

RECONSTRUCCION DE PROBETAS CHARPY: ESTUDIO COMPARATIVO MEDIANTE PENDULO INSTRUMENTADO

J. Lapeña, F. J. Perosanz, J. Serrano

CIEMAT Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas
Avda. Complutense 22, Madrid 28040 (ESPAÑA)

Resumen: La posibilidad de extensión de vida de las Centrales Nucleares actualmente en explotación reviste ciertos problemas en cuanto al número de probetas de material irradiado existentes en las cápsulas de vigilancia. Un método muy útil para incrementar el número disponible de estas probetas es la reconstrucción de las mismas previo ensayo. En el presente trabajo, ha sido llevada a cabo la reconstrucción de probetas Charpy-V mediante "Stud Welding", y posteriormente ensayadas en un péndulo instrumentado. Los resultados muestran una buena correlación entre las probetas originales y las reconstruidas. Han sido detectadas desviaciones de los datos a altas temperaturas de ensayo, justificadas por la existencia de la ZAT que interfiere en el crecimiento dúctil de la grieta.

Abstract: The possibilities of life extension of nuclear power plants cause a problem because the specimens introduced in the surveillance capsules, to assess the material behaviour, are limited. Reconstitution after testing is a very useful method to increase the number of these specimens. In this paper, reconstitution of Charpy-V specimens has been carried out by Stud Welding, followed by testing in an instrumented Charpy. Results show a good correlation between normal and reconstituted specimens. Discrepance at high temperature is justified by the existence of a heat affected zone that interferes the ductile crack growth.

INTRODUCCION

La reutilización de material irradiado perteneciente a las cápsulas de vigilancia de reactores nucleares es un tema que desde comienzos de los años ochenta hasta la actualidad viene siendo estudiado por diversos grupos de investigación en todo el mundo. Este interés viene apoyado por la posibilidad de alargar la vida útil de plantas actualmente en explotación que se acercan al final de su vida prevista de diseño. La reutilización de este material ya irradiado representativo del daño acumulado de la vasija, es de vital importancia de cara a la prolongación de vida propuesta.

En principio, para dicha reutilización cualquier procedimiento de reconstrucción podría ser válido, incluyendo la unión de implantes a la probeta charpy ya ensayada por medio de adhesivos. Este procedimiento ha sido llevado a cabo con éxito por otros grupos de investigación, si bien se trataba en su caso de probetas charpy miniatura, en las que las menores sollicitaciones mecánicas permitían el uso de esta técnica.

En nuestro caso particular las probetas objeto de estudio son las Charpy-V convencionales, de dimensiones 10 x 10 x 55 mm, por lo que se hizo necesario recurrir a técnicas de soldadura para realizar la unión en cuestión, si bien se ha de tener en cuenta que el citado proceso no ha de alterar las constantes mecánicas del material a ensayar, ni producir ningún efecto de tratamiento térmico que recupere el daño producido por la irradiación neutrónica.

Por este motivo, el procedimiento de reconstrucción sugerido fue el de "Stud Welding", dado que asegura unas mínimas dimensiones del baño de fusión y de la ZAT (Zona afectada térmicamente), por lo que la alteración de cualidades mecánicas asociadas a la heterogeneidad que representa la soldadura, se reducen notoriamente.

Nuestro objetivo a lo largo del presente trabajo, es delimitar los límites de aplicación de este procedimiento de unión, verificando para ello la inalterabilidad de resultados mediante comparación entre las probetas

originales y las reconstruidas utilizando para tal fin un péndulo Charpy instrumentado.

PARTE EXPERIMENTAL

El procedimiento de reconstrucción sugerido "Stud Welding" pasa primero por la unión de unos implantes mediante soldadura de cara a garantizar una continuidad mecánica total en la pieza (Figura 1)[1]. Sin embargo cualquier unión soldada presenta una serie de problemas:

- Aparición de un baño de fusión y una zona afectada por el calor, las cuales confieren una zona de heterogeneidad en el material.
- Aporte de calor controlado, evitando producir efectos de tratamiento térmico en el material irradiado que modifique sus propiedades mecánicas.
- Aparición de tensiones residuales, evitables únicamente con un tratamiento térmico posterior de la zona de unión (descartable en nuestro caso).

