

**METODO DE APLICACION AL DISEÑO PARA ACEROS
INOXIDABLES DUPLEX ENVEJECIDOS****L. Sánchez, F. Gutiérrez-Solana****Departamento de Ciencia e Ingeniería del Terreno y de los Materiales
E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria
Avenida de Los Castros s/n, 39005. Santander.**

Resumen. Dentro del marco de un estudio sobre fragilización por envejecimiento a baja temperatura (280-400°C) de aceros inoxidable austenoferríticos se ha desarrollado un método de aplicación al diseño basado en la predicción de la tenacidad a la fractura y al impacto de dichos aceros para cualquier estado de envejecimiento, definido por tiempo y temperatura, a partir de su composición química, contenido en ferrita y de sus condiciones iniciales. Dicho método se hace más preciso si se conoce la evolución de la dureza de la ferrita a partir envejecimientos acelerados en el laboratorio a la temperatura de 400°C en un proceso experimental de corta duración. El método propuesto ha sido contrastado tanto con los aceros estudiados en este trabajo como con otros encontrados en la bibliografía.

Abstract. Within the framework of a study performed on low temperature (280-400°C) aging embrittlement of cast duplex stainless steels, a design application method has been developed based on the fracture and impact toughness of these steels for any aging state, defined by time and temperature, using their chemical composition, ferrite content and initial conditions. Said method becomes more precise if the ferrite hardness evolution is established from accelerated laboratory agings at 400°C in a short experimental process. The proposed method has been checked both with the studied steels and with others found in the bibliography.

1. INTRODUCCION

Los aceros inoxidable austenoferríticos han sido ampliamente utilizados en las últimas décadas en las industrias químicas, petroquímicas y energéticas. Estos aceros presentan normalmente una microestructura dúplex de islas de ferrita distribuidas dentro de una matriz austenítica. La presencia de ferrita en la estructura dúplex introduce una serie de mejoras con respecto a los aceros austeníticos entre las que destacan principalmente el aumento de la resistencia a la fisuración en caliente y adicionalmente aumenta el límite elástico, la resistencia a la corrosión bajo tensión y mejora la soldabilidad.

Sin embargo, un número importante de estudios [1-5] han puesto de manifiesto que la ferrita de estos aceros es susceptible a procesos de envejecimiento a baja temperatura (280-400°C) debido a una serie de mecanismos de evolución microestructural tales como la descomposición espinodal y la precipitación de fase G que tienen lugar en dicha fase. A lo largo de una serie de

trabajos anteriores [6-11] ha quedado claramente demostrado que los procesos de envejecimiento producen una fragilización local del material que puede ser medida a partir del estudio de la evolución de la dureza de la ferrita ya que esta propiedad es la que mejor reproduce los procesos de envejecimiento que tienen lugar en dicha fase, y permite establecer un modelo analítico que define la cinética de los procesos de envejecimiento [9-10]. Asimismo, como consecuencia de la fragilización local se tiene una fragilización global del material, debido a la rotura prematura de la ferrita por clivaje [8-9], medible a partir de ensayos de caracterización mecánica global como puede ser la resistencia al impacto [7] y la tenacidad a fractura [6,9,11]. La fragilización global depende del estado de envejecimiento de la ferrita y también del porcentaje y distribución de dicha fase en la matriz austenítica. Por ello un profundo análisis de los caminos de rotura, basado en el estudio fractográfico, que permita identificar la presencia de la ferrita en los procesos de rotura estáticos, propios de la definición de la tenacidad, o dinámicos, resiliencia, ha permitido la

modelización de la resistencia a la rotura de estos materiales y, en función de su evolución con el tiempo de envejecimiento, el de la fragilización sufrida [8,9].

Los resultados obtenidos han permitido finalmente desarrollar un modelo de diseño a partir de los datos iniciales del material, tales como su composición química, porcentaje en ferrita, evolución de la dureza de la ferrita a 400°C, y valores iniciales de resiliencia y de tenacidad a la fractura. De dicho modelo se espera que permita la evaluación de las curvas de tenacidad en cualquier nivel de envejecimiento, para su aplicación directa al diseño de componentes a través de las curvas R de J o las J_R-T_R [9,11]. Este modelo es el objeto de este trabajo.

