatura como la presencia de la entalla justifican esta gran diferencia con respecto al ensayo anterior.

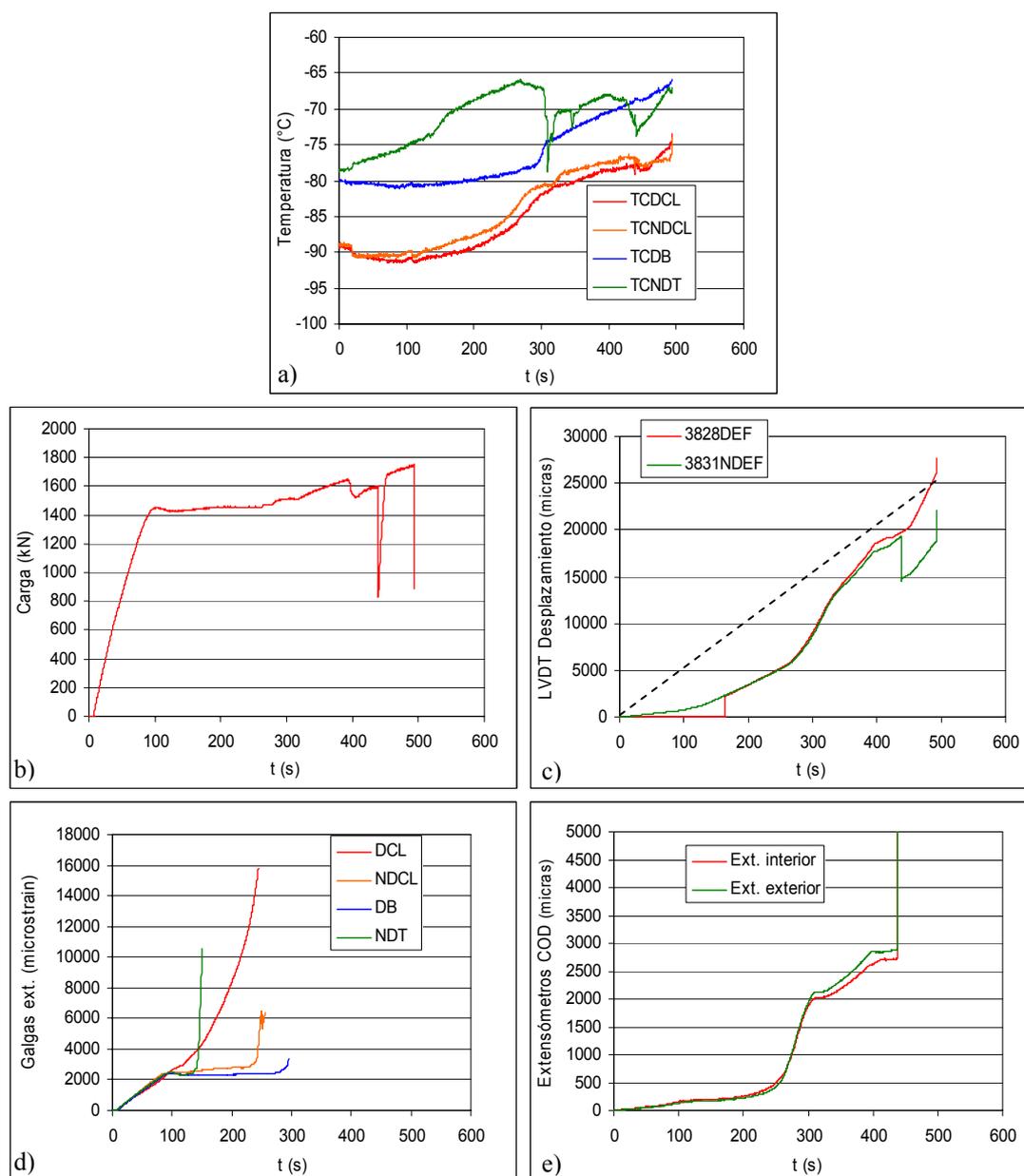


Fig. 5.45. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta entallada Y1A19A5 ($\rho=1.2\text{ mm}$).

a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

La deformación de los LVDT (Fig. 5.45c) tiene el aspecto que, salvo en el ensayo fisurado anterior, se ha ido observando en los ensayos previos. Por lo tanto, se representa en la escala de

las figuras inicialmente analizadas. Tras una zona recta correspondiente al comportamiento elasticolineal, la curva va cambiando su pendiente mientras el material va desarrollando su comportamiento plástico. Los registros de los dos LVDT son prácticamente coincidentes y se aprecia que el situado en la cara del defecto estuvo inicialmente detenido por efecto del hielo.

Las galgas extensométricas (Fig. 5.45d) vuelven, por diferencia de comportamientos, a señalar el instante (común en todos los casos) en el que se hace patente el efecto de la plastificación local en el fondo de la entalla.

Finalmente, en el registro de los extensómetros (Fig. 5.45e) se aprecia un comportamiento que, aunque semejante a los analizados anteriormente, muestra alguna singularidad. En el primer tramo (hasta $t = 200$ s) se observa un comportamiento de baja respuesta, más acorde a las temperaturas del inicio del ensayo (-90 °C). Posteriormente se acomoda a los valores propios de la temperatura que finalmente alcanza (-75 °C), desarrollando valores inferiores (en un 25 %) pero del mismo orden que los de la probeta con igual entalla ensayada a -65 °C. El registro no llega hasta el momento de la rotura.

En las Fig. 5.46a y 5.46b se aprecian las zonas elasticolineal y plástica de comportamiento del material. Como en gran parte de los ensayos anteriores, la tensión a la cual comienza la plastificación resulta próxima al límite elástico estimado (450.0 MPa frente a 466.8 MPa), aunque ligeramente inferior. La tensión neta en rotura (547.8 MPa) es sensiblemente inferior a la tensión de rotura a tracción estimada para -85 °C (680.5 MPa). Esta diferencia, debida al efecto entalla, debe reducirse al tener en cuenta la verdadera temperatura en el instante de la rotura.

Por otro lado, mientras que la Fig. 5.46c no ofrece nada nuevo respecto a los comportamientos previamente observados, la Fig. 5.46d, al establecer la evolución del CTOD durante el ensayo, muestra una Zona de Transición de comportamientos de baja deformación local hacia otros de mucha mayor deformación asociados al cambio térmico experimentado durante el ensayo. De esta forma, en consonancia con la temperatura de rotura, se contempla un CTOD de 2.7 mm, algo inferior (20%) al observado en el componente de igual entalla a -65 °C.

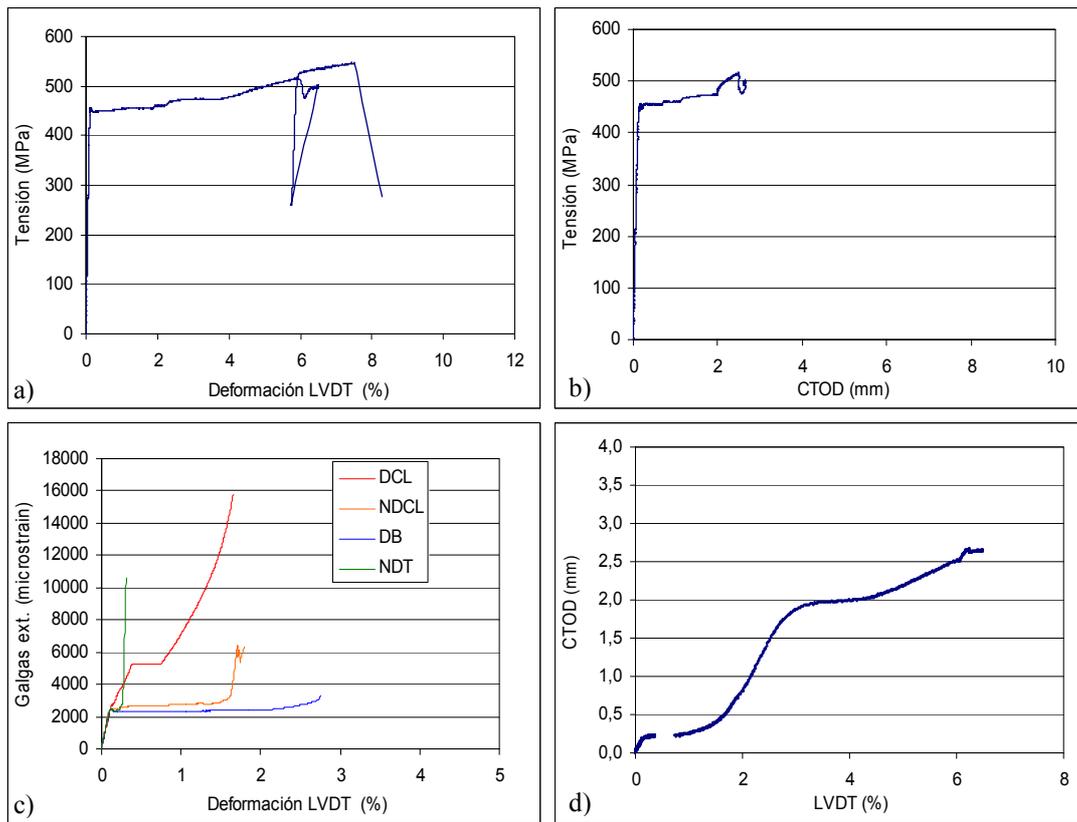


Fig. 5.46. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta entallada Y1A19A5 ($\rho=1.2$ mm). a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

En la Tabla 5.12 se muestran los parámetros resistentes y geométricos del ensayo. Se observa como la carga de rotura y la deformación en rotura son muy superiores a las alcanzadas en la probeta fisurada (especialmente el segundo de los valores), diferencia que debe asociarse a la desviación con respecto a la temperatura teórica observada en este ensayo y a un claro efecto de entalla, factores ambos que reducen la fragilidad del material. Con respecto a la probeta de igual entalla ensayada a -65 °C en chapa de 15.4 mm se observa una tensión y una deformación en rotura muy similares, aunque ligeramente superiores, lo que puede deberse a una menor longitud del defecto (5.04 mm frente a 5.17 mm). Por tanto, teniendo en cuenta la temperatura final del ensayo, los resultados (incluyendo el del CTOD) son coherentes para un comportamiento de transición entre régimen frágil y dúctil.

Tabla 5.12. Profundidad del defecto, tensión, deformación bajo carga máxima y valores de CTOD en el ensayo realizado sobre la probeta Y1A19A5 (espesor 21.3 mm, $\rho = 1.2$ mm).

PROBETA	PROF. DEL DEFECTO (mm)	TENSIÓN ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN EN ROTURA, LVDT (%)	CTOD inicio inestabilidad (mm)	CTOD rotura (mm)
Y1A19A5	5.04	547.8	7.50	2.5	2.7

En las Fig. 5.47 y 5.48 se muestran los datos y correlaciones del ensayo de la probeta Y1A19A7 (entalla de 2.0 mm de radio).

En la Fig. 5.47a se observan, en los termopares próximos al defecto, importantes desviaciones de la temperatura con respecto al valor teórico del ensayo, superando al mismo en rotura con valores de entre 5 °C y 10 °C. En los termopares alejados de la entalla las desviaciones son aún mayores. Como en el caso anterior, es necesario tener en cuenta este aspecto a la hora de interpretar el resto de resultados, considerando que hasta los 500 segundos el ensayo se mantuvo en el rango de los -85 ± 5 °C en la zona del defecto.

La evolución de la carga a lo largo del tiempo (Fig. 5.47b) muestra la zona de comportamiento elasticolineal seguida de la cedencia y del endurecimiento por deformación. También se aprecian una descarga parcial en la parte final del ensayo, coincidente con el momento en que la temperatura empieza a subir.

La deformación de los LVDT (Fig. 5.47c) tiene el aspecto que, salvo en el ensayo realizado a esta misma temperatura en probeta fisurada, se ha ido observando en el resto de ensayos. Cabe destacar el elevado valor del registro alcanzado en rotura, 5 mm mayor que en el caso de la probeta con entalla de 1.2 mm de radio ensayada a la misma temperatura inicial. La diferencia es aún más significativa si se comparan los registros térmicos de ambas probetas. Por lo tanto se observa un aumento de la deformación global en rotura al ir aumentando el radio existente en el fondo del defecto.

Las galgas extensométricas (Fig. 5.47d), como en el resto de los ensayos, identifican el momento en que el efecto de la plastificación local en el fondo de la entalla es apreciable. Finalmente, en el registro de los extensómetros (Fig. 5.47e) se aprecia una zona lineal inicial seguida de otra con mayor pendiente que indica, como sucedía en la probeta previamente analizada, un importante cambio desde valores de baja a alta deformación local. A continuación la señal se estabiliza con valores ligeramente inferiores a los del ensayo anterior, asociados a la

temperatura nominal del ensayo (-85 °C). Después la señal de los extensómetros experimenta un salto brusco asociado a la descarga.

