

OPTIMIZACIÓN DEL TRATAMIENTO TÉRMICO PARA LA MEJORA DE LAS PROPIEDADES DE LA ALEACIÓN X-750

D. Ferreño ⁽¹⁾, L. Sánchez ⁽¹⁾, I. Gorrochategui ⁽²⁾, J. Setién ⁽¹⁾, F. Gutiérrez-Solana ⁽¹⁾

(1) *Laboratorio de Ciencia e Ingeniería de los Materiales
E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.
Avda. Los Castros s/n. 39005 – Santander – España.*

(2) *NUCLENOR, S.A.
C/ Hernán Cortés 26. 39003 – Santander – España.*

Resumen. En el presente artículo se describe el estudio realizado sobre un componente estructural de aleación X-750 tendente a reducir la susceptibilidad que dicho material ha manifestado en el pasado frente a la corrosión bajo tensión intergranular (IGSCC) en el ambiente propio de centrales nucleares tipo BWR. Una posibilidad para paliar este fenómeno es la aplicación de un tratamiento térmico adecuado. La optimización de los parámetros de dicho tratamiento es el objetivo primordial de este trabajo, siempre garantizando la estabilidad geométrica del elemento, de acuerdo con las exigencias dimensionales prescritas.

Abstract. The present paper describes the study performed on an X-750 alloy structural component in order to reduce the susceptibility that this material has shown in the past to intergranular stress corrosion cracking (IGSCC) in the BWR nuclear power plants environment. One choice to mitigate this phenomenon is to apply an adequate heat treatment. The optimization of the parameters of the treatment is the main objective of this work, taking into account that the geometry of the element must be maintained according to its dimensional tolerances.

1.- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En los años ochenta se registraron varios fallos catastróficos en las vigas soporte de las bombas de chorro que forman parte del sistema de recirculación de los reactores nucleares de agua en ebullición (BWR). Dichos fallos obedecían al desarrollo de fisuras intergranulares por corrosión bajo tensión (IGSCC en adelante). La combinación de un exigente estado tensional, la presencia del ambiente agresivo propio del reactor y la susceptibilidad propia del material conforman la combinación de causas que da origen a esta problemática. Puesto que se trata de elementos de elevada responsabilidad cuya rotura conlleva la parada de la central con el consiguiente perjuicio económico, la empresa General Electric propuso una serie de medidas paliativas que pueden clasificarse como sigue:

- Reducción de la precarga. Ésta se aplica a las vigas para evitar las vibraciones propias de las bombas.
- Mejora del diseño de las vigas atenuando la concentración de tensiones.
- Aplicación de un tratamiento térmico sobre la viga generador de microestructuras más adecuadas, menos susceptibles frente a IGSCC.

Dependiendo de la época de construcción de cada central, algunas vigas cuentan con la totalidad de estas mejoras, con alguna de ellas o con ninguna, según los casos. En estas circunstancias, se dispone de un lote de vigas en las que únicamente se han implementado las dos primeras medidas paliativas, pero no la tercera, el tratamiento térmico mejorado. Resulta de interés, con ánimo de utilizar estas vigas como repuesto para las

existentes en centrales en explotación, evaluar la posibilidad de tratarlas térmicamente, adecuando así su comportamiento frente a la situación señalada.

Este objetivo implica la definición precisa de las características del tratamiento térmico, puesto que la bibliografía consultada no ofrece más que valores orientativos. Además, debe garantizarse el mantenimiento de las dimensiones geométricas del componente tras recibir el tratamiento, por tratarse de piezas de elevada precisión, con estrictas tolerancias dimensionales.