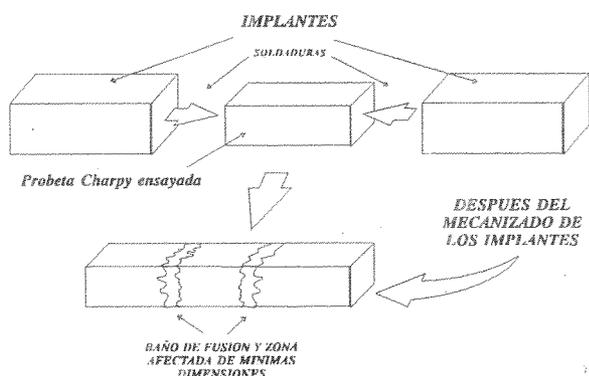


Figura 1 Procedimiento de reconstrucción de probetas Charpy-V

Materiales

El material utilizado en la experimentación ha sido un acero al carbono no irradiado convencional (F111) generalmente empleado en construcción. Las características que hicieron aconsejable emplear este material son su bajo límite elástico y su alta tenacidad. Igualmente, el material seleccionado como implante es también un acero al carbono de fácil mecanización (F211), dada la evidente necesidad de ajustar las dimensiones de la probeta tras su soldadura para ceñirse a las estrictas tolerancias que marca la norma de ensayo ASTM E 23-91[2].

La composición química atendiendo a la catalogación de estos aceros es la señalada en la tabla I.

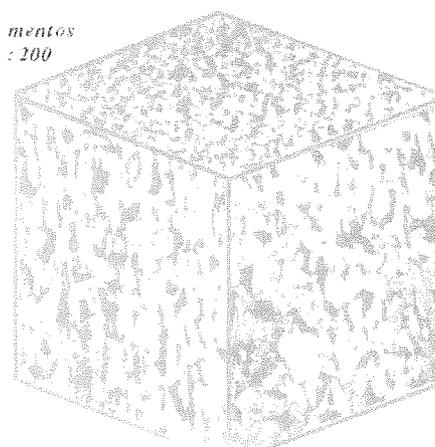


Figura 2. Metalografía del material original

La microestructura de ambos materiales es muy similar, con grandes granos de ferrita y pequeños granos de perlita (fina) a lo largo de una dirección preferente, lo que hace pensar en un proceso de laminación o de extrusión en su fabricación. (Figura 2).

La Micrografía de SEM del material original de la Figura 3 permite comprobar su estructura ferrítico-perlítica, al igual que una estructura perlítica fina, lo que induce a pensar en una velocidad de enfriamiento moderada-alta.



Figura 3. Fotografía de SEM (1000 aumentos) del material original

	C	Mn	Si	P	S
F 111	0.1-0.2	0.4-0.7	0.15-0.4	< 0.035	< 0.035
F 211	< 0.20	0.60-1.20	0.10	< 0.10	< 0.30

Tabla I. Composición química en % de los materiales empleados

El menor contenido en carbono del acero F211 favorece la dilución del mismo desde el baño de fusión hacia el material del implante, reduciendo por tanto la cantidad de martensita en la ZAT y las tensiones residuales generadas por el acomodo de las dos estructuras reticulares presentes, de un lado la ferrita cúbica centrada en el cuerpo del material original y del implante, y de otro la citada martensita de la ZAT, con estructura tetragonal centrada y con parámetros de red en función de la cantidad de carbono

Ambos materiales presentan un bajo límite elástico y una gran tenacidad, lo que desde el punto de vista del ensayo Charpy conlleva una zona plástica asociada al crecimiento de la grieta de grandes dimensiones. Esta zona plástica para temperaturas de ensayo elevadas ($\approx 120\text{ }^\circ\text{C}$) puede ser de suficiente extensión para interactuar con la ZAT y por la presencia de la fase martensítica antes mencionada dar lugar a una discrepancia de resultados entre las probetas originales y soldadas. Este efecto será comentado a continuación en la sección de resultados.