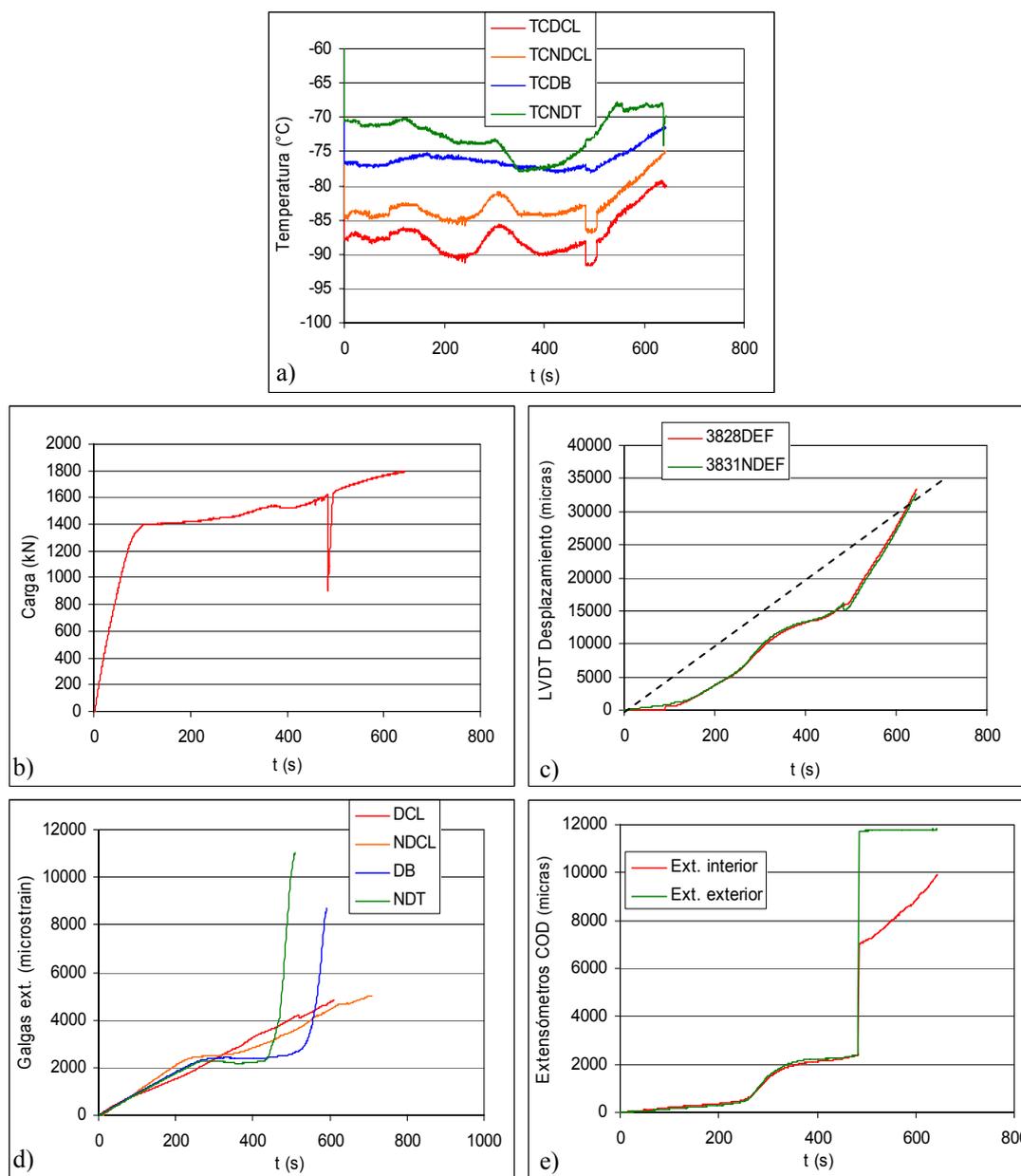


Fig. 5.47. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta entallada Y1A19A7 ($\rho=2.0$ mm).

- a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

En las Fig. 5.48a y 5.48b se aprecian las zonas elástica y plástica de comportamiento de la probeta. La tensión a la cual comienza la plastificación es sensiblemente inferior al límite

elástico estimado (430.0 MPa frente a 466.8 MPa), aunque hay que tener en cuenta que el ensayo se realiza a temperatura mayor que la teórica y por lo tanto este último parámetro sería menor (451.9 MPa si se considera -75 °C la temperatura de ensayo). La tensión neta en rotura (561.7 MPa) es sensiblemente inferior a la tensión de rotura a tracción estimada (680.5 MPa) debido, de nuevo, al efecto conjunto de la entalla y de la temperatura real del ensayo.

Con respecto a las gráficas que relacionan deformaciones globales y locales (Fig. 5.48c y 5.48d), la primera ofrece la respuesta clásica, mientras que en la segunda se aprecian las zonas vistas en los ensayos previos hasta que se produce un salto en la curva debido, probablemente, al deslizamiento de las mordazas. A partir de ese momento, asociado a un incremento de temperatura, el CTOD crece hasta valores muy elevados, superiores incluso a los obtenidos en el “Upper Shelf”, lo que hace cuestionables estos registros.

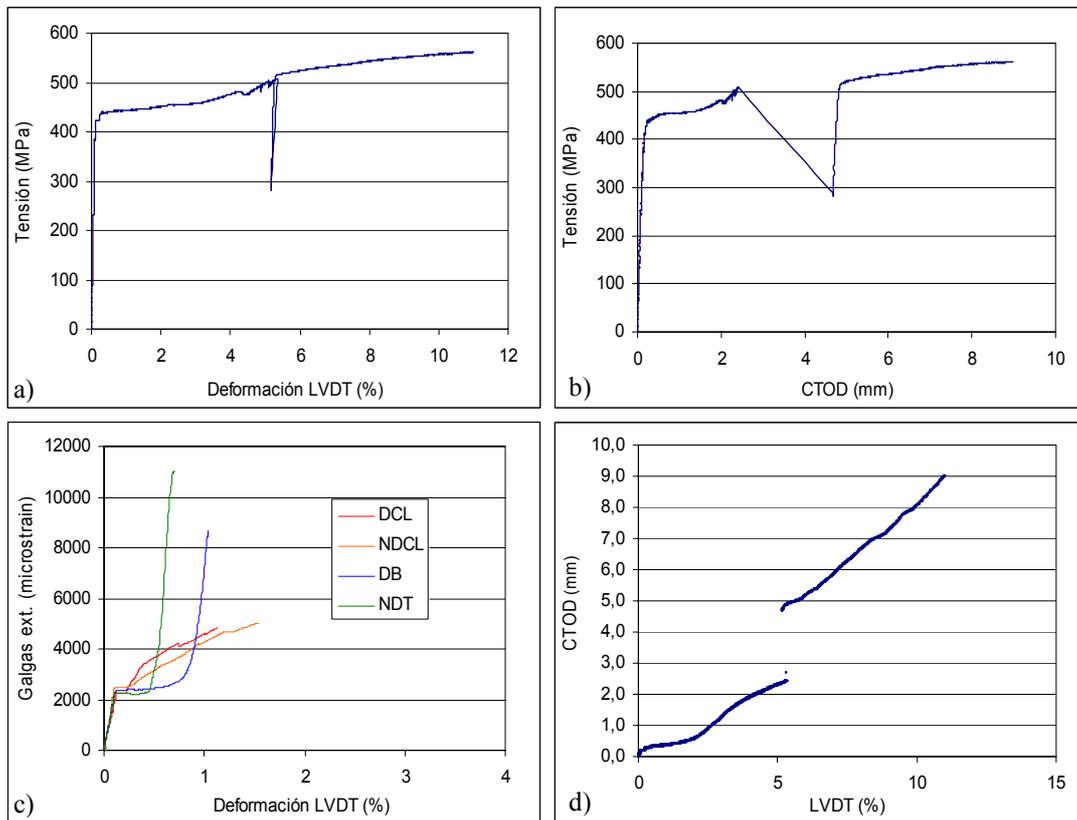


Fig. 5.48. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta entallada Y1A19A7 ($\rho=2.0$ mm). a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

En la Tabla 5.13 se muestran los correspondientes parámetros resistentes y geométricos. Con respecto a los ensayos realizados a la misma temperatura se observa que la tensión de rotura es superior a las de los dos casos anteriores y que la deformación global en rotura también es mucho mayor, especialmente en comparación con la resultante en la probeta fisurada (aunque con ésta no debe compararse por la diferencia de comportamiento entre ellas). Estos resultados confirman que el efecto entalla genera aumentos de la carga y de la deformación en rotura incluso teniendo en cuenta, con referencia a la entalla de 1.2 mm, que en la de 2.0 mm la temperatura en rotura es superior y la longitud del defecto es mayor. El elevado valor del CTOD en rotura, si se compara con cualquiera de los ensayos vistos previamente, hace que no se tenga en cuenta para posteriores análisis al quedar cuestionadas las lecturas obtenidas tras la descarga sufrida en el ensayo.

Tabla 5.13. Profundidad del defecto, tensión, deformación bajo carga máxima y valores de CTOD en el ensayo realizado sobre la probeta Y1A19A7 (espesor 21.3 mm, $\rho = 2.0$ mm).

PROBETA	PROF. DEL DEFECTO (mm)	TENSIÓN ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN EN ROTURA, LVDT (%)	CTOD inicio inestabilidad (mm)	CTOD rotura (mm)
Y1A19A7	5.35	561.7	11.00	-	-

Por último, con respecto a la probeta de igual entalla ensayada a -65 °C en chapa de 15.4 mm, se observa una tensión y una deformación en rotura mayores, por lo que el ensayo no representa una situación de mayor fragilidad como en principio cabía esperar. La razón se encuentra en la desviación experimentada con respecto a la temperatura teórica de ensayo y a la variabilidad de la resistencia a fractura del material en la Zona de Transición.

5.4.4.4. Ensayos a -100 °C en probetas de 21.3 mm de espesor

Se realizaron tres ensayos sobre material procedente de alas de 21.3 mm de espesor (Tabla 5.5) volviéndose a utilizar una probeta fisurada (Y1A19A1), una entallada con radio de entalla de 1.2 mm (Y1A19A4) y otra entallada con radio de entalla de 2.0 mm (Y1A19A6). La temperatura de ensayo se corresponde con la Zona de Transición a temperaturas inferiores a T_0 , por lo que vuelve a suponer una situación de mayor fragilidad que la de los ensayos inmediatamente anteriores.

a) Probeta fisurada

En las Fig. 5.49 y 5.50 se muestran los datos y correlaciones del ensayo de la probeta Y1A19A1.

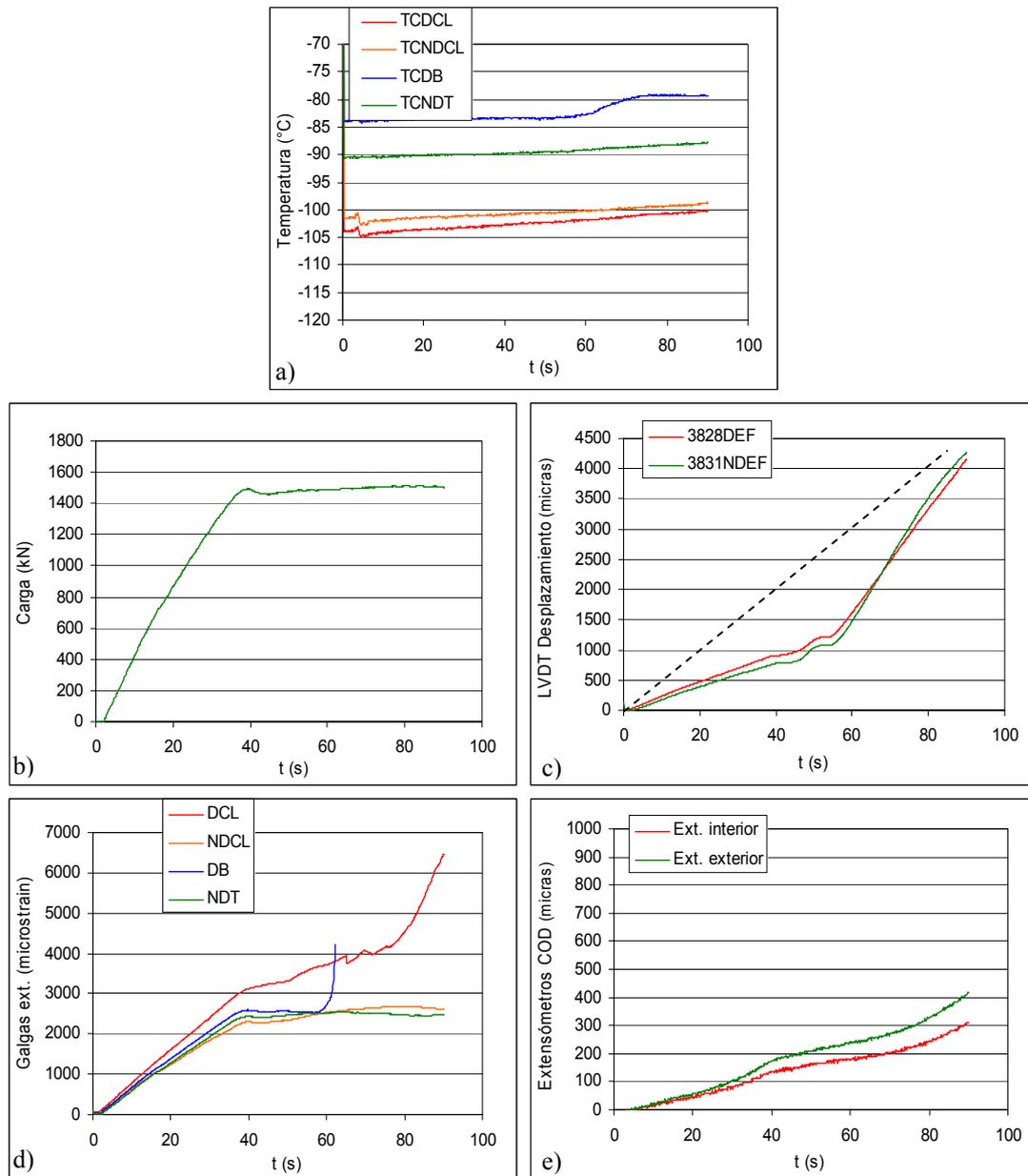


Fig. 5.49. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta fisurada Y1A19A1. a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