2. PROCESO EXPERIMENTAL

2.1. Material

La Tabla 1 muestra la composición química y el contenido en ferrita determinado experimentalmente de los tres aceros analizados en este trabajo, identificados como 12F, 18F y 22F en función de su contenido en ferrita. El acero 12F es un acero comercial CF8M proveniente de una válvula que estuvo trabajando en servicio en una central energética durante un tiempo neto de 10 años a una temperatura próxima a 280°C. Los aceros 18F y 22F son aceros similares obtenidos de sendas coladas experimentales de contraste con unos contenidos nominales en ferrita del 18 y 22%, respectivamente.

Tabla 1. Composición química (% en peso) y contenido en ferrita de los aceros estudiados.

ACERO	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	% α
12F	0.035	0.70	1.10	18.6	10.4	2.00	12.2
18F	0.076	0.83	1.25	19.4	9.6	2.29	17.8
22F	0.045	0.82	1.23	18.4	8.9	2.36	20.8

Los tres materiales han sido envejecidos a las temperaturas de 280, 350 y 400°C durante tiempos comprendidos entre 300 y 14800 horas.

2.2. Caracterización de los procesos de rotura

Se llevaron a cabo ensayos de tenacidad a la fractura sobre los tres materiales en los diferentes niveles de envejecimiento a 280, 350 y 400°C. Para la caracterización a fractura se siguió el método basado en la determinación de las curvas J_R propuesto por el Grupo Europeo de Fractura y recogido en la normativa europea ESIS P1-92 [12] en su versión de la probeta única. Los ensayos de impacto se realizaron a las temperaturas de -196, -80, 20 y 280°C sobre los tres aceros para los diferentes niveles de envejecimiento a las tres temperaturas, con el objeto de determinar las curvas de

transición dúctil-frágil.

2.3. Fractografía

A partir de las probetas de impacto y tenacidad se llevó a cabo un estudio exhaustivo, mediante microscopía electrónica de barrido, de las superficies de fractura con el objeto de caracterizar los modos de rotura tanto de la austenita como de la ferrita y cuantificar el porcentaje de rotura a través de cada fase.

La metodología seguida así como los resultados obtenidos han sido descritos detalladamente en una serie de trabajos previos [6, 8-9,11].

3. CONEXION ENTRE ENVEJECIMIENTO Y FRAGILIZACION

El estado de fragilización local de la ferrita, debido a su envejecimiento, es una de las variables de influencia en la fragilización global, por lo que se considera de gran interés determinar la conexión entre ambas [13]. Para ello se buscó una relación entre el incremento de dureza de la ferrita, ΔHV , y su grado de presencia en la superficie de rotura, X_α . La Figura 1 muestra que dicha relación se ajusta bien con una función lineal del tipo

$$X_\alpha^{J_R} (\%) = m_J \cdot \Delta HV \quad (1)$$

para cada uno de los aceros en los ensayos de tenacidad a fractura. Además se ha encontrado que la pendiente de dichas rectas es creciente con el porcentaje en ferrita del acero, ajustándose para los ensayos J mediante una ley del tipo

$$m_J = -0.0420 + 0.0065 \cdot \% \alpha \quad (2)$$

con un coeficiente de correlación de 0.96. Sustituyendo la ecuación (2) en la (1) se obtiene

$$X_\alpha^{J_R} (\%) = (-4.20 + 0.65 \cdot \% \alpha) 0.01 \cdot \Delta HV \quad (3)$$

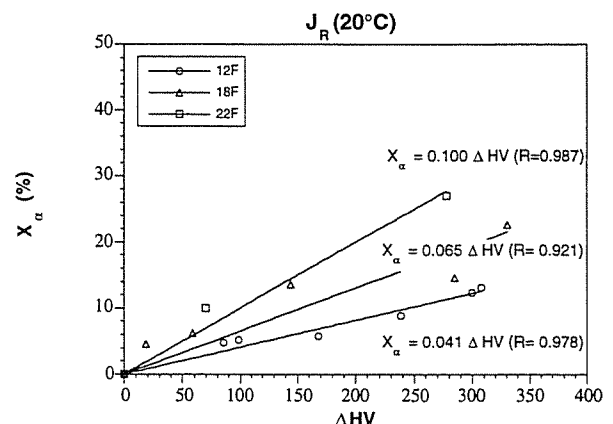


Figura 1. Relación entre el incremento de dureza y el porcentaje de ferrita en la superficie de fractura en probetas de tenacidad a fractura para cada material.