Equipo utilizado

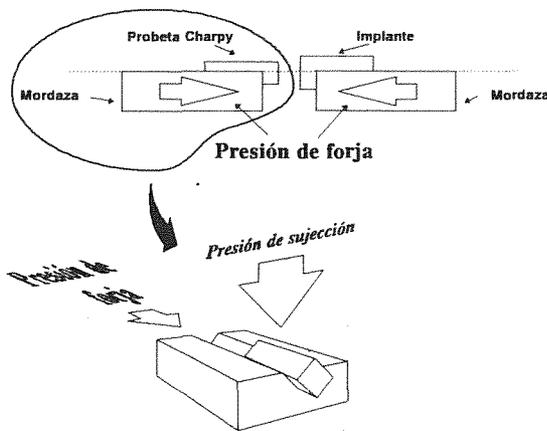


Figura 4. Colocación de las probetas a soldar en las mordazas

Para efectuar la unión por soldadura de las probetas Charpy una vez ensayadas, se empleó equipo de soldadura por "Stud Welding" de la marca SCHLATTER que proporciona una corriente de soldadura de 1000 A de intensidad con una diferencia de potencial en el arco de 20 - 30 V, estableciéndose un arco con una duración controlada de 0,2 s.

Este proceso consta de tres fases que pueden ser simultáneas (algunas de ellas) o sucesivas en el tiempo (Figura 4). Primeramente, se ubican las partes a soldar en las mordazas de la máquina, asegurándose una buena fijación a las mismas para evitar indeseables desplazamientos durante el proceso de soldadura. Seguidamente, se acercan las mordazas entre sí, hasta una distancia mínima por encima de la cual no se

establece arco eléctrico entre las partes a soldar. Una vez alcanzado este punto, se inicia el arco entre las piezas, que para el caso que nos compete se forma con una pequeña caída de potencial (del orden de 20 V) pero con una alta intensidad (alrededor de 1000 A). Este arco, se establece durante un tiempo aproximado a 0,2s (impuesto por las dimensiones de la unión a realizar) por encima del cual, la cantidad de material fundido supera la deseable, produciéndose proyecciones de dicho metal al ambiente circundante. Como paso final, una vez finalizado el arco se proyectan las piezas una contra otra a gran velocidad, consiguiendo la expulsión del baño fundido por proyección lateral del mismo, a la vez que un efecto de forja sobre la unión, hecho que confiere a la soldadura unas buenas cualidades resistentes.

Para el ensayo posterior de las probetas una vez soldadas se utilizó un péndulo instrumentado de la marca WOLPERT con una tarjeta de adquisición de datos de 1 Kb y el software necesario para su adquisición.

Para la interpretación y el tratamiento de estos datos se implementó el equipo con software de desarrollo propio, encaminado a filtrar y tratar la señal procedente del ensayo. El desarrollo de este software ha sido una de las partes mas importantes del trabajo y sin el cual, cualquier tratamiento posterior de los datos hubiera sido imposible.

RESULTADOS Y DISCUSION

Se efectuaron un total de 10 ensayos a temperaturas comprendidas entre - 20 y 150 $^\circ\text{C}$ en las probetas originales, y otros tantos en el mismo espectro de temperaturas para las probetas reconstruidas. Los resultados obtenidos y la representación de las curvas aparecen en la Figura 5

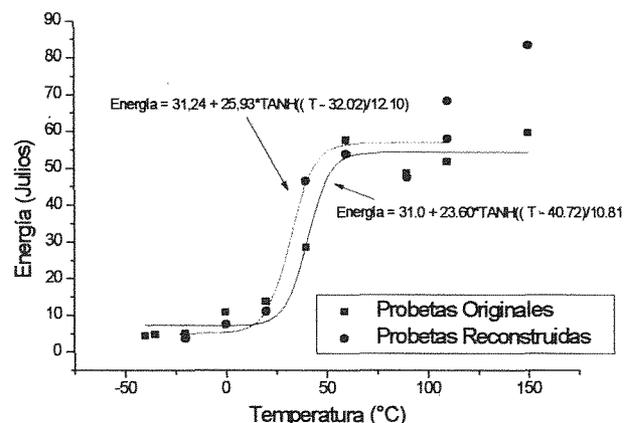


Figura 5. Energías de las probetas originales y reconstruidas

La aparición tanto de la ZAT como del baño de fusión introducen en el material una zona de elevada dureza y baja tenacidad ocasionada por la formación de martensita. Esta fase provocada por el fuerte gradiente térmico necesario para que el resto de la probeta no sufra el indeseable efecto de tratamiento térmico (mordazas refrigeradas). origina una pérdida de cualidades del material en una zona muy restringida del mismo, pudiendo hablar literalmente de una barrera que impide el flujo plástico dentro del material.