En la Fig. 5.49a se observa que las desviaciones máximas de la temperatura con respecto a la temperatura teórica del ensayo son de aproximadamente de entre 1 °C y 2 °C en el momento de la rotura y en los termopares próximos a la zona de proceso (al comienzo del ensayo llega a haber una desviación negativa de 5 °C). En los termopares alejados del defecto la desviación con respecto a los -100 °C llega a ser de más de 20 °C. En todo caso se va a considerar que el

ensayo es representativo del material en temperaturas de la Zona de Transición inferiores a T_0 , en atención a la temperatura de la zona de proceso.

Al contrario que en la mayoría de ensayos vistos hasta el momento, y al igual que ocurrió en la probeta fisurada ensayada a -85 °C , en la Fig. 5.49b se distinguen una zona de comportamiento lineal en régimen elástico seguida de otra en la que la carga permanece más o menos constante (cedencia), sin que se observe endurecimiento por deformación. Destaca la corta duración del ensayo y en consecuencia el pequeño desplazamiento de las mordazas alcanzado en rotura, lo que junto a la poca plastificación apreciada, permite determinar que la rotura se ha producido de forma frágil sin grandes plastificaciones. Todo ello afecta a la escala de las gráficas presentadas.

La Fig. 5.49c (deformación de los LVDT) muestra una evolución lineal inicial propia de la zona elástica seguida de otra de mayor pendiente que lleva hasta la rotura a unos valores de deformación global muy bajos y sólo comparables, hasta el momento, con los alcanzados en la rotura frágil de la probeta fisurada Y1A19A2 (-85 °C). La Fig. 5.49d ofrece la evolución del comportamiento de las galgas, identificándose la aparición del efecto de la deformación local en el fondo de la fisura.

En la Fig. 5.49e (registro de los extensómetros) se aprecia proporcionalidad entre los dos registros, distinguiéndose diferentes tramos con pendientes muy similares. Tanto la lectura de los extensómetros en rotura como la correspondiente a los LVDT son muy inferiores a las observadas en los ensayos realizados sobre probetas fisuradas (un orden de magnitud menor) a -20 °C y -65 °C , y similares a los recogidos en la probeta fisurada ensayada a -85 °C , confirmándose la fragilización ocasionada por la temperatura.

En cuanto a las correlaciones obtenidas, las Fig. 5.50a y 5.50b muestran dos únicas zonas comportamiento del material. La primera elasticolineal, y la segunda correspondiente a la rotura y en la que apenas se ha producido plastificación previa. La tensión a la cual comienza la plastificación es inferior al límite elástico estimado (460.0 MPa frente a 495.0 MPa) y la tensión neta en rotura, que coincide con la anterior, está muy alejada de la tensión de rotura a tracción estimada (682.0 MPa) debido al efecto conjunto de la fisura y de la fragilización ocasionada por la temperatura.

La relación entre deformaciones globales y locales (Fig. 5.50c y 5.50d) muestra dos zonas de comportamiento. La primera se corresponde con la zona elástica y la segunda con el comienzo de las deformaciones plásticas locales que conducen a la inestabilidad. Los valores críticos alcanzados son muy reducidos tanto en deformaciones locales como globales, indicando el comportamiento frágil obtenido propio de la temperatura y de la configuración del defecto.

Cabe destacar el reducido valor del CTOD en rotura, 0.26 mm, el más bajo de los obtenidos en las probetas hasta ahora analizadas.

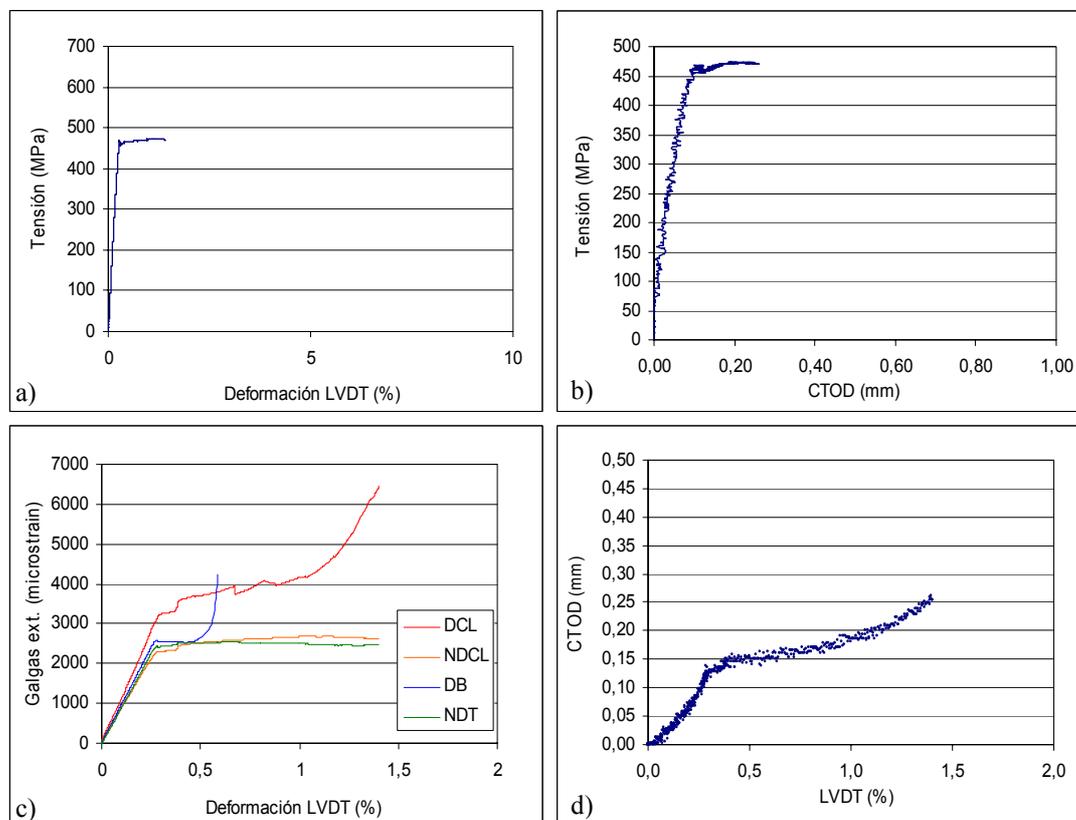


Fig. 5.50. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta fisurada Y1A19A1. a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

En la Tabla 5.14 se muestran los parámetros resistentes y geométricos del ensayo.

Tabla 5.14. Profundidad del defecto, tensión, deformación bajo carga máxima y valores de CTOD en el ensayo realizado sobre la probeta Y1A19A1 (espesor 21.3 mm, fisurada).

PROBETA	PROF. DEL DEFECTO (mm)	TENSIÓN ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN EN ROTURA, LVDT (%)	CTOD inicio inestabilidad (mm)	CTOD rotura (mm)
Y1A19A1	5.56	470.4	1.40	0.26	0.26

b) *Probetas entalladas*

En las Fig. 5.51 y 5.52 se muestran los datos y correlaciones del ensayo de la probeta Y1A19A4, entallada con un radio de 1.2 mm.

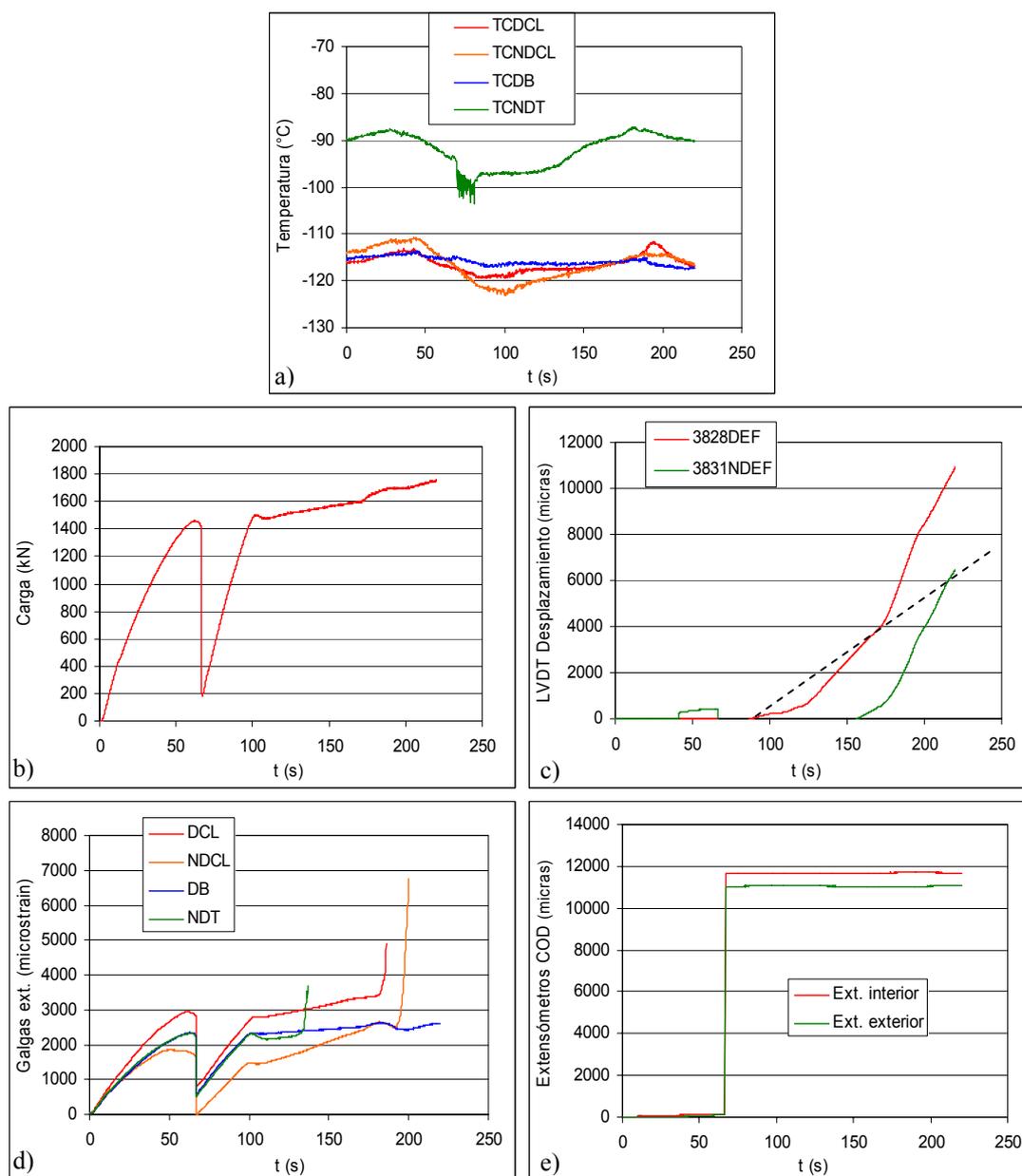


Fig. 5.51. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta entallada Y1A19A4 ($\rho=1.2$ mm).