Para el caso de los ensayos de impacto a temperatura ambiente se obtuvo que m se ajustaba mediante la ecuación de la recta

$$m_f = -0.0912 + 0.0102 \cdot \% \alpha \quad (4)$$

con un coeficiente de correlación de 0.98. Sustituyendo la ecuación (4) en una ecuación similar a la (1) se obtiene

$$X_{\alpha}^{C_{\alpha}} (\%) = (-9.12 + 1.02 \cdot \% \alpha) 0.01 \cdot \Delta HV \quad (5)$$

Con esta relación obtenida entre el incremento de dureza de la ferrita y el porcentaje de dicha fase en el camino de rotura y el modelo fenomenológico presentado en un trabajo anterior [8] se tiene un método para determinar los parámetros de tenacidad a fractura e impacto para cualquier nivel de envejecimiento definido por la dureza de la ferrita [9].

4. METODOLOGIA DE PREVISION DE LA RESISTENCIA A LA FRACTURA. APLICACION AL DISEÑO

Encontrada la relación entre envejecimiento y fragilización global se puede plantear una metodología de previsión de la resistencia a la fractura de aceros inoxidables dúplex del tipo estudiado, CF8M, para su aplicación al diseño de componentes y a la evaluación de su seguridad considerando los problemas de envejecimiento y fragilización de estos aceros en condiciones de uso. Por razones de simplicidad y generalidad, el método se apoyará en la caracterización simplista de estos aceros en sus condiciones de recepción y en las modelizaciones realizadas de su envejecimiento, fragilización y la conexión entre ambas.

El punto de partida de este método será la determinación de la composición del material mediante un análisis químico convencional. A continuación deberá obtenerse el contenido en ferrita mediante metalografía cuantitativa o en su defecto utilizando la fórmula de Leger [14], basada en la propia composición química.

A partir de la composición química puede determinarse la energía de activación del envejecimiento en el intervalo de temperaturas 350-400°C utilizando la fórmula

$$U_{350-400} (kJ \cdot mol^{-1}) = -490.41 + 48.80 \cdot Si + 27.17 \cdot Cr + 35.27 \cdot Mo \quad (6)$$

obtenida a partir de los tres aceros estudiados en este trabajo [9], y derivada de una más general obtenida por Slama *et al* [5].

Para el intervalo global 280-400°C resulta recomendable utilizar una energía de activación que proporcione valores del lado de la seguridad en la extrapolación hasta 280°C de procesos caracterizados a 400°C como puede

ser la obtenida a partir de una fórmula obtenida por Chopra [3] que varía de 114.7 a 119.0 kJ·mol⁻¹ para los tres materiales estudiados en este trabajo y en todos los casos resulta inferior a las obtenidas experimentalmente [9-10], lo que aportará previsión de valores de tiempo para alcanzar una situación microestructural dada inferiores a los reales, es decir conservadores en cuanto al análisis de seguridad.

El conocimiento de estas energías de activación permite correlacionar el comportamiento de la evolución del envejecimiento a 400°C con el de otras temperaturas inferiores (350, 280°C u otras) siempre supuestos los fenómenos de transformación microestructural como térmicamente activados. Por ello, el siguiente paso será la determinación del ritmo de envejecimiento a 400°C del acero que se estudie, caracterizado por la evolución de la dureza de su ferrita. Si resulta posible determinar experimentalmente la curva $HV(t)$ de evolución de la dureza de la ferrita y ajustarla con la curva exponencial [9-10]

$$HV(t) = A_h - B_h \cdot \exp(-t/\tau_h) \quad (7)$$

ésta debe ser la opción más adecuada. Si no se dispone de tiempo suficiente bastaría realizar envejecimientos hasta el tiempo mayor posible, por ejemplo 1500 horas daría una buena aproximación, considerando como valor de saturación de la dureza de la ferrita 600 HV, valor medio para estos aceros. En el caso de no disponer de los datos de evolución de la dureza a 400°C podría utilizarse una ecuación envolvente de la misma que sirviera para cualquiera de los materiales, tratando de permanecer en todos los casos del lado de la seguridad. De acuerdo con los resultados obtenidos, un valor de la dureza de saturación bastante conservador sería 600 HV y un valor máximo de $HV(0)$ sería 295 HV, con lo cual B_h tomaría el valor de 305 HV. Por otro lado, sería conveniente utilizar el mínimo valor de τ_h obtenido que fue de 1325 horas. Con todas estas consideraciones la ecuación resultante será

$$HV(t) = 600 - 305 \cdot \exp(-t/1325) \quad (8)$$

A partir de la evolución de la dureza de la ferrita en procesos de envejecimiento a 400°C, y utilizando las energías de activación, puede obtenerse la curva de evolución de la dureza de la ferrita a cualquier temperatura dentro de los intervalos considerados a partir de la fórmula [9-10]

$$\frac{t_i}{t_j} = e^{\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_j} \right)} = \frac{\tau_{hi}}{\tau_{hj}} \quad (9)$$

que permite obtener los valores del parámetro τ_h , y a partir del mismo la expresión (7) válida para la temperatura de envejecimiento considerada.