Para la realización del trabajo se dispone de una de las vigas objeto de estudio, semejante a la que se muestra en la Figura 1, junto con material de la misma aleación X-750 en estado laminado, considerado como de carácter auxiliar. Éste será utilizado en los estudios previos tendentes a la definición de los parámetros óptimos del tratamiento térmico (la viga debe preservarse pues sólo se dispone de una), una vez hecho lo cual se aplicará sobre la viga original verificando seguidamente la mejora del comportamiento en ambientes agresivos y la estabilidad dimensional. En el cumplimiento de los objetivos mencionados se plantea la siguiente secuencia metodológica, desglosada en cinco etapas:

- Revisión bibliográfica acerca de la aleación X-750 y sus posibles tratamientos térmicos.
- Trabajo experimental sobre el material auxiliar tendente a la optimización de los parámetros del tratamiento.
- Realización de un modelo numérico capaz de simular el efecto termo-mecánico del tratamiento

escogido sobre una viga de aleación X750 para estudiar el potencial efecto dimensional.

- Validación de la eficacia frente a IGSCC del tratamiento seleccionado. Comparación entre los diferentes tratamientos considerados.
- Aplicación del tratamiento seleccionado sobre la viga original disponible. Comprobación de la estabilidad dimensional y de la susceptibilidad atenuada frente a IGSCC.

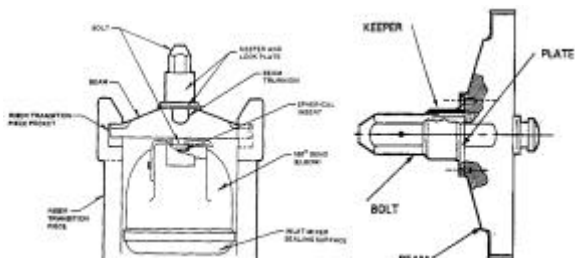


Figura 1: Viga soporte de las bombas de chorro

2.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En este apartado se recoge de manera resumida la información recopilada acerca de las características y comportamiento de la aleación X-750, los tratamientos térmicos más habituales, el efecto de cada uno de ellos, tanto desde un punto de vista microestructural como mecánico, y las recomendaciones existentes para componentes estructurales como el que constituye el objeto de este trabajo.

2.1.- Composición, propiedades y microestructura.

El material X-750 es una aleación base níquel, con contenidos apreciables de cromo y hierro que es endurecible por precipitación debido a las adiciones de aluminio y titanio. Presenta una buena resistencia frente a la corrosión y a la oxidación acompañada de un comportamiento mecánico y a fluencia notables hasta 700°C; además, manifiesta excelentes propiedades frente a la relajación. Por dichos motivos se emplea con asiduidad en componentes internos de reactores nucleares, como es este el caso [1]. En tal situación se ha constatado desde los años ochenta la presencia de fenómenos tipo IGSCC.

Las Tablas 1 y 2 muestran, respectivamente, los límites de composición química y las propiedades mecánicas a temperatura ambiente [2-3]. También se conocen las propiedades físicas.

Tabla 1: Composición química (% en peso)

	Ni	Cr	Fe	Co	Nb+Ta	Ti	Al	C
Min	70.0	14.0	5.0		0.70	2.25	0.40	0.02
Max		17.0	9.0	0.25	1.2	2.75	1.0	0.06

	S	P	Zr	B	Si	Cu	Mn	V
Min								
Max	0.01	0.008	0.05	0.007	0.50	0.50	1.00	0.1

Tabla 2: Propiedades mecánicas

Tensión Última σ_u (MPa)	Límite Elástico σ_y (MPa)	Elongación $\hat{\alpha}_r$ (%)	Módulo Elástico E (GPa)	Dureza Brinell (HB)
1137	690	20	207	330

El conocimiento de la microestructura de la aleación puede ser de gran ayuda a la hora de comprender la influencia de los tratamientos térmicos que serán estudiados posteriormente. Se trata de una aleación base níquel constituida por una matriz de fase γ (FCC) endurecible por envejecimiento al precipitar el compuesto intermetálico γ' (Ni_3Al). La fase γ' precipita homogéneamente y es coherente con la matriz γ [1]. El aluminio puede ser sustituido por titanio en la fase γ' hasta una concentración crítica atómica del 60%, más allá de la cual se forma una nueva fase de estructura HCP, Ni_3Ti , conocida como fase ζ .