a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

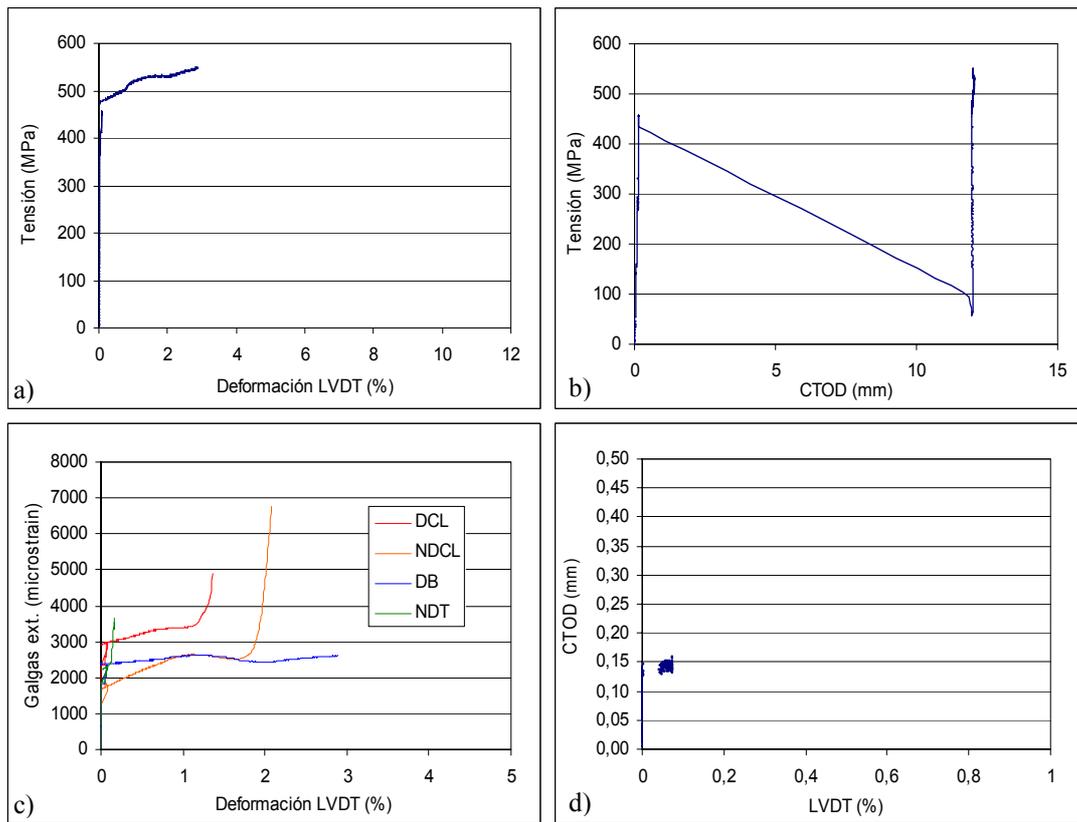


Fig. 5.52. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta entallada Y1A19A4 ($\rho=1.2$ mm). a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

En primer lugar, en la Fig. 5.51a, se observa que las desviaciones de la temperatura son muy elevadas, de tal manera que la temperatura real de ensayo es de -115 °C aproximadamente, es decir, 15 °C inferior a la prevista. En consecuencia, el comportamiento resultará más frágil que el correspondiente a la temperatura teórica del ensayo. El ensayo es representativo del material en temperaturas muy próximas al “*Lower Shelf*”.

En la Fig. 5.51b se observa un deslizamiento en las mordazas que tiene consecuencias en los registros de los LVDT (Fig. 5.51c), las galgas extensométricas (Fig. 5.51d) y los extensómetros (Fig. 5.51e), de tal manera que todos ellos quedan seriamente afectados y no son adecuados para definir el comportamiento de la probeta, si bien se puede decir que éste debe ser semejante al observado en la probeta anterior, con un claro comportamiento frágil. En este caso las deformaciones globales, a pesar de la menor temperatura, son mayores que las observadas en la probeta fisurada, lo que se asocia al efecto de la entalla.

En cuanto a las correlaciones obtenidas, también se ven afectadas por el deslizamiento de las mordazas. Aun así, en la Fig. 5.51a se observa que el componente presenta una zona elástica y otra plástica con endurecimiento. La tensión a la cual comienza la plastificación es inferior al límite elástico estimado (477.0 MPa frente a 495.0 MPa) y la tensión neta en rotura, 547.8 MPa, está muy alejada de la tensión de rotura a tracción estimada (682.0 MPa), debido al efecto conjunto de la entalla y de la fragilización ocasionada por la temperatura.

En la Tabla 5.15 se muestran los parámetros resistentes y geométricos del ensayo. Con respecto a la probeta fisurada ensayada a la misma temperatura (teóricamente) se observa un notable incremento de la tensión de rotura (550.2 MPa frente a 470.4 MPa) y una deformación global en rotura dos veces mayor (2.89 % frente al 1.40 %). Además del efecto entalla, es necesario considerar que en este caso, la profundidad de la entalla (4.82 mm) es notablemente menor que la de la fisura de la probeta Y1A19A1 (5.50 mm), lo que justifica el signo de la relación encontrada.

Tabla 5.15. Profundidad del defecto, tensión, deformación bajo carga máxima y valores de CTOD en el ensayo realizado sobre la probeta Y1A19A4 (espesor 21.3 mm, $\rho=1.2$ mm).

PROBETA	PROF. DEL DEFECTO (mm)	TENSIÓN ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN EN ROTURA, LVDT (%)	CTOD inicio inestabilidad (mm)	CTOD rotura (mm)
Y1A19A4	4.82	550.2	2.89	-	-

Por lo tanto en este ensayo se ha podido apreciar, por una parte, un efecto entalla que permite alcanzar mayores tensiones y deformaciones en rotura (aunque esta situación también viene propiciada por su mayor profundidad del defecto) y, por otra, un efecto fragilizador de la temperatura.

En las Fig. 5.53 y 5.54 se muestran, respectivamente, los datos y correlaciones del ensayo de la probeta entallada Y1A19A6, con un radio de entalla de 2.0 mm.

Tal y como se comentó en el apartado 5.4.3, en este ensayo la probeta falló en un lugar alejado del defecto, por lo que al ser solicitada había dos zonas de proceso actuando simultáneamente (la entalla y el defecto del radio de acuerdo de la probeta que originó el fallo final de la pieza). En consecuencia, cualquier dato tomado en el ensayo se ha visto influenciado por esta circunstancia y no es posible comparar los resultados de este ensayo con los del resto.

Aun no teniendo en cuenta los resultados obtenidos, éstos pueden considerarse un límite inferior de las propias condiciones de ensayo. Desde esta consideración, la probeta entallada muestra una clara pérdida de fragilización asociada a valores tanto globales (LVDT superior al 10%) como locales (CTOD > 4mm). No se conoce el efecto de la profundidad de la entalla.

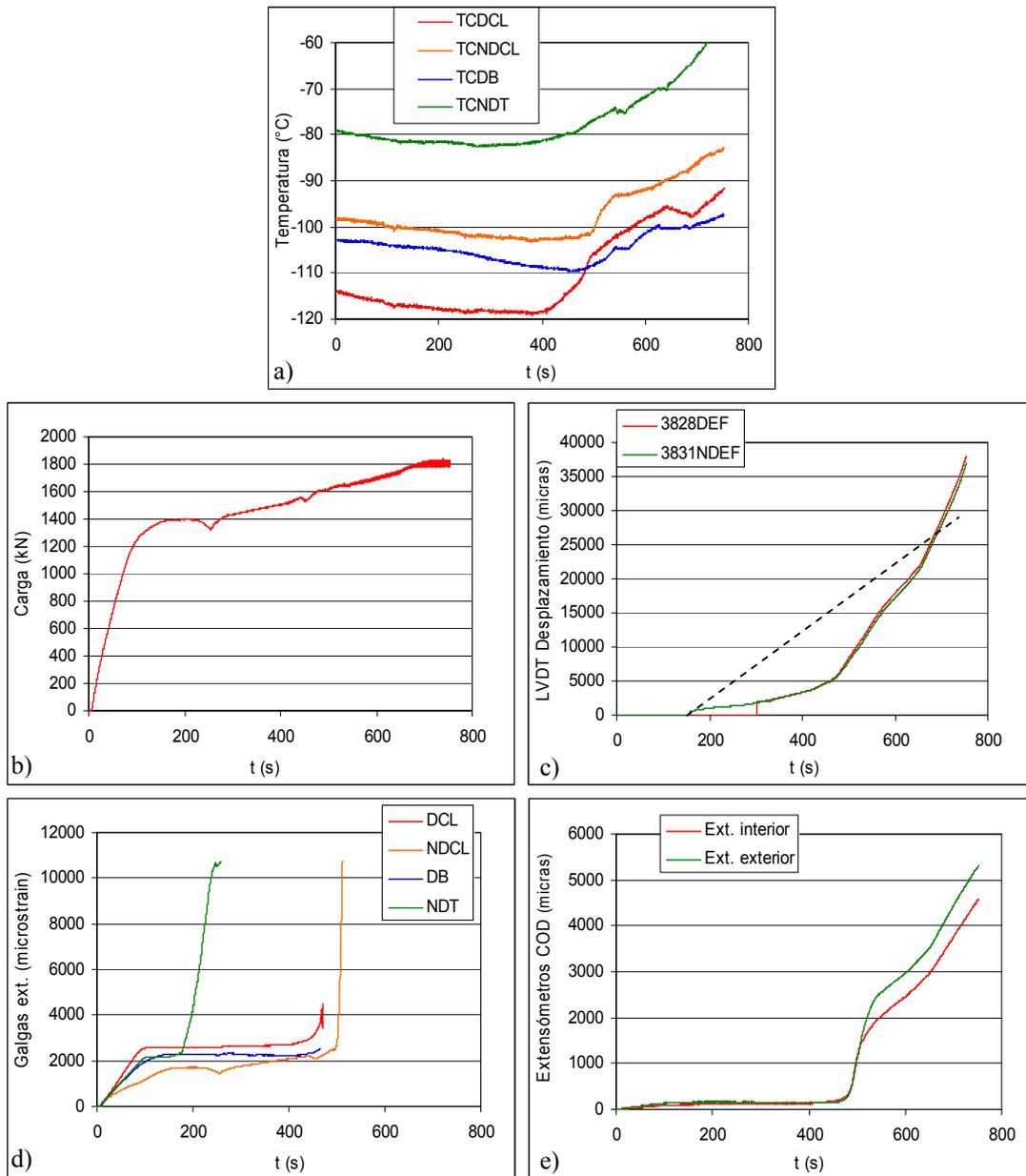


Fig. 5.53. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta entallada Y1A19A6 ($\rho=2.0\text{mm}$).
 a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

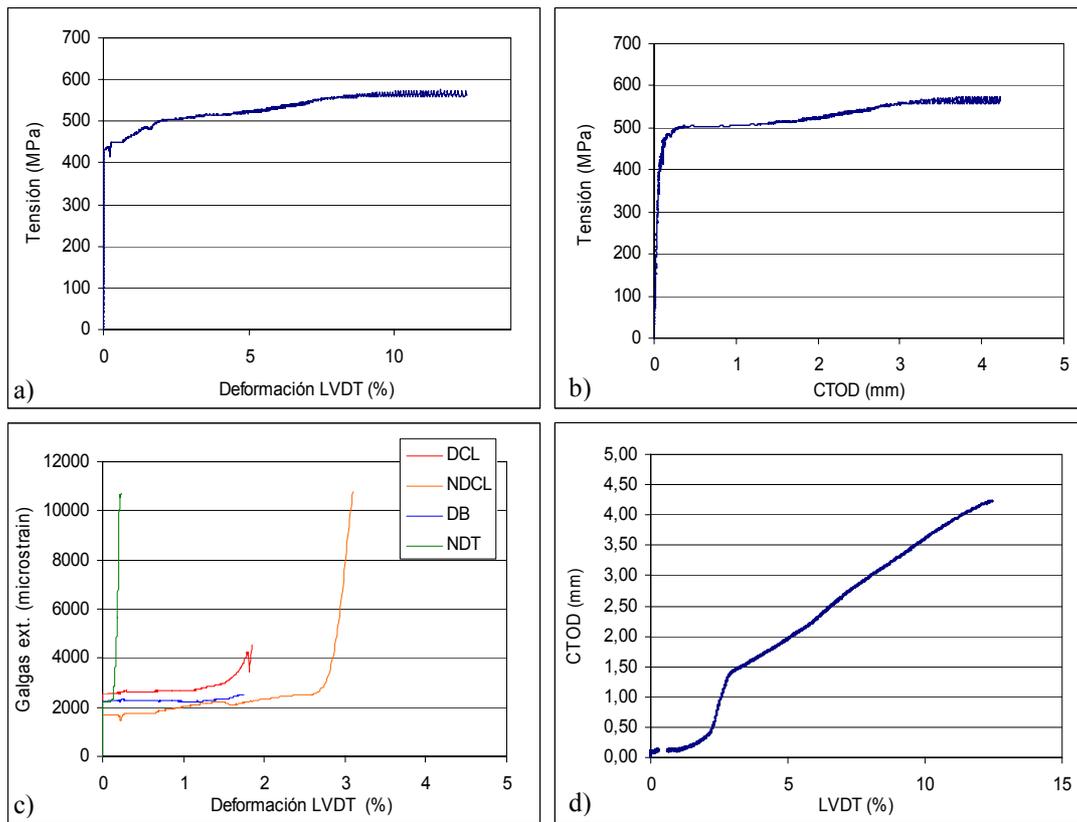


Fig. 5.54. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta entallada Y1A19A6 ($\rho=2.0\text{mm}$). a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

5.4.4.5. Ensayos a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ en probetas de 25.4 mm de espesor

En este último bloque, se realizaron tres ensayos sobre material procedente de alas de 25.4 mm de espesor (Tabla 5.5) volviéndose a utilizar una probeta fisurada (X4M4A1), una entallada con radio de entalla de 1.2 mm (X4M4A2) y otra entallada con radio de entalla de 2.0 mm (X4M4A3). La temperatura de ensayo se corresponde con el “*Lower Shelf*” del material de los perfiles de este espesor y, por lo tanto, con un comportamiento frágil del mismo.

a) Probeta fisurada

En las Fig. 5.55 y 5.56 se muestran, respectivamente, los datos y correlaciones del ensayo de la probeta X4M4A1.