En este punto se alcanza para un acero dado la previsión de su envejecimiento para cualquier temperatura y

tiempo. La conexión entre esta situación y su fragilización global constituye el paso siguiente, consistente en determinar, para un envejecimiento cualquiera, los porcentajes de ferrita en la superficie de fractura, tanto impacto como en tenacidad, a partir del incremento de dureza de la ferrita, propio de su envejecimiento. Para condiciones de temperatura ambiente las expresiones obtenidas son las (3) y (5) previamente escritas.

Por otra parte, los valores de $X_{\alpha}^{C_v}$ (%) y $X_{\alpha}^{I_R}$ (%) permiten determinar C_v , $J_{0.2/BL}$ y T_R^* . A partir de sus valores en estado no envejecido en las expresiones

$$C_v = C_v^{\gamma} \cdot X_{\gamma} (1 - \mu_C \cdot X_{\alpha}^{C_v}) \quad (10)$$

$$J_{0.2/BL} = J_{0.2/BL}^{\gamma} \cdot X_{\gamma} (1 - \mu_J \cdot X_{\alpha}^{I_R}) \quad (11)$$

$$T_R^* = T_R^{\gamma} \cdot X_{\gamma} (1 - \mu_T \cdot X_{\alpha}^{I_R}) \quad (12)$$

donde μ_C , μ_J y μ_T son unos parámetros de ajuste función de $X_{\alpha}^{C_v}$ y $X_{\alpha}^{I_R}$ propios de cada tipo y condición de ensayo [8,9].

Es por tanto necesaria la caracterización del acero a estudiar en el estado de recepción de su resistencia al impacto, curva de resiliencia $C_v(T_{exp})$, y de su tenacidad, curva R de J . De la primera se obtendrá el valor C_v^{γ} , obtenidos a 20°C de temperatura de ensayo. De la segunda, los valores $J_{0.2/BL}^{\gamma}$ y T_R^{γ} , como tenacidad medida en base a la integral J y el módulo de desgarro, que se aplicarán en las ecuaciones (11) y (12). En el caso de no disponer del material o condiciones suficientes para estas caracterizaciones se pueden tomar valores suficientemente representativos de estos materiales, tales como C_v de 240 J·cm⁻², límite elástico de 300 MPa y una curva J_R dada por la expresión

$$J_R = 1200 \cdot \Delta a^{0.47} \quad (13)$$

Al igual que se ha hecho para el estudio de impacto a temperatura ambiente, 20°C, se podría haber hecho para valores de ensayo a otras temperaturas, obteniendo expresiones propias para cada una semejantes a la (3) partiendo del correspondiente valor en origen dado por la citada curva de resiliencia. De este modo se puede establecer una curva completa $C_v \cdot T_{exp}$, prevista para el estado de envejecimiento, que puede ser ajustada por una curva tipo *tanh*.

Las expresiones (11) y (12) aplicadas conducen a valores de J de iniciación y módulo de desgarro para $\Delta a = 1$ mm a partir de los cuales se puede ajustar una curva R de resistencia a la fractura. Para la definición de la pendiente de la línea de enromamiento (blunting line) es necesario obtener la caracterización mecánica convencional del acero; en concreto, son necesarios el límite elástico y la

tensión de rotura, además del módulo de elasticidad.

Llegado a este punto se ha establecido una metodología de previsión de la resistencia a la fractura de un acero dúplex tipo CF8M, basado en las modelizaciones del envejecimiento y la fragilización realizadas y su caracterización convencional en estado de recepción. El esquema de la Figura 3 recuerda todos los pasos efectuados, de los que se deduce que sólo resulta imprescindible la composición química del acero, pudiendo todos los parámetros de su comportamiento mecánico ser sustituidos por valores convencionales de estos aceros representados en los cajetines ovalados. Ello constituye sin duda una pérdida de aproximación en la previsión, mejorable con los estudios sucesivos propuestos sobre el material base, mediante ensayos sencillos y de corta duración.