El gradiente térmico necesario para preservar al material original de un tratamiento térmico durante el proceso de soldadura adopta el perfil señalado en la Figura 6[3]. La fuerte pendiente de la curva de temperatura da lugar a una elevada velocidad de enfriamiento, la cual, a su

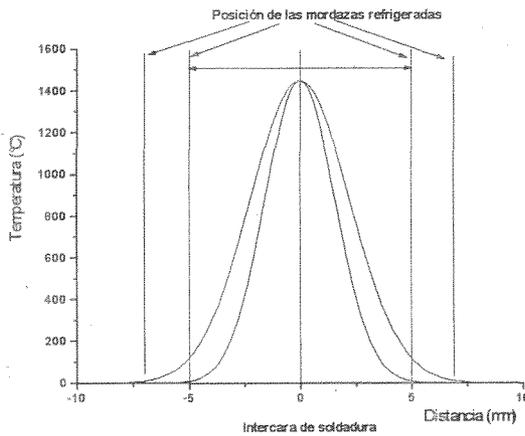


Figura 6. Distribución de temperaturas desde la intercara de unión

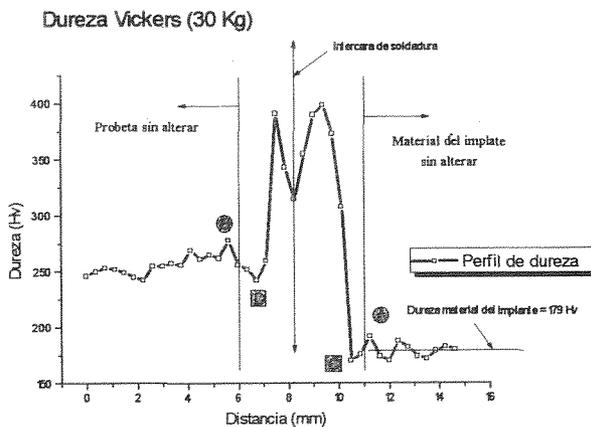


Figura 7. Perfil de dureza Vickers a través de la soldadura.

vez, es la causante de la formación de la fase martensítica.

La aparición de esta barrera viene confirmada por el perfil de dureza a través de la unión soldada (Figura 7), donde se aprecia que a ambos lados del baño de fusión (línea central del gráfico) existen dos zonas con un máximo de dureza flanqueadas por dos zonas a ambos lados de dichos máximos (A-B y C-D) originadas por las tensiones residuales subsiguientes al proceso de unión.

Observando la curva de la Figura 5 se aprecia que a partir de 100 °C no existe buena concordancia entre los valores de energía pertenecientes a probetas originales y sus homólogas reconstruidas. En el ajuste de las curvas a un modelo de tangente hiperbólica, no se han tenido en cuenta los puntos de 110 y 150 °C de la probeta reconstruida. Para tratar de explicar este efecto recurrimos a las gráficas obtenidas durante el ensayo Charpy en el péndulo instrumentado.

Antes de cualquier intento de interpretación de los registros de señal obtenidos se hizo necesario un filtrado de la señal, para lo cual, como se ha comentado con anterioridad se desarrolló un software específico para el procesado digital de la señal.

La potencia de cálculo del programa desarrollado permitió analizar el espectro de la señal recibida y aplicarle todos los tipos de filtros digitales comercialmente utilizados (Chebysev, Butterworth Windows, etc) comprobando que los mejores resultados se obtenían aplicando un filtro Window tipo Hanning con 50 coeficientes y realizando posteriormente una convolución de dichos coeficientes con la señal original. El resultado de dicho tratamiento puede observarse en la Figura 8.