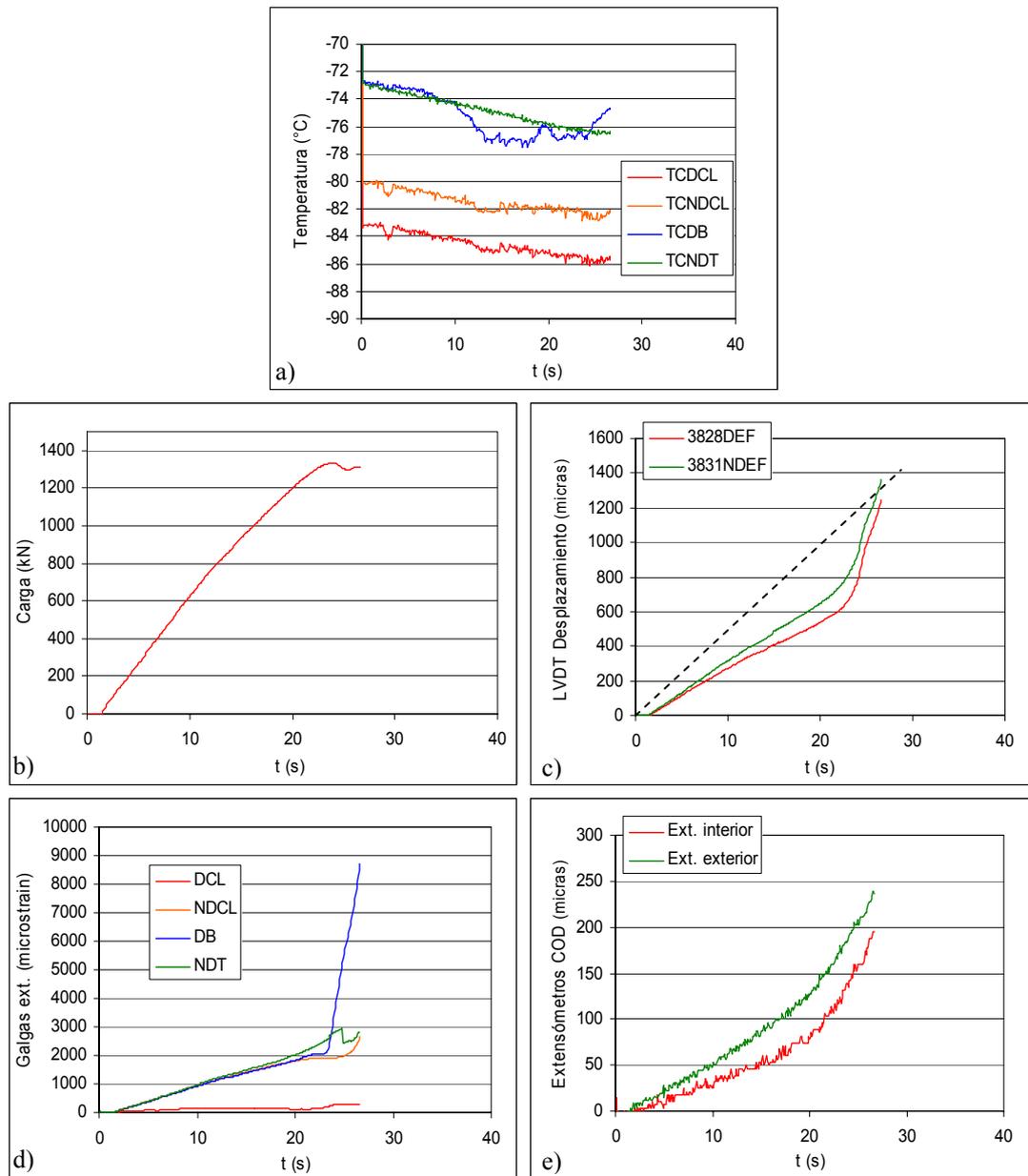


Fig. 5.55. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta fisurada X4M4A1. a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

En la Fig. 5.55a se observa que las temperaturas registradas en las galgas próximas al defecto se desvían (hacia valores más negativos) con respecto a la temperatura teórica de ensayo. En todo caso, las temperaturas se encuentran en pleno “*Lower Shelf*” y son igualmente representativas del comportamiento del material en esa zona.

En la Fig. 5.55b se distinguen una zona de comportamiento lineal seguida de otra en la que la carga permanece más o menos constante (cedencia) y se llega a la rotura. La plastificación es muy reducida y el registro de la carga permite determinar que la rotura se ha producido de forma frágil. Se trata del ensayo más corto en tiempo de los analizados y, por lo tanto, el que menores desplazamientos en cabezales ha experimentado antes de la rotura (menos de la tercera parte que otras probetas fisuradas de comportamiento frágil).

La Fig. 5.55c muestra una evolución lineal inicial del desplazamiento medido en los LVDT en zona elástica, seguida de otra de mayor pendiente, correspondiente al comienzo de la escasa plastificación producida, que lleva hasta la rotura a unos valores de deformación global muy bajos. Éstos son los más reducidos de todos los obtenidos en los ensayos realizados hasta ahora, sólo comparables en cuanto a orden de magnitud con los alcanzados en las roturas frágiles de las probetas fisuradas Y1A19A2 (-85 °C) y Y1A19A1 (-100 °C). Por lo tanto, en probetas fisuradas, el comportamiento en rotura del material ha sido fundamentalmente frágil para temperaturas inferiores a T_0 .

La lectura de las galgas extensométricas (Fig. 5.55d) muestra de nuevo el momento de apreciación del efecto de la plasticidad local.

En la Fig. 5.55e (registro de los extensómetros COD) se aprecia proporcionalidad entre los dos registros, distinguiéndose dos tramos rectos con pendientes muy similares. La primera (con pendiente ligeramente menor) se corresponde con el comportamiento totalmente elástico y la segunda se corresponde con el inicio de las plastificaciones (muy reducidas) en el fondo de la fisura. Tanto la lectura de los extensómetros en rotura como la correspondiente a los LVDT son muy inferiores (un orden de magnitud menor) a las observadas en los ensayos realizados sobre probetas fisuradas a -20 °C y -65 °C, y menores que los recogidos en las probetas fisuradas ensayadas a -85 °C y -100 °C. De esta manera se confirma la progresiva fragilización ocasionada por la disminución de la temperatura, con referencia a los valores respectivos de la T_0 de cada material.

Las Fig. 5.56a y 5.56b muestran dos únicas zonas comportamiento del material, correspondientes al comportamiento elasticolineal y a la rotura (sin apenas plastificación global previa) respectivamente. La tensión a la cual comienza la plastificación es inferior al límite elástico estimado (430.0 MPa frente a 455.7 MPa) y la tensión neta en rotura, que coincide con la anterior, está muy alejada de la tensión de rotura a tracción estimada (680.0 MPa) debido al efecto conjunto de la fisura y de la fragilización ocasionada por la temperatura.

La relación entre deformaciones globales y locales (Fig. 5.56d) muestra dos zonas de comportamiento que se corresponden, respectivamente, con las deformaciones elásticas y el comienzo de las deformaciones plásticas previo a la rotura. Los valores críticos alcanzados son muy reducidos tanto en las deformaciones locales (0.17 mm de CTOD) como globales (elásticas).

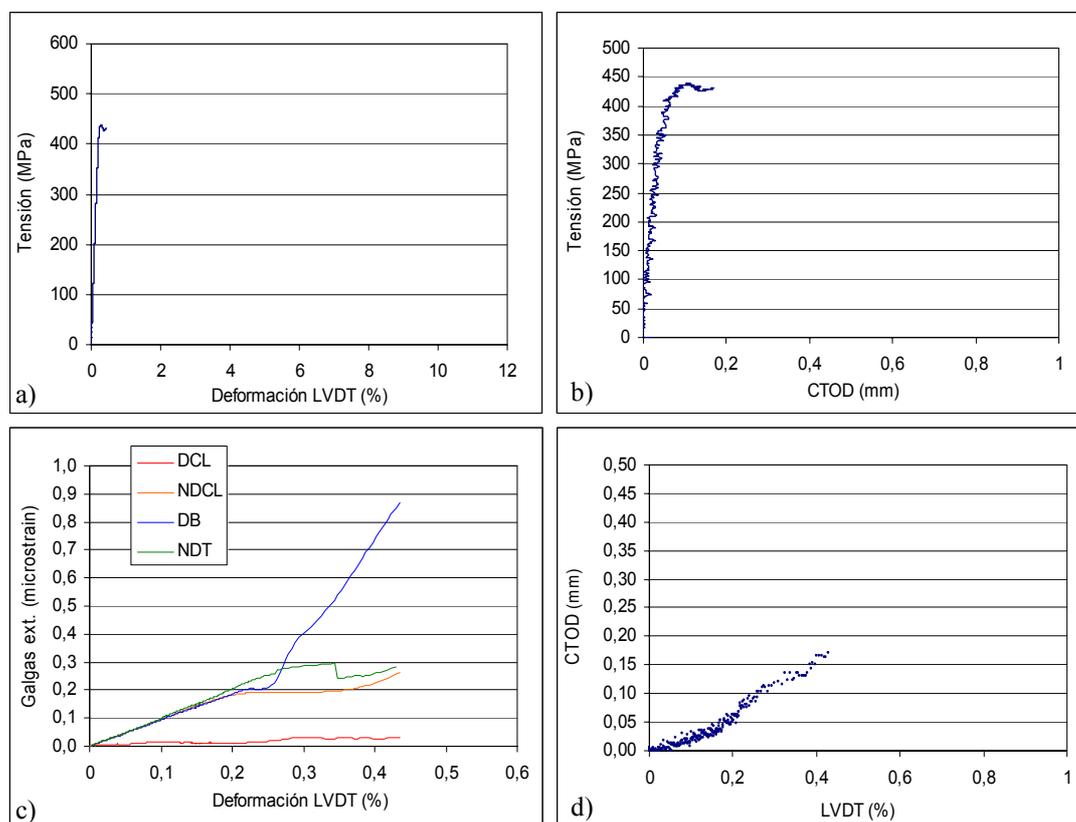


Fig. 5.56. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta fisurada X4M4A1. a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

En la Tabla 5.16 se muestran los parámetros resistentes y geométricos del ensayo.

Tabla 5.16. Profundidad del defecto, tensión, deformación bajo carga máxima y valores de CTOD en el ensayo realizado sobre la probeta X4M4A1 (espesor 25.4 mm, fisurada).

PROBETA	PROF. DEL DEFECTO (mm)	TENSIÓN ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN EN ROTURA, LVDT (%)	CTOD inicio inestabilidad (mm)	CTOD rotura (mm)
X4M4A1	6.00	430.9	0.43	0.17	0.17

b) Probetas entalladas

En las Fig. 5.57 y 5.58 se muestran los datos y correlaciones del ensayo de la probeta entallada X4M4A2 con radio de entalla de 1.2 mm.