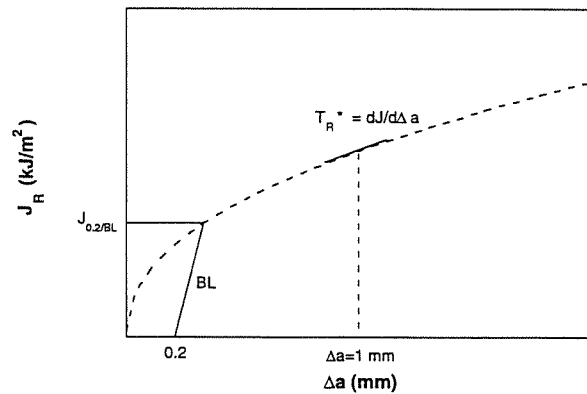


Figura 2. Parámetros característicos de la curva J_R

5. APLICACIONES

5.1. Obtención de parámetros indicadores de la tenacidad

Como validación del método, siguiendo el esquema de la Figura 3, se han reproducido los pasos para la determinación de todos los valores de tenacidad al impacto y a la fractura obtenidos experimentalmente para los aceros estudiados. Para ello se han utilizado los resultados de la caracterización de los tres materiales en el estado de recepción, así como los valores de dureza en envejecimientos a 400°C sólo hasta 1000 horas con el objeto de considerar un nivel de información moderado dentro de los propuestos.

En la Figura 4 se presentan los valores de $C_{v\text{prev}}$ obtenidos siguiendo la metodología de previsión frente a los valores experimentales para los aceros 12F, 18F y 22F conjuntamente. De dicha figura puede observarse que la previsión resulta aceptable con un coeficiente de correlación de 0.92 quedando la mayoría de los puntos dentro de un margen de error del 20% y aquéllos que están fuera de dicho margen, excepto uno, caen siempre del lado de la seguridad ($C_{v\text{prev}} < C_{v\text{exp}}$).