El papel de la microestructura en el comportamiento depende de las cantidades de carburos de cromo intergranulares presentes; así, la óptima resistencia a IGSCC se obtiene con una microestructura que presenta cantidades significativas de carburos de cromo intergranulares. Tanto la temperatura de solubilización como el tratamiento térmico tienen un efecto sobre la cantidad y el tipo de carburos precipitados y, por extensión, sobre el comportamiento frente a IGSCC.

La aleación X-750 forma carburos metálicos MC y $M_{23}C_6$, donde M representa el constituyente metálico. En el tipo MC éste es Ti o Nb mientras que en el $M_{23}C_6$ se trata casi siempre de Cr. Los carburos MC tienen poco o ningún efecto sobre las propiedades mecánicas de la aleación X-750 y no aportan efectos directos sobre la resistencia a la corrosión aunque sí afectan, de manera indirecta, al reducir la cantidad de carbono disponible para la formación de carburos $M_{23}C_6$, que sí son beneficiosos frente a fisuración intergranular. Los carburos MC se forman a muy altas temperaturas y los $M_{23}C_6$ a bajas. Temperaturas de recocido superiores a 1066°C pueden disolver una gran cantidad de carburos MC, lo cual proporciona carbono para el endurecimiento por precipitación de $M_{23}C_6$ en tratamientos de envejecimiento secundario. Esto proporciona una indicación sobre una de las características importantes del tratamiento térmico a aplicar: ha de contar con una etapa a elevadas temperaturas de modo que se produzca una adecuada relación entre las cantidades de MC y $M_{23}C_6$, a fin de que la resistencia final a la corrosión bajo tensión de la aleación sea la óptima [2].

2.2.- Tratamientos térmicos habituales. Efecto microestructural y mecánico.

El efecto de los posibles tratamientos térmicos sobre la microestructura de la aleación X-750 ha sido estudiado de forma extensiva desde principios de los años cuarenta [4-5]. Los primeros trabajos sobre el desarrollo de los tratamientos térmicos estuvieron enfocados a

mejorar las propiedades mecánicas de resistencia y fluencia. Estos tratamientos son muy similares a los utilizados en la actualidad en aplicaciones para componentes de reactores nucleares, en los que es necesario mejorar otra serie de propiedades. Durante los años 80, algunos investigadores han proporcionado datos sobre la fisuración por corrosión bajo tensión en los ambientes húmedos de los reactores de agua ligera [2,6]. También existen trabajos sobre el comportamiento en fatiga de la aleación a alta temperatura en aire [7] y, recientemente, han aparecido estudios de corrosión-fatiga en ambientes húmedos [8].

Como consecuencia de estos estudios, los tratamientos térmicos más comunes que se realizan sobre esta aleación son básicamente los recogidos en la Tabla 3, la cual presenta la denominación y las etapas de cada tratamiento: SA: Solution annealed condition, AH: Equalized and aged condition, HTH: Solution annealed and aged condition, AHTH: Solution annealed, equalized and aged condition, HOA: Solution annealed and overaged condition.

Tabla 3: Tratamientos térmicos más comunes de la aleación X-750¹

Trat.	Solubilización	Intermedio	Precipitación
SA	1093°C/1h/wq/oq		
AH		885°C/24h/ac	704°C/20h/ac
HTH	1093°C/1h/wq/oq/ac		704°C/20h/ac
AHTH	1093°C/1h/wq/oq	885°C/24h/ac	704°C/20h/ac
HOA	1093°C/1h/wq/oq		760°C/100h/ac

Puede observarse cómo estos tratamientos consisten básicamente en una solubilización a alta temperatura y/o un envejecimiento, con algunas variantes. Tanto la temperatura de solubilización como el tratamiento térmico tienen un efecto sobre la cantidad y el tipo de carburos precipitados.