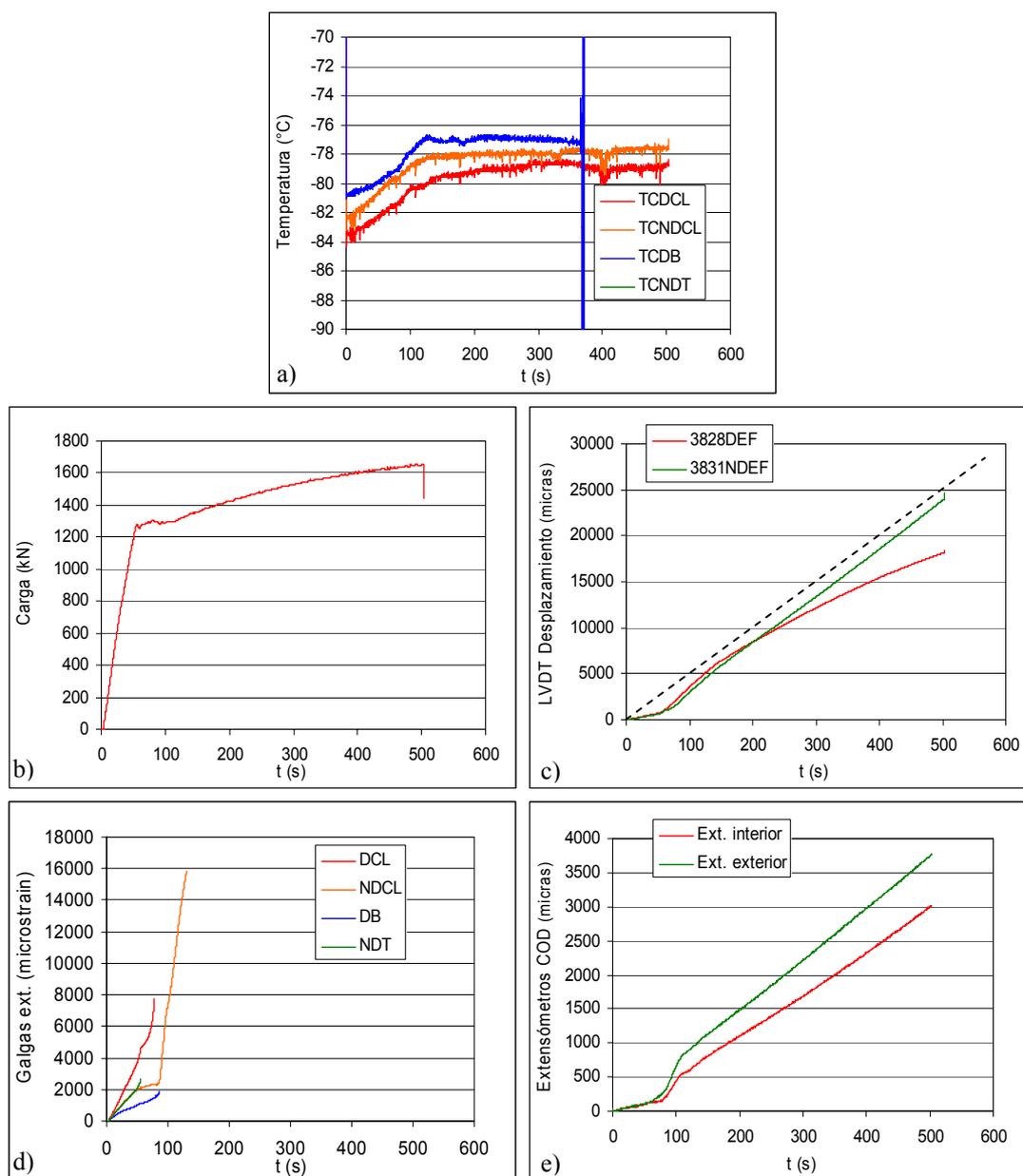


Fig. 5.57. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta entallada X4M4A2 ($\rho=1.2$ mm).
 a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

En la Fig. 5.57a se observan, en los termopares próximos al defecto, ligeras desviaciones de la temperatura (2 °C) con respecto al valor teórico del ensayo. Se considera así que el material se encuentra a temperaturas propias del “*Lower Shelf*”.

En la Fig. 5.57b se observa un comportamiento mucho más plástico que en el ensayo de la probeta fisurada (X4M4A1), distinguiéndose la zona de comportamiento elasticolineal seguida de la cedencia y del endurecimiento por deformación. Al igual que para probetas análogas ensayadas a otras temperaturas (-85 °C y -100 °C en chapas de 21.3 mm de espesor) este comportamiento, comparado con el de componentes fisurados, refleja el hecho de que el efecto entalla genera mayores capacidades de deformación del material, de tal manera que incluso a temperaturas propias del “*Lower Shelf*” es capaz de desarrollar plastificaciones importantes.

La deformación de los LVDT (Fig. 5.57c) tiene dos partes fundamentales. Tras una zona recta correspondiente al comportamiento elasticolineal, la curva aumenta su pendiente, que se mantiene aproximadamente constante y paralela a la teórica, mientras el material va desarrollando su comportamiento plástico. Los registros de los dos LVDT son prácticamente coincidentes en la primera parte del ensayo, aunque el registro de aquel que sigue un comportamiento semejante a los observados previamente en otras probetas se separa apreciablemente en la segunda mitad.

Las galgas ofrecen, como siempre, el instante en el que resulta apreciable el efecto de la plastificación local. Mientras, en el registro de los extensómetros (Fig. 5.57e) se aprecian una zona lineal inicial, propia del comportamiento elástico, seguida de otra con mayor pendiente (plastificación en el fondo del defecto). Les sigue una tercera zona con menor pendiente que llega hasta la rotura.

En las Fig. 5.58a y 5.58b se aprecian las zonas elasticolineal y plástica de comportamiento del material, a pesar de realizarse el ensayo a temperaturas propias de estados de elevada fragilización. La tensión a la cual comienza la plastificación coincide aproximadamente con el límite elástico estimado (427.0 MPa frente a 455.7 MPa), aunque es ligeramente inferior, y la tensión neta en rotura (544.1 MPa) es sensiblemente inferior a la tensión de rotura a tracción estimada (680.0 MPa).

En la relación entre deformaciones globales y locales (Fig. 5.58c y 5.58d) vuelven a apreciarse las zonas vistas en los ensayos en los que se ha producido plasticidad, aunque las diferencias de pendiente entre los distintos tramos de la curva de relación CTOD-LVDT son menores y, por lo tanto, se distinguen con mayor dificultad. Se observa en cualquier caso que el CTOD en rotura alcanza un valor de 2.7 mm, muy superior al obtenido en la probeta fisurada.

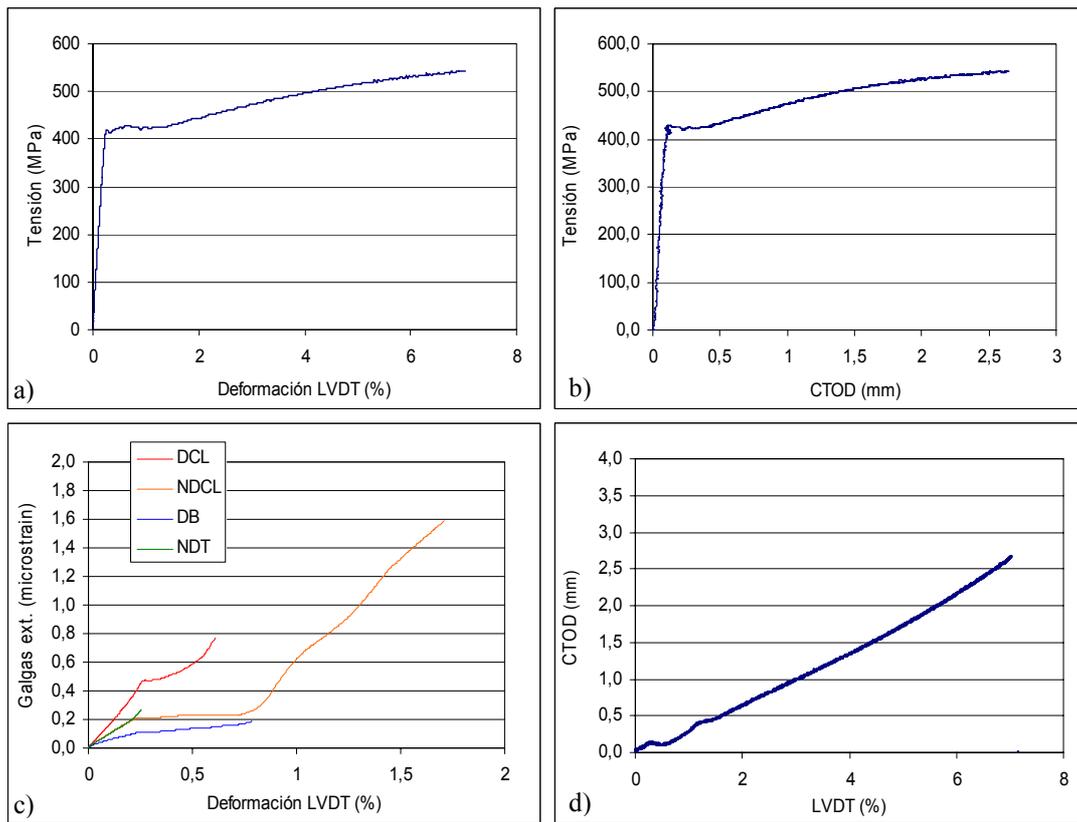


Fig. 5.58. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta entallada X4M4A2 ($\rho=1.2$ mm). a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

En la Tabla 5.17 se muestran los parámetros resistentes y geométricos del ensayo. Se observa que la carga de rotura y la deformación en rotura son muy superiores a las alcanzadas en la probeta fisurada, especialmente la deformación. Esto está asociado al cambio de comportamiento que experimenta el material, que pasa de elástico frágil a elastoplástico. Por lo tanto, se aprecia un efecto de entalla que reduce la fragilidad del material. Con respecto a las probetas de igual entalla ensayadas a -65 °C (chapa de 15.4 mm) y -85 °C y -100 °C (chapa de 21.3 mm) se observa una tensión y una deformación en rotura muy similares a las de los dos primeros casos y una deformación en rotura casi tres veces mayor que en la tercera, ya que aunque teóricamente representa un estado menos frágil del material, su temperatura final de ensayo (<100 °C) puede justificar dicha diferencia. Por lo tanto, el efecto de la fragilización, que es claro y notable en probetas fisuradas, no se aprecia de forma evidente en el caso de las probetas con entallas de 1.2 mm de radio, cuyo efecto es equivalente a una traslación hacia valores menores de la Temperatura de Referencia T_0 .

Tabla 5.17. Tensión, deformación bajo carga máxima y profundidad del defecto en el ensayo realizado sobre la probeta X4M4A2 (espesor 25.4 mm, $\rho=1.2$ mm).

PROBETA	PROF. DEL DEFECTO (mm)	TENSIÓN ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN EN ROTURA, LVDT (%)	CTOD inicio inestabilidad (mm)	CTOD rotura (mm)
X4M4A2	5.00	544.1	7.03	2.5	2.7

En las Fig. 5.59 y 5.60 se muestran los datos y correlaciones del ensayo de la probeta entallada X4M4A3, con 2.0 mm de radio entalla.

En la Fig. 5.59a se observa que los registros de los termopares situados junto al defecto llegan a desviarse de la temperatura teórica de ensayo (-80 °C) unos 8 °C (hacia temperaturas menores) y en rotura registran una temperatura muy próxima a los -80 °C. En definitiva, el estado del material es representativo de su comportamiento en el “*Lower Shelf*”.

La evolución de la carga a lo largo del tiempo (Fig. 5.59b) muestra la zona de comportamiento elasticolineal seguida de la cedencia y del endurecimiento por deformación. Las plastificaciones alcanzadas en rotura son muy elevadas a pesar de la baja temperatura de ensayo.

La deformación de los LVDT (Fig. 5.59c) muestra una lectura inicial de menor pendiente correspondiente al comportamiento elasticolineal en la que coinciden los registros de los dos LVDT. Le sigue la lectura correspondiente al comportamiento plástico del material, en la cual se separan las lecturas de ambos LVDT y en la que toma valores mayores el registro del situado en la cara sin defecto siendo el único, de todos los casos ensayados, que supera con pendiente constante a la relación teórica. La deformación global alcanzada en rotura es mayor que la alcanzada en la probeta X4M4A2 (entalla con $\rho=1.2$ mm) y muy superior a la correspondiente a la probeta fisurada (X4M4A1), siendo por tanto perceptible el efecto de entalla.

Los registros de las galgas ofrecen el mismo comportamiento de ensayos anteriores (Fig. 5.59d). En la Fig. 5.59e, que registra la señal de los extensómetros COD, se aprecia una zona lineal inicial seguida de otra con mayor pendiente debida a la plastificación en el fondo de entalla. A continuación se inicia una extensa zona de menor pendiente que lleva a la rotura. Los fenómenos asociados a cada tramo han sido explicados con anterioridad.