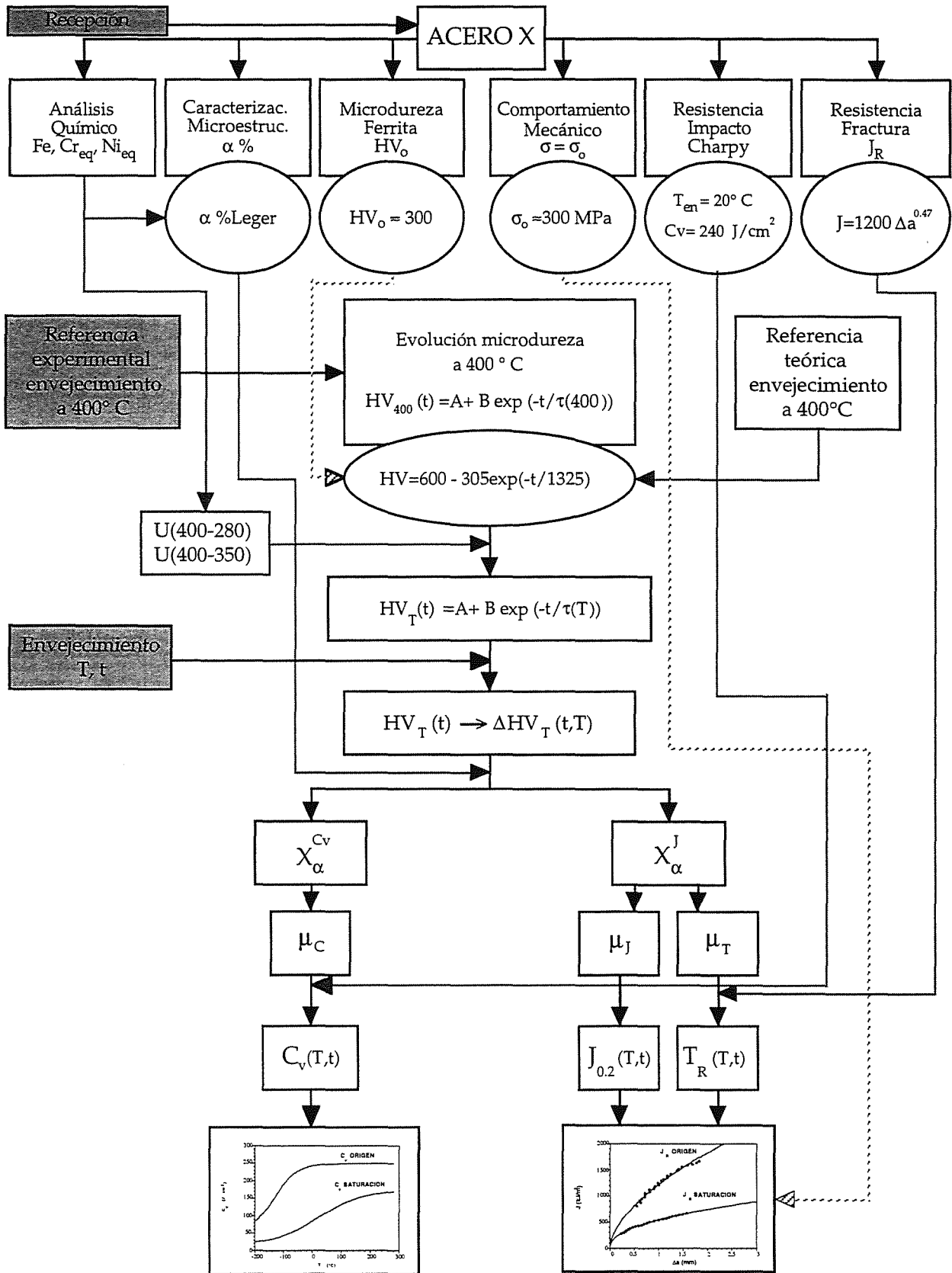


Figura 3. Diagrama resumen de la metodología de previsión

En la Figura 5 se presentan los valores de $J_{0.2/BL}$ previstos por el método desarrollado frente a los valores experimentales para los aceros 12F, 18F y 22F simultáneamente. El ajuste de los resultados es similar al caso de la resiliencia, quedando todos los puntos, bien dentro de un error del 20%, o en caso contrario, siempre del lado de la seguridad.

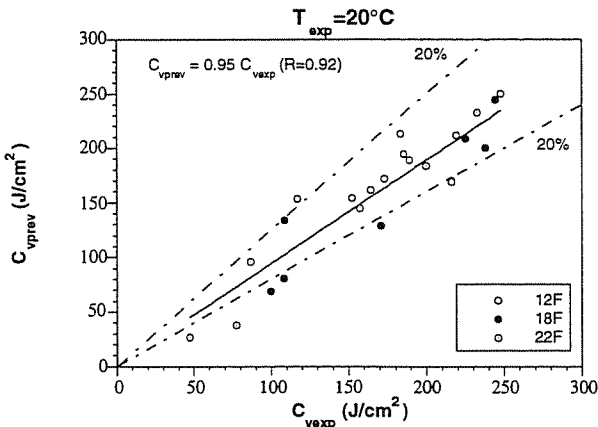


Figura 4. Relación entre $C_{v\ prev}$ y $C_{v\ exp}$ para los tres aceros

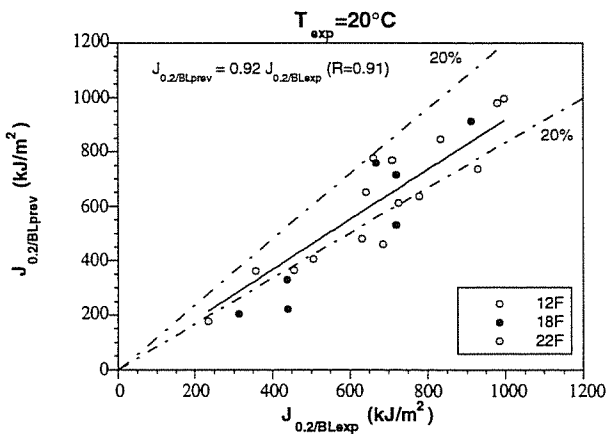


Figura 5. Relación entre $J_{0.2/BL\ prev}$ y $J_{0.2/BL\ exp}$ para los tres aceros

5.2. Obtención de curvas J_R

Como aplicación más concreta, para ilustrar el método, se han elegido dos casos para determinar la curva J_R según el esquema de la Figura 3, para su comparación con la curva real.

En la Figura 6 se muestra la curva J_R prevista para el acero 12F envejecido 22100 horas a 280°C, junto con la curva obtenida experimentalmente. En dicha figura se observa una similitud bastante buena sobre todo en la zona inicial, produciéndose el despegue a partir de 0.6 mm de propagación. Esta previsión no resulta preocupante ya que el estado de fragilización analizado no es importante, manteniendo el material una alta tenacidad. Además en ningún caso el valor de J previsto

para un avance de fisura dado supera en la zona de validez un error del 25%.