La influencia de los diferentes tratamientos de la Tabla 3 en las propiedades mecánicas [2] fue también revisada. La solubilización actúa sobre el tamaño de grano mientras que la etapa de envejecimiento genera precipitados de carburos tipo M₂₃C₆, responsables del endurecimiento. Es por ello que, de los tratamientos mencionados, únicamente el SA (que consiste únicamente en la etapa de solubilización) manifiesta una merma en sus propiedades mecánicas. En el resto de los casos la diferencia es reducida. Se obtuvieron los valores de límite elástico, tensión de rotura, reducción de área y deformación en rotura a 25 y 288°C. A modo de ejemplo se reproducen a continuación (Figura 2) los valores del límite elástico y la tensión de rotura a 25°C.

Se ha observado [2], asimismo, que en ensayos de fatiga en agua (corrosión-fatiga) la velocidad de propagación crece de manera muy apreciable cuando está asociada con mecanismos intergranulares. Los tratamientos

térmicos HTH y HOA garantizan, para cualquier temperatura, la ausencia de ataque intergranular. Desde esta perspectiva dichos tratamientos son altamente recomendables.

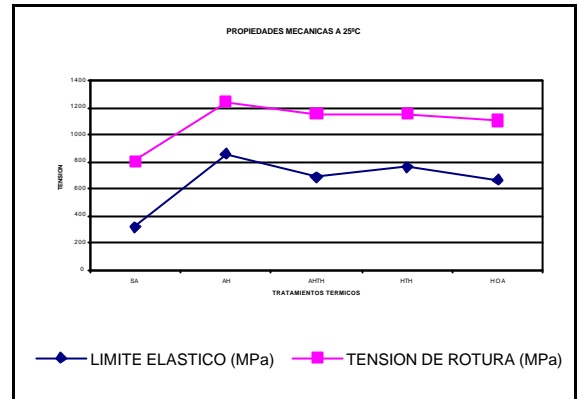


Figura 2: Límite elástico y tensión de rotura a 25°C en función del tratamiento térmico aplicado [2]

Se puede extraer como conclusión que desde un punto de vista mecánico los tratamientos HTH y HOA resultan equivalentes y ambos netamente superiores al resto de tratamientos estudiados, pues evitan los mecanismos intergranulares, responsables, en última instancia, de la problemática aquí estudiada. Puesto que el tiempo de envejecimiento es muy superior en el caso del material HOA, además de serlo también la temperatura, se concluye como recomendación, por motivos económicos (menos tiempo de horno en la etapa de precipitación), el empleo del tratamiento térmico HTH.

2.3.- Recomendaciones sobre el tratamiento térmico óptimo.

En función de los estudios previamente presentados y de la experiencia en las centrales nucleares, el EPRI (Electric Power Research Institute) elaboró unas recomendaciones sobre el tratamiento térmico óptimo para las vigas de la aleación X-750. El tratamiento propuesto es el denominado HTH, cuyas características son:

- a) Solubilización:
 - Temperatura: 1080°C ± 14°C
 - Tiempo: 1 hora
 - Enfriamiento: En aceite, en aire o en gases a presión
- b) Envejecimiento:
 - Temperatura: 715°C ± 14°C
 - Tiempo: 20-24 horas
 - Enfriamiento: En aire

Con este tratamiento se pretende conseguir un tamaño de grano óptimo y una distribución uniforme de carburos de cromo en borde de grano, responsables del buen comportamiento frente a IGSCC y de una adecuada respuesta mecánica.

Uno de los objetivos principales de este trabajo es la optimización de los intervalos de tiempos y de

¹ En la descripción de los tratamientos térmicos, wq indica temple en agua (water quenched), oq temple en aceite (oil quenched) y ac enfriamiento al aire (air cooled). Sobre ellos puede haber ligeras modificaciones en temperatura, tiempos y forma de enfriamiento.

temperaturas, así como la selección de entre los posibles enfriamientos que figuran en el esquema anterior. Así, las propiedades finales de la aleación, tanto mecánicas como de susceptibilidad frente a la corrosión intergranular, serán las mejores posibles.