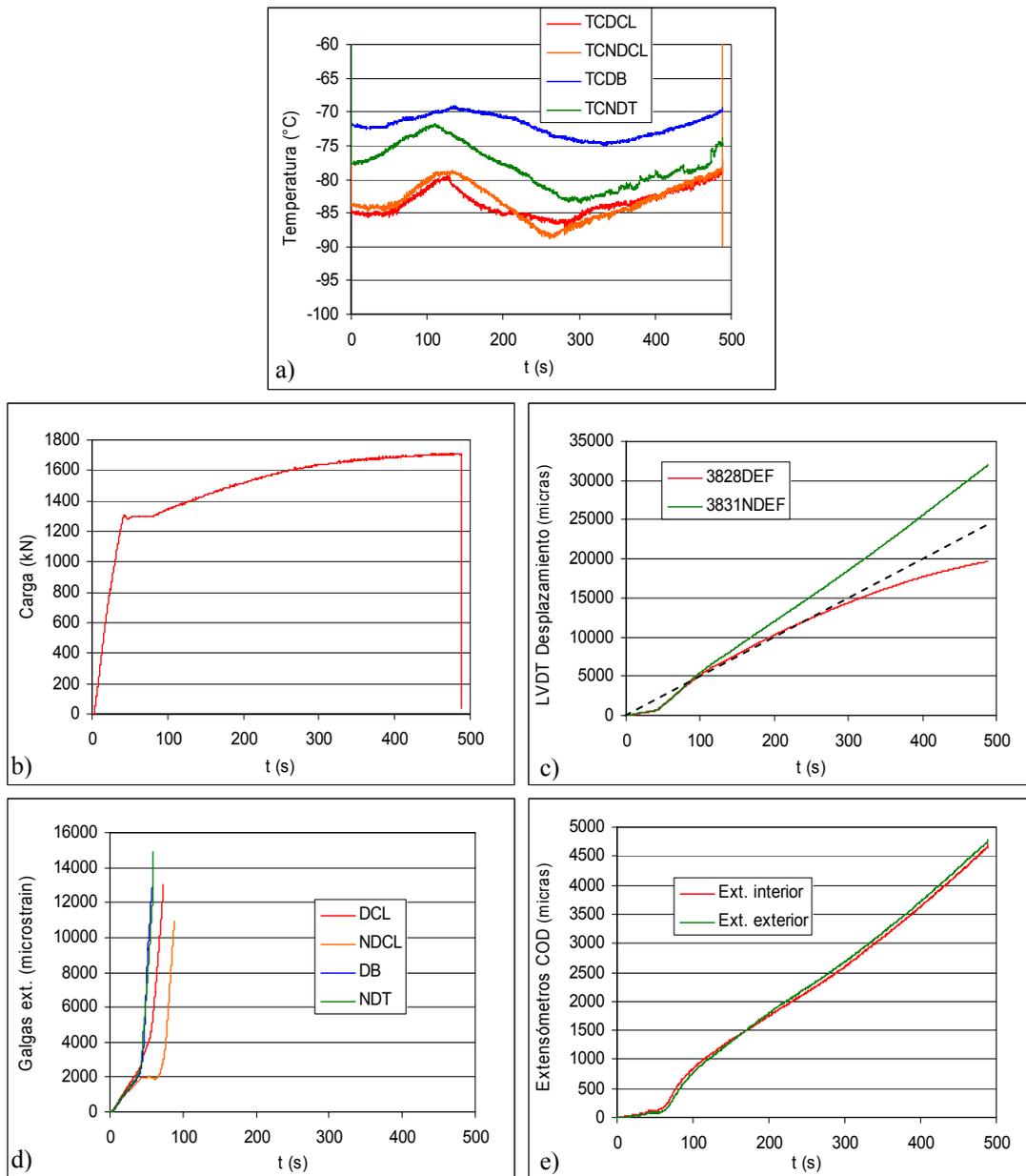


Fig. 5.59. Lecturas de los registros obtenidos en el ensayo de la probeta entallada X4M4A3 ($\rho=2.0$ mm).

a) Registro Temperatura-tiempo; b) Carga aplicada-tiempo; c) Lecturas de los LVDT-tiempo; d) Lecturas de las galgas extensométricas-tiempo; e) Lectura de los extensómetros-tiempo.

En las Fig. 5.60a y 5.60b se distinguen las zonas elástica y plástica de comportamiento del material. La tensión a la cual comienza la plastificación es ligeramente inferior al límite elástico estimado (423.0 MPa frente a 455.7 MPa) y la tensión neta en rotura (556.4 MPa) es notablemente inferior a la tensión de rotura a tracción estimada (680.0 MPa) debido al efecto conjunto de la entalla y de la temperatura.

Con respecto a las deformaciones globales y locales (Fig. 5.60c y 5.60d) se aprecian las zonas vistas anteriormente en los ensayos previos en los que no se produjo rotura totalmente frágil. Destaca que en la evolución del CTOD se puede apreciar un valor de iniciación de la inestabilidad (3.0 mm) previo al de rotura (4.6 mm).

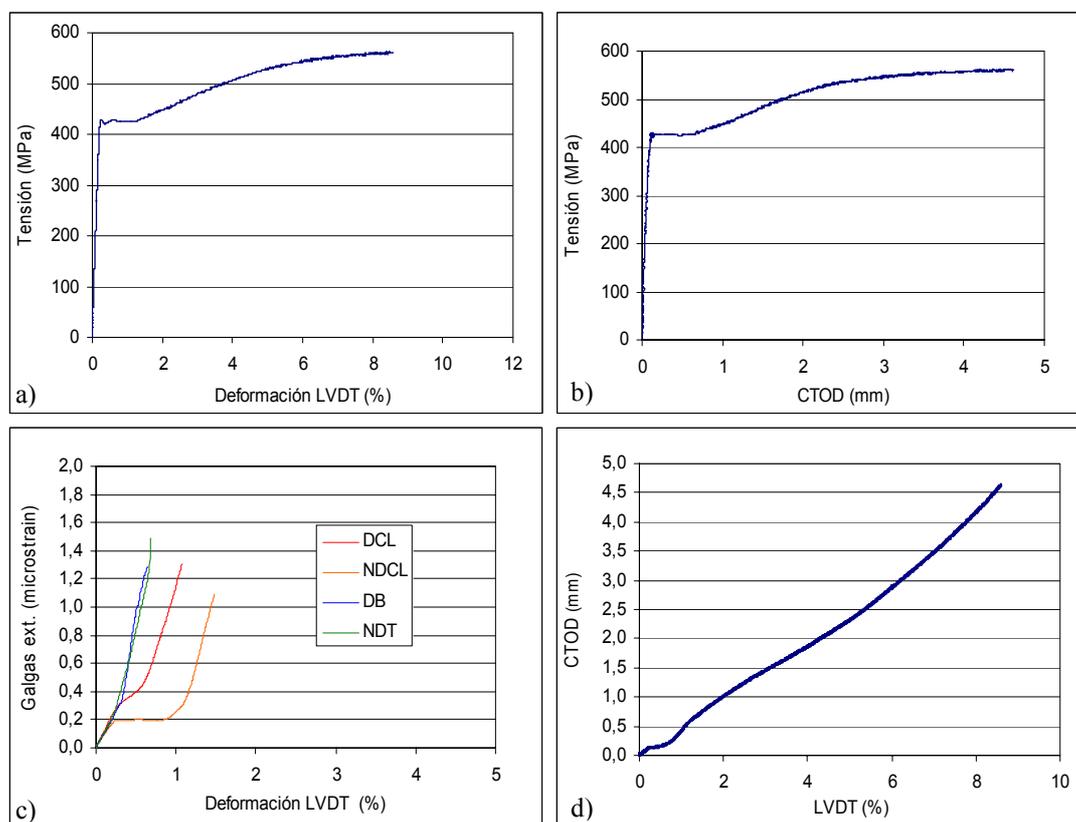


Fig. 5.60. Correlaciones obtenidas entre los datos del ensayo de la probeta entallada X4M4A3 ($\rho=2.0$ mm). a) Relación Tensión-Deformación en LVDT; b) Tensión-CTOD; c) Deformación local (galgas)-Deformación global (LVDT); d) CTOD-Deformación en LVDT.

La Tabla 5.18 muestra los parámetros resistentes y geométricos asociados al ensayo. Con respecto a los ensayos realizados a la misma temperatura se observa que la tensión y la deformación en rotura son mayores que las de los dos casos anteriores. Especialmente significativa es la diferencia con respecto a la probeta fisurada: 8.60 % frente a 0.43 % de deformación en rotura y un incremento de casi un 30% en la tensión de rotura. El efecto entalla queda por lo tanto puesto de manifiesto una vez más. En comparación con las probetas con igual defecto ensayadas en teóricas condiciones de menor fragilización, no se observa un claro efecto fragilizador, presentándose en todos los casos roturas con elevada plasticidad.

Tabla 5.18. Tensión, deformación bajo carga máxima y profundidad del defecto en el ensayos realizado sobre la probeta X4M4A3 (espesor 25.4 mm, $\rho = 2.0$ mm).

PROBETA	PROF. DEL DEFECTO (mm)	TENSIÓN ROTURA (MPa)	DEFORMACIÓN EN ROTURA, LVDT (%)	CTOD inicio inestabilidad (mm)	CTOD rotura (mm)
X4M4A3	5.00	556.4	8.60	3.0	4.6

5.4.5. Observaciones derivadas de los resultados

La Tabla 5.19 muestra conjuntamente la carga y la deformación en rotura (junto a la profundidad del defecto asociado) de los ensayos analizados, así como el parámetro que permite ofrecer directamente una referencia de la tenacidad del ensayo: el valor crítico del CTOD, tanto en el inicio de la inestabilidad que conduce a la rotura (cuando ha sido posible distinguirlo como consecuencia de posibles desgarros o daños locales) como el último en rotura.

La principal conclusión obtenida de los resultados experimentales es que, para una temperatura dada, tanto la carga como la deformación en rotura aumentan con el radio existente en el fondo del defecto. Esta situación es más acusada cuanto menor es la temperatura con respecto a la temperatura T_0 de cada material. Así, mientras que en el “Upper Shelf” la variación de los resultados de tensiones de rotura entra en el rango de la dispersión de los ensayos, en el “Lower Shelf” la variación alcanza casi un 30%. En cuanto a la deformación, los cambios importantes en valores relativos se producen para temperaturas inferiores a la T_0 , para las que cambia el comportamiento de los componentes: frágil con rotura en régimen prácticamente elástico en el caso de las fisuradas (ε_{\max} en el orden de 0.5-1.5%) y dúctil con rotura tras un proceso de plasticidad global, con cedencia y endurecimiento para los materiales seleccionados, en el caso de las entalladas (ε_{\max} en el orden de 7-11%, dependiendo del radio de entalla y de la temperatura).

Como complemento, la Fig. 5.61 muestra los valores de la deformación bajo carga máxima en función del radio de entalla y el estado de comportamiento del material. En todos los casos se observa un progresivo aumento de la deformación global en rotura, siendo este fenómeno más acusado cuanto más frágil sea la rotura en presencia de fisura. El efecto de entalla apenas es apreciable para condiciones de ensayo por encima de T_0 . En cambio, en las proximidades de la misma se produce una transición asociada a la entalla, desde condiciones de fragilidad en rotura en probetas fisuradas a condiciones dúctiles en probetas entalladas. En este tránsito sólo se ofrece una solución intermedia para una probeta entallada de radio 1.2 mm ensayada a -110 °C.

Esto significa que el efecto entalla puede ser considerado como una traslación en la Temperatura de Referencia que para 1.2 mm de radio alcanza un valor superior a 30 °C. Debe recordarse que en este mismo rango de 30 °C se establecía la traslación de la Curva Maestra para probetas normalizadas entalladas de 1.2 mm de radio.

Tabla 5.19. Tensiones y deformaciones en rotura de los distintos ensayos realizados. US:Upper Shelf, ZT:Zona de Transición, T₀:Temperatura de Transición, LS:Lower Shelf, CTOD_{ii}: CTOD en el inicio de la inestabilidad, CTOD_c: CTOD en rotura.