Por otra parte la Figura 7 muestra para el acero 22F envejecido 3300 horas a 400°C la curva J_R determinada a través de la metodología de previsión y la curva experimental, observándose que el acuerdo es muy bueno ya que las curvas prácticamente coinciden. Esta previsión aún cuando se hace en el marco del envejecimiento a 400°C, aporta tal exactitud que garantiza el método, dejando una evidencia de que el error de previsión del caso anterior se debe asociar fundamentalmente a la falta de exactitud en los valores y representatividad de las energías de activación utilizadas.

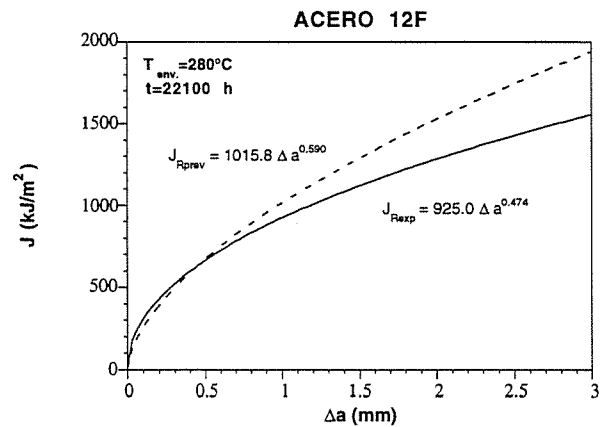


Figura 6. Curva J_R prevista por el método y curva experimental (Acero 12F envejecido 22100 horas a 280°C)

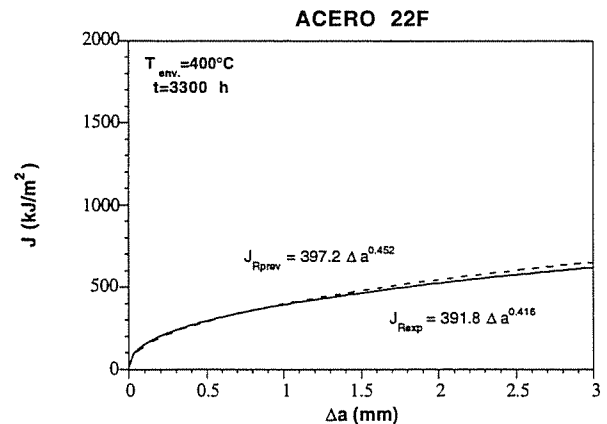


Figura 7. Curva J_R prevista por el método y curva experimental (Acero 22F envejecido 3300 horas a 400°C)

5.3. Ejemplo de aplicación a un acero CF8M de la bibliografía

A continuación se muestra un ejemplo de aplicación del método de previsión a un acero distinto de los estudiados en este trabajo. Como queda anteriormente dicho, son escasas las referencias que aportan datos concretos sobre la evolución de la tenacidad con el envejecimiento, entre

ellas se ha seleccionado de la Ref. [3] un acero CF8M envejecido 7500 horas a 400°C con un 19% de ferrita calculado y una curva J_R inicial

$$J_R = 564.0 \cdot \Delta a^{0.43} \quad (14)$$

A partir de la curva J_R se determinaron los parámetros $J_{0.2/BL}$ y T_R^* cuyos valores fueron 357.8 kJ·m⁻² y 242.5, respectivamente.

A continuación, dado que no se dispone de datos de microdureza, se aplicó la ecuación (8). Con el valor de HV para 7500 horas a 400°C se determinó, siguiendo el método, el porcentaje de ferrita en la superficie de fractura y los valores de μ_J y μ_T , a partir de los cuales se obtuvieron los parámetros $J_{0.2/BL}$ y T_R^* que definen la curva J_R . En la Figura 8 se presentan las curvas experimentales y de saturación dadas por Chopra en la Ref. [3] junto con la curva prevista por el método aquí desarrollado. En dicha figura puede observarse un acuerdo muy bueno entre la curva experimental y la predicha, lo cual es de nuevo una ratificación de la metodología desarrollada y de su carácter predictivo.