Del análisis de las curvas de la Figura 5, se aprecia con facilidad que para temperaturas de ensayo superiores a

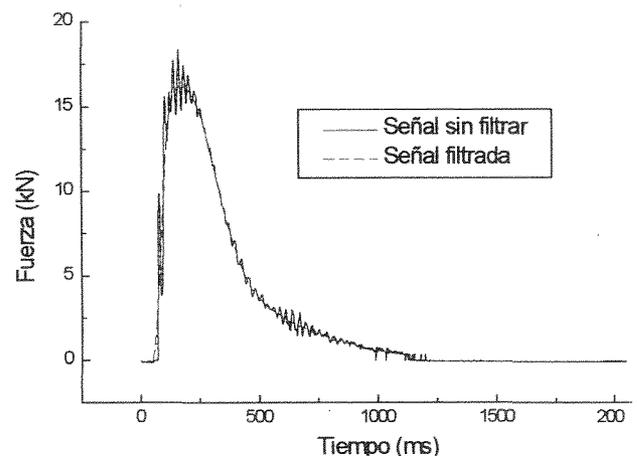


Figura 8. Filtrado digital de la señal procedente del péndulo instrumentado

100 °C los datos pertenecientes a las probetas reconstruidas sufren un importante incremento de energía con respecto a las originales, si atendemos a las curvas Fuerza-Tiempo-Energía (Figura 9) obtenidas del péndulo instrumentado para una temperatura de ensayo de 110 °C, se puede intentar explicar este comportamiento.

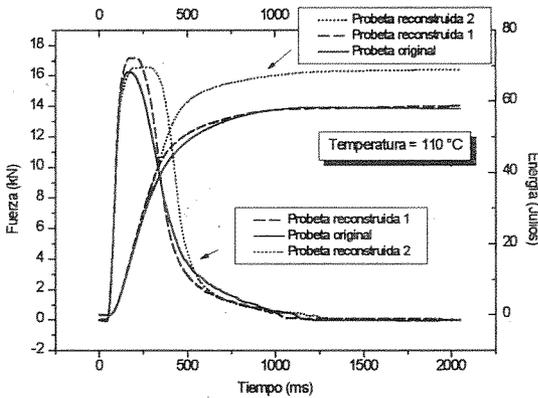


Figura 9. Registro Fuerza-Tiempo del ensayo a 110 °C

De las dos probetas reconstruidas 1 y 2 (usando las dos mitades de la Charpy-V original ensayada), la denominada como "1" una tiene una concordancia casi completa con la de partida, mientras que sin embargo, la denominada como "2" muestra un notable incremento del área plástica encerrada por la curva Fuerza-Tiempo. No obstante se puede apreciar también como su comportamiento elástico es idéntico al de la original y el máximo alcanzado en la curva es igualmente comparable.

Si analizamos más detalladamente los registros de ambas probetas, representando las variaciones de flexibilidad del martillo, obtenidas dividiendo el valor de la fuerza en cada punto por el valor de desplazamiento obtenido de la ecuación[4]:

$$v(t) = v_0 - \frac{\Delta t}{2m} \sum_{i=t_i}^t F_i - F_{i+1} \quad [1]$$

y:

$$s(t) = \frac{\Delta t}{2} \sum_{i=t_i}^t v_i + v_{i+1} \quad [2]$$

- Donde v_0 = Velocidad inicial
- F = Fuerza
- Δt = Intervalo de tiempo (1/ Frecuencia)
- m = masa de la cabeza del péndulo.

se puede apreciar una curva como la de la Figura 10, donde se aprecian ciertos cambios de concavidad a

convexidad característicos para todos los ensayos, además de un máximo claramente definido y desplazado de la curva original Fuerza-Tiempo.

Si hacemos coincidir el instante en que se produce dicho máximo en la curva de flexibilidad, con el mismo instante de tiempo en la curva original de Fuerza-Tiempo se aprecia fácilmente que el punto obtenido concuerda favorablemente con el valor del "General Yield" según los criterios generalmente utilizados para su determinación (Figura 10)[5].