3.- ESTUDIO POR EL MEF

En este apartado se recogen los resultados obtenidos mediante técnicas numéricas de la influencia de cada una de las partes del tratamiento térmico en el estado tensional y, particularmente, en las deformaciones residuales sobre la viga, dada la exigencia de estabilidad geométrica. El proceso simulado se corresponde con la recomendación hecha por el EPRI, tomando como valores de solubilización 1h a 1093°C y de envejecimiento 20h a 715°C. El pre y post proceso fue realizado con ABAQUS CAE [9] y el cálculo con ABAQUS Standard [10-11].

El estudio se planteó en dos etapas, considerando como despreciables los posibles efectos de relajación de tensiones que pudieran generarse durante el envejecimiento asociados a fenómenos de fluencia u otros no contemplables por el programa de EF. La presencia de fenómenos no lineales impide el empleo del principio de superposición. En la etapa de solubilización se han estudiado tanto los enfriamientos en aceite (velocidades promedio de 20°C/s) como en nitrógeno a presión (3°C/s). En el envejecimiento únicamente el caso de enfriamiento por nitrógeno a presión atmosférica (1.4°C/s). Los datos fueron obtenidos de los registros de calibración de hornos industriales. Estos parámetros se introdujeron en el modelo implementándolos como condiciones de contorno isoterma.

La Figura 3 muestra una imagen del mallado final del modelo cuya geometría fue ligeramente modificada para simplificar detalles complicados que pudieran afectar a la convergencia del cálculo numérico. Se ha considerado, asimismo, la existencia de dos planos de simetría en la pieza y, por ello, sólo una cuarta parte de la misma fue modelizada.

Las conclusiones extraídas de este estudio son:

- En el temple en aceite de la solubilización la diferencia entre las temperaturas exterior e interior puede alcanzar los 700 °C, en gas unos 110 °C.
- Las tensiones residuales también difieren notablemente. En términos de tensión equivalente de Von Mises, más de 1000 MPa en aceite mientras que en aire no se superan los 160 MPa. La Figura 4 muestra un mapa de colores de tensiones de Von Mises correspondiente al enfriamiento en aceite.
- Los valores de desplazamientos residuales son, en dirección longitudinal, para el caso de temple en aceite, de aproximadamente 0.5 mm, siendo en aire del orden de magnitud de centésimas de mm.
- Los resultados del envejecimiento implican valores ínfimos de tensiones o deformaciones residuales.

Se concluye, por tanto, que el enfriamiento en aire es más apropiado ya que conduce a una mayor seguridad en el cumplimiento de las tolerancias dimensionales de la viga así como a estados tensionales residuales menos exigentes.