Condición de ensayo	Probeta	Tensión de Rotura (MPa)	Deformación en rotura (%)	Profundidad del defecto (mm)	CTOD _{ii} (mm)	CTOD _c (mm)
-20 °C (US) 21.3 mm	Y1A19A3 (ρ~0 mm)	510.2	8.36	5.42	3.0	5.3
	Y1A19A8 (ρ=2.0 mm)	511.7	11.03	5.12	3.8	5.7
-65 °C (ZT, T>T₀) 15.4 mm	Y1A13A1 (ρ~0 mm)	514.4	6.02	5.50	2.8	3.3
	Y1A13A2 (ρ=1.2mm)	526.2	7.03	5.17	3.3	3.3
	Y1A13A3 (ρ=2.0 mm)	530.3	7.94	5.36	2.6	3.0
-85 °C (ZT, T=T₀) 21.3 mm	Y1A19A2 (ρ~0 mm)	462.9	0.55	5.53	0.30	0.30
	Y1A19A5 (ρ=1.2 mm)	547.8	7.50	5.04	2.5	2.7
	Y1A19A7 (ρ=2.0 mm)	561.7	11.00	5.35	-	-
-100 °C (ZT, T<T₀) 21.3 mm	Y1A19A1 (ρ~0 mm)	470.4	1.40	5.56	0.26	0.26
	Y1A19A4 (ρ=1.2 mm), -110 °C	550.2	2.89	4.82	-	-
	Y1A19A6 (ρ=2.0 mm)	Rotura alejada del defecto				> 4.2
-80 °C (LS) 25.4 mm	X4M4A1 (ρ~0 mm)	430.9	0.43	6.00	0.17	0.17
	X4M4A2 (ρ=1.2 mm)	544.1	7.03	5.00	2.5	2.7
	X4M4A3 (ρ=2.0 mm)	556.4	8.60	5.00	3.0	4.6

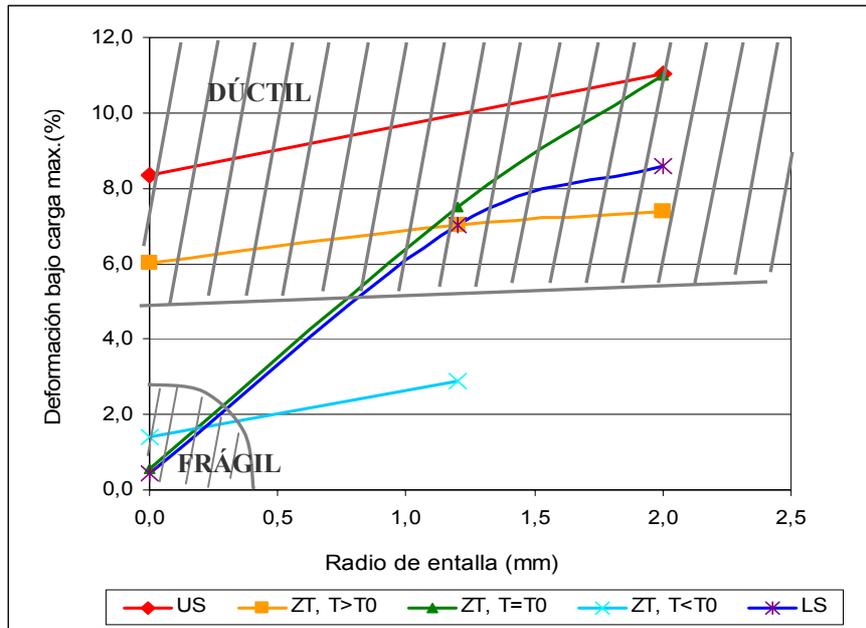


Fig. 5.61. Relación existente entre la deformación alcanzada bajo carga máxima y el radio de entalla de la probeta. US: Upper Shelf, ZT: Zona de Transición, T0: Temperatura de Transición, LS: Lower Shelf

La Fig. 5.62 muestra la relación existente entre el radio de entalla y la tensión de rotura para los diferentes estados del material. Puede observarse que mientras para estados del material correspondientes al “Upper Shelf” o la parte alta de la Zona de Transición el efecto de la entalla en la carga de rotura es muy moderado, este efecto aumenta progresivamente a medida que el material alcanza estados de mayor fragilidad.

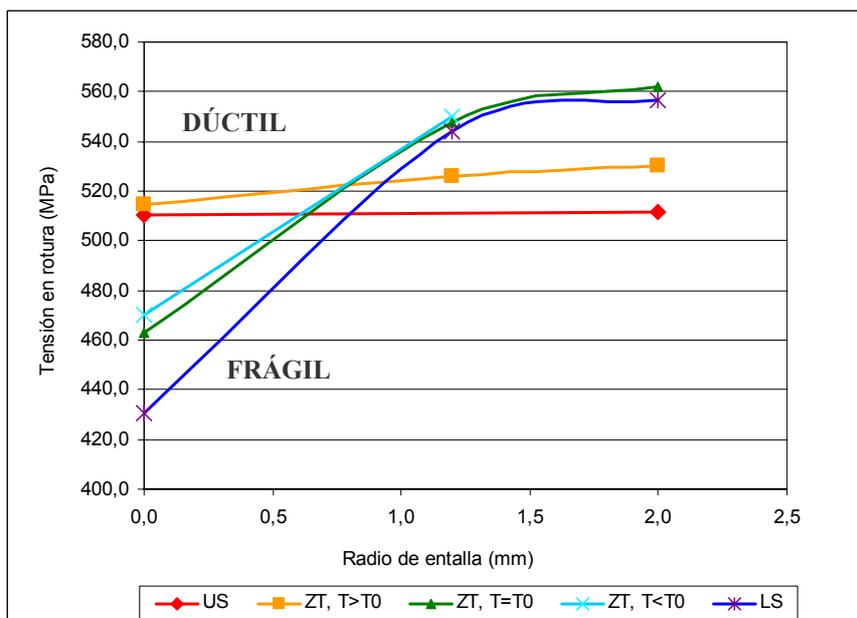


Fig. 5.62. Relación existente entre la tensión de rotura y el radio de entalla de la probeta. US: Upper Shelf, ZT: Zona de Transición, T0: Temperatura de Transición, LS: Lower Shelf

En definitiva, mediante la experimentación recogida en este capítulo se ha demostrado un claro efecto del radio de entalla tanto en la carga como en la deformación global en rotura. Este efecto es tanto mayor cuanto más frágil sea el estado del material. Fijándonos en la totalidad de los registros de los ensayos, se puede observar como para una determinada zona de comportamiento a fractura (“*Upper Shelf*”, Zona de Transición o “*Lower Shelf*”), a medida que aumenta el radio de entalla se produce un comportamiento del material mucho menos frágil. El resultado final es que temperaturas que en componentes fisurados se corresponden con el “*Lower Shelf*”, en componentes entallados se corresponden con otras zonas de comportamiento (Zona de Transición e incluso “*Upper Shelf*”). Un ejemplo de este fenómeno se muestra en la Fig. 5.63, en la que se compara el registro tensión aplicada-deformación registrada en los LVDT para dos probetas de igual espesor, situadas ambas en el “*Lower Shelf*” del material fisurado y cuya diferencia se encuentra en que una está fisurada (X4M4A1) y la otra tiene una entalla de 2.0 mm de radio (X4M4A3).

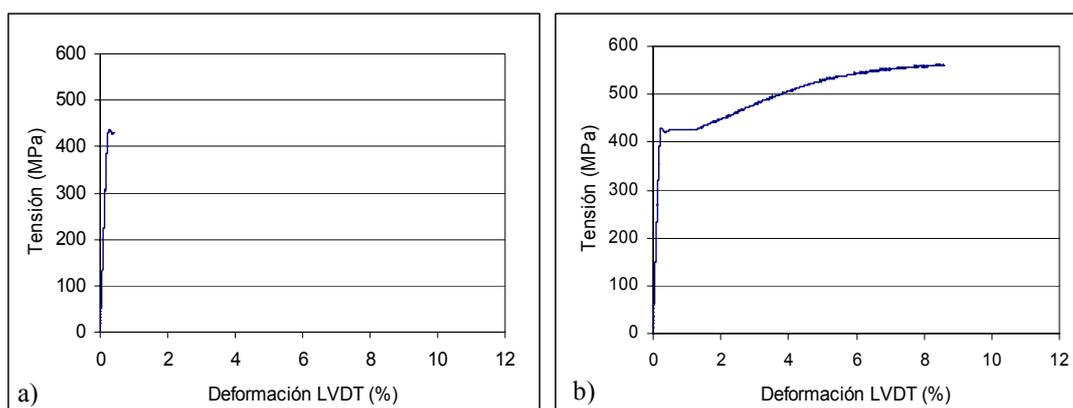


Fig. 5.63. Curvas tensión-deformación en LVDT para las probetas X4M4A1 (a) y X4M4A3 (b), de igual espesor y ensayadas a igual temperatura, estando la primera fisurada y la segunda entallada ($\rho=2.0$ mm).

El efecto entalla, apreciado en la deformación bajo carga máxima y en la tensión de rotura como consecuencia del cambio de mecanismos de rotura, tiene también su reflejo en los valores de resistencia a fractura alcanzados. Esto se refleja en la Fig. 5.64, en la que se muestra el valor del CTOD en rotura ($CTOD_c$) en función del radio de entalla para cada temperatura ensayada. La figura ofrece las mismas condiciones de tránsito desde roturas frágiles para temperaturas bajas ($CTOD_c$ en el orden de 0.15-0.30 mm) a roturas dúctiles ($CTOD_c$ de 3 a 6 mm).

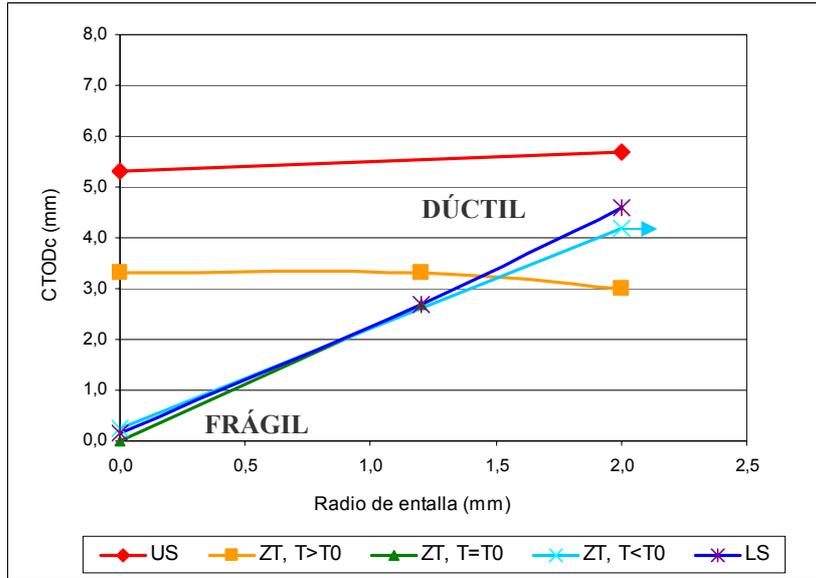


Fig. 5.64. Relación existente el CTOD en rotura ($CTOD_c$) y el radio de entalla de la probeta. US: Upper Shelf, ZT: Zona de Transición, T_0 : Temperatura de Transición, LS: Lower Shelf

Finalmente, la diferencia de comportamiento tiene una clara respuesta en la relación entre deformaciones locales y globales ($CTOD-LVDT$) en el tránsito de comportamiento frágil a comportamiento dúctil. El primero queda condicionado por las condiciones locales, que al hacerse críticas a valores mínimos (<0.3 mm) evitan el desarrollo de deformaciones globales, mientras que el segundo permite el desarrollo de estas últimas. La Fig. 5.65 muestra la diferencia entre ambos, incluyendo los grandes cambios experimentados en los valores de la capacidad de deformación. Se muestran tres curvas diferentes (probetas Y1A19A3, X4MAA1 y Y1A19A1), representativas respectivamente de los estados dúctil, frágil y de transición.

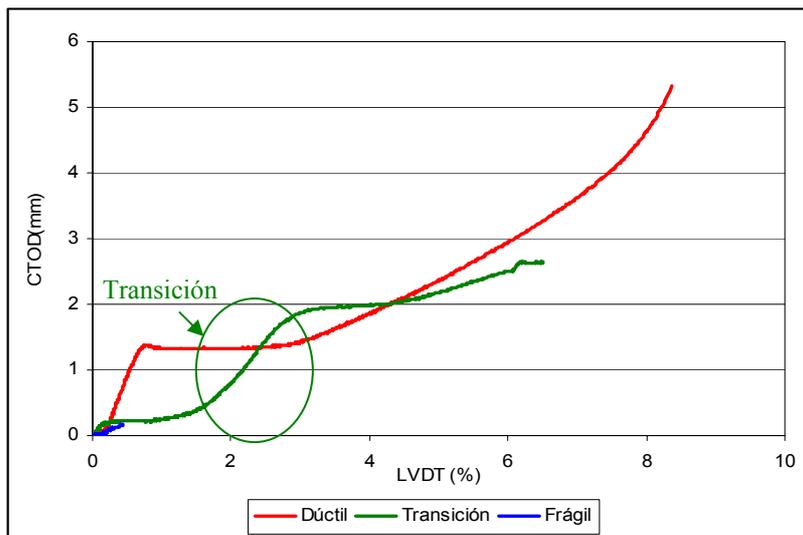


Fig. 5.65. Relación entre deformaciones locales y globales para los distintos tipos de comportamiento del material.