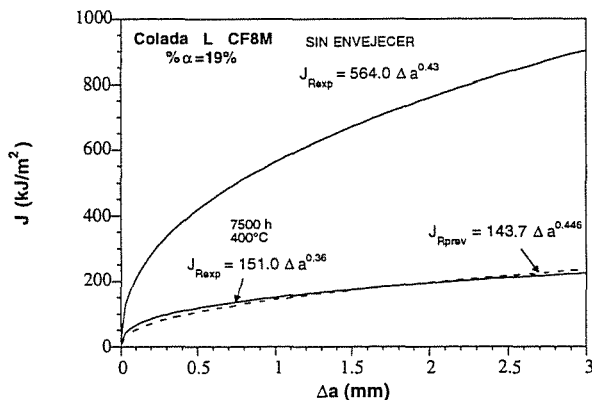


Figura 8. Curva J_R prevista por el método y curva experimental de un acero envejecido 7500 horas a 400°C (Referencia [3])

6. CONCLUSIONES

- Se ha encontrado un nexo de unión entre envejecimiento y fragilización que se plasma en una relación directa entre sus variables más significativas, la dureza de la ferrita, o su incremento, como representante del envejecimiento y el porcentaje de ferrita en el camino de rotura, como variable representativa de la fragilización alcanzada.
- Este enlace entre envejecimiento y fragilización junto con los modelos desarrollados para ambas permiten establecer un método de predicción de la tenacidad de un acero dúplex para cualquier estado de envejecimiento considerado, definido por tiempo y temperatura, a partir de su composición química, contenido en ferrita y comportamiento en recepción, es decir sus condiciones iniciales.

7. AGRADECIMIENTOS

El desarrollo de este trabajo se incluye dentro de un Proyecto de Investigación (Ref. MAT92-0359) financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT).

8. REFERENCIAS

- [1] Trautwein, A. & Gysel, W., "Influence of Long-Time Aging of CF8 and CF8M Cast-Steel at Temperatures Between 300°C and 500°C on Impact Toughness and Structural Properties", *Stainless Steels Casting*, ASTM STP 756, 165-189 (1982).
- [2] Chung, H. M., "Aging and Life Prediction of Cast Duplex Stainless Steel Components", *Int. J. Pres. Ves. & Piping* 50, 179-213 (1992).
- [3] Chopra, O. K., "Thermal Aging of Cast Stainless Steels in LWR Systems: Estimation of Mechanical Properties", *PVP-Vol. 228*, ASME 1992, pp. 79-92.
- [4] Miller, M. K. y Bentley, J., "APFIM and AEM investigation of CF8 and CF8M primary coolant pipe steels", *Mat. Sci. Tech.* 6, 285-292 (1990).
- [5] Slama, G., Petrequin, P., and Mager, T., "Effect of Aging on Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel Castings and Welds", *SMIRT Post-Conference Seminar*, Monterey, Ca., 1983, pp. 211-240.
- [6] Sánchez, L., Gutiérrez-Solana, F., Gorrochategui, I., and González, J., "The effect of temperature on low temperature aging embrittlement of duplex stainless steels", *ECF-10 Structural Integrity*, Sept. 94, pp. 823-28.
- [7] Sánchez, L., Gutiérrez-Solana, F., and González, J. J., "Influencia del Envejecimiento Térmico a Baja Temperatura sobre la Microdureza y la Resiliencia en Aceros Inoxidables Dúplex", *Actas del I Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica*, Madrid, 1993, pp. 249-254.
- [8] Sánchez, L., Gutiérrez-Solana, F. and González, J.J., "Modelización de la Fragilización por Envejecimiento en Aceros Dúplex a través del Camino de Rotura", *Anales de Mecánica de la Fractura*, 13, 1996, pp. 340-345.
- [9] Sánchez, L., "Fragilización por Envejecimiento a Baja Temperatura en Aceros Inoxidables Austenoferríticos", Tesis doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, España, 1996.
- [10] González, J.J., Gutiérrez-Solana, F., Sánchez, L., and Setién J., "Low-Temperature Aging Kinetics in Cast Duplex Stainless Steels: Experimental Characterization", *Journal of Testing and Evaluation*, JTVA, Vol. 25, No. 2, March 1997, pp. 156-164.
- [11] Sánchez, L., Gutiérrez-Solana, F., and González, J., "Evolution of J_R - T_R curves with low temperature aging of duplex stainless steels", *ECF-11 Structural Integrity*, Oct. 96, pp. 571-76.
- [12] ESIS P1-92, "ESIS Recommendations for Determining the Fracture Resistance of Ductile Materials", *European Structural Integrity Society*, January 1992.
- [13] González, J.J., Sánchez, L., Gutiérrez-Solana, F., Setién J., "Cinética de Envejecimiento a Baja Temperatura y Fractura de Aceros Inoxidables Austenoferríticos de Moldería", publicado en este volumen.
- [14] Leger, M. T., "Predicting and Evaluating Ferrite Content in Austenitic Stainless Steels", *Stainless Steels Casting*, ASTM STP 756, 1982, pp. 105-125.