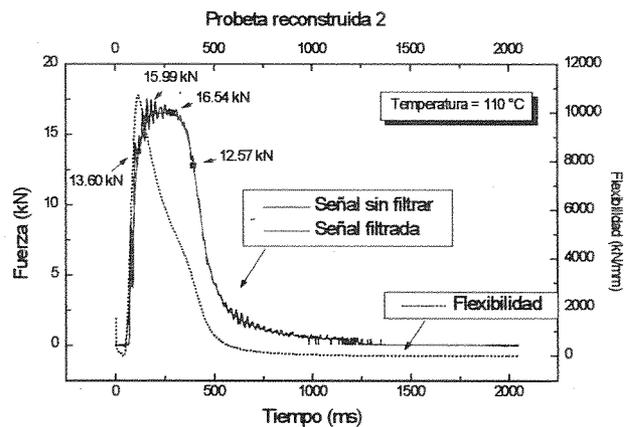


Figura 10. Determinación de los puntos críticos en la curva F-t mediante las variaciones de flexibilidad

Del mismo modo, si tenemos en cuenta que la variación de flexibilidad esta en directa correspondencia con el momento de progresión de la grieta durante el ensayo, podemos ajustar la curva de flexibilidad en el rango comprendido entre el máximo y la rama asintótica de cero a un polinomio (en nuestro caso de grado 9) y derivar dos veces con respecto al tiempo para obtener las máximas variaciones de la pendiente de la curva (velocidad de cambio en la flexibilidad)[6].

Igualando a cero esta segunda derivada obtenemos los puntos de inflexión de dicha curva (Figura 11), los cuales, podemos asociarlos a fenómenos como crecimiento dúctil de la grieta, punto de detención y enromamiento del borde de la entalla.

Mediante esta representación podemos comprobar como dichos puntos no son coincidentes en las tres probetas estudiadas, siendo incluso inexistentes algunos de ellos como por ejemplo en el caso de la muestra original, donde solamente existe un punto de inflexión, pudiendo hablar por lo tanto de un crecimiento dúctil continuo de la grieta a partir de dicho punto.

El diferente comportamiento de la curva de flexibilidad para estos dos casos (original y reconstruida a 110 °C) es el factor determinante para explicar el brusco

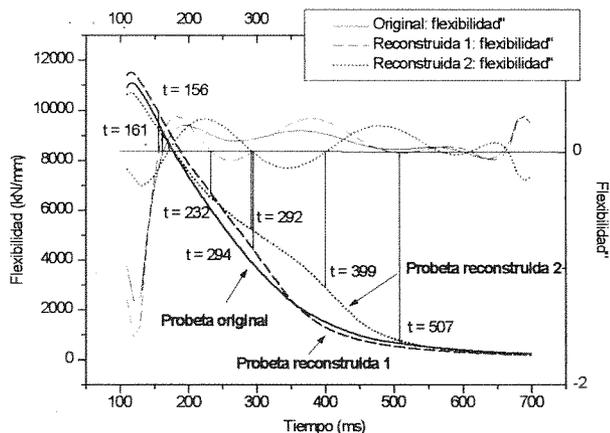


Figura 11. Variaciones de flexibilidad en las tres probetas a 110 °C

aumento de energía consumida en la probeta reconstruida.

Así, por ejemplo para el caso de la probeta original se puede observar en la Figura 12 como la curva de flexibilidad tiene una caída suave al igual que su correspondiente curva Fuerza-Tiempo de origen. Del mismo modo (Figura 9), en el caso de la probeta reconstruida, se presentan hasta un total de tres puntos de inflexión a partir del máximo, que podemos asociar

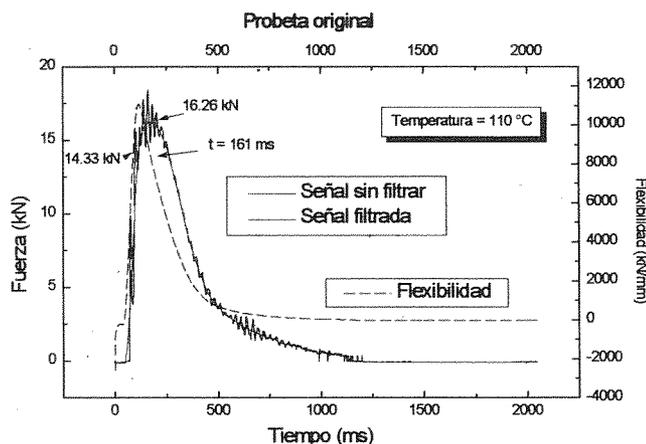


Figura 12. Probeta original mostrando un crecimiento de grieta dúctil estable

de forma creciente en el tiempo con: enroscamiento del borde de la entalla, crecimiento dúctil estable de la fisura y propagación inestable de la misma hasta la rotura completa.

El otro punto anómalo en cuanto energía (150 °C) tiene un análisis en todo similar al ya comentado de 110 °C, por lo cual, todo lo hasta ahora señalado es extensivo también a su caso.

Todas las temperaturas analizadas siguiendo esta sistemática han mostrado un comportamiento similar,

por lo que de los datos obtenidos y repetitividad de resultados, cabe pensar en la posibilidad de evaluar directamente los valores de K y J dinámicos sin utilizar probetas preagrietadas, siendo objeto de un futuro trabajo la demostración de su viabilidad sin necesidad del establecimiento de una pregrieta de fatiga [7].

CONCLUSIONES

De lo hasta ahora comentado, surge como primera pregunta la calidad del proceso de reconstrucción descrito, el cual, para materiales muy dúctiles y a elevada temperatura, introduce una auténtica barrera que frena el flujo plástico asociado al crecimiento estable dúctil de la grieta.

La extensión de esta zona plástica es función del tipo de material ensayado y de la temperatura a la que se verifique el mismo, por lo que de cara a evaluar el cambio en la energía de transición dúctil-frágil (41J) que se suele dar a temperaturas por debajo de 100 °C, no parece un factor condicionante.

Sin embargo, en el otro dato de interés de cara a la fragilización por irradiación neutrónica como es el descenso del UPPER SHELF" [8] (rama asintótica superior), el efecto de la heterogeneidad provocada por la unión soldada es muy acusado, falseando claramente los resultados obtenidos y por consiguiente la previsión de daño por irradiación.

Como observación final cabe señalar que la posible reorientación del plano de crecimiento de la grieta, pasando por ejemplo de T-L a L-T o viceversa, es en principio desaconsejable, dado que el pequeño cubo de material de 10x10x10 mm necesario, restringe severamente la zona plástica asociada, pudiendo interactuar desde bajas temperaturas con la ZAT.

REFERENCIAS

- [1]. Valo, M. and Ahlstrand, R., "Application of Reconstitution Welding Technique for Studying Base Metal of Novovoronezh Unit-1 Trepan Sample" Small Specimen Test Techniques Applied to Nuclear Reactor Vessel Thermal Annealing and Plant Life Extension, ASTM STP 1204, W. R. Corwin, F. M. Haggag, and W. L. Server, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1993, pp. 440-456.
- [2]. Norma ASTM E 23-91 "Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials" ASTM Standards (1991).
- [3]. Pedro Luis y Luis, " Transporte de Calor por Conducción", D. Legal M-28.725-83.

- [4]. Coz Díaz, J. J. del, Fdez. Canteli, A., Kalthoff, J. F., "Caracterización Dinámica de varios aceros de Via", Anales de Mecánica de Fractura, Vol. 11. pág 170-177. (1994).
- [5]. A. Fabry, E. van Walle, R. Chaouadi, J. P. Wannijn, A. Verstrepen, J. L. Puzzolante, Th. Van Ransbeeck, J. Van de Velde., "RPV STEEL EMBRITTLEMENT: Damage modeling and micromechanics in an engineering perspective", INRNE, 1784 Sofia, Bulgaria, Oct 1993.
- [6]. L. Sánchez, F. Gutierrez Solana, J. Fordeyn, S. Verstraeten. "Relación entre Resiliencia y Tenacidad a Fractura en Aceros Inoxidables Duplex Envejecidos a Baja Temperatura", Anales de Mecánica de Fractura, Vol. 11, (1994).
- [7]. ASTM E 24.03.03, "Proposed Standard Method of Test for Instrumental Impact Testing of Precracked Charpy Specimens of Metallic Materials". Draft 2d, ASTM, 1981.
- [8]. American Nuclear Regulatory Commission, "Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials". Guide 1.99 Rev. 2, U.S.N.R.C. (1988).