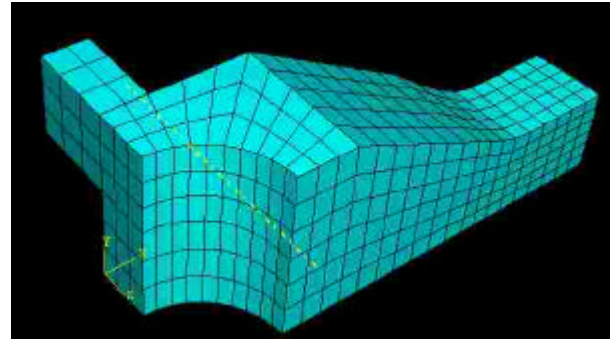


Figura 3 : Mallado final

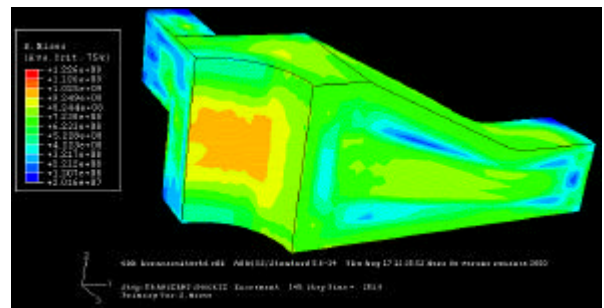


Figura 4 : Tensiones de Von Mises con enfriamiento en aceite

4.- PROCESO EXPERIMENTAL

El tratamiento térmico recomendado por el EPRI no viene descrito de manera precisa sino en forma de intervalos, tal y como se indicaba en el Apartado 2.3. Un estudio detallado de la influencia de cada uno de los parámetros presentados en forma de intervalo en las propiedades del material se vuelve necesario de cara a la optimización de dichos valores. Evidentemente, este proceso puede volverse sumamente complicado ya que son muchas las variables involucradas y, en ocasiones, la amplitud de los intervalos a estudiar. Por ello, se ha decidido actuar primeramente sobre los valores adecuados para la etapa de solubilización para, posteriormente, admitiendo aquellos, decidir sobre los correspondientes al envejecimiento.

Este análisis comparativo se ha realizado desde dos enfoques diferentes pero complementarios. Inicialmente, se ha estudiado la microestructura (microscopía óptica y electrónica), tamaño de grano, dureza y microdureza para, a posteriori, estudiar la susceptibilidad frente a IGSCC de cada tratamiento considerado por medio de ensayos apropiados. Como ya se ha indicado en esta parte del trabajo se hace uso exclusivamente del material laminado auxiliar.

Las conclusiones correspondientes al estudio del primer grupo de propiedades son las que siguen:

- La solubilización más adecuada consiste en una temperatura de 1093°C mantenida durante 1 h. Es la que proporciona un tamaño de grano más adecuado dentro de los límites EPRI.
- No se aprecian diferencias significativas entre el enfriamiento al aire o en aceite. En todo caso el enfriamiento más lento ofrece otro tipo de ventajas al considerar situaciones con tensiones o deformaciones residuales por la velocidad de enfriamiento diferencial.
- En cuanto al envejecimiento las recomendaciones del EPRI permiten un margen de temperaturas entre 701°C y 729°C. En cuanto al tiempo de envejecimiento se aconseja entre 20 y 24 horas. Teniendo en cuenta estas recomendaciones se propone como temperatura de envejecimiento la de 704°C y el tiempo de envejecimiento de 20 horas, muy utilizado en otros estudios. No se considera una temperatura más elevada ya que el proceso de endurecimiento, que llega prácticamente a la saturación a las 20 horas en todas las temperaturas, (véase la Figura 5), alcanza unos valores adecuados de dureza para dicho valor. Aunque en todos los tratamientos el material manifiesta suficiente resistencia, no es éste el objetivo de este trabajo.

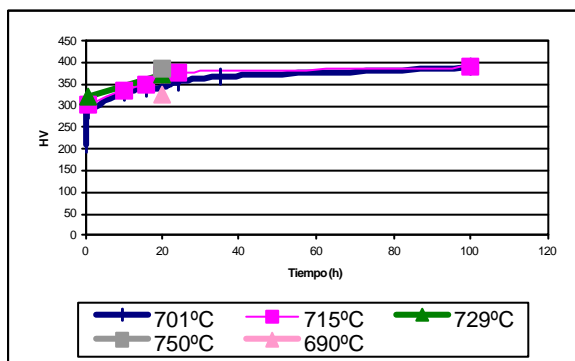


Figura 5 : Microdurezas Vickers tras los tratamientos de envejecimiento en función del tiempo

Por otra parte, la evaluación de la susceptibilidad frente a la IGSCC comprende varios ensayos de los cuales el más relevante es el Rising Load Test (R.L.T. en lo sucesivo). Se trata de un ensayo de flexión en tres puntos de probetas entalladas y preagrietadas de reducidas dimensiones en el que se compara (ver Figura 6) la respuesta en aire con la producida en un ambiente agresivo (agua desaireada a 93°C con circulación de argón) en condiciones de velocidad de deformación constante. El ensayo clasifica cada material atendiendo simultáneamente al valor del factor de intensidad de tensiones desarrollado para la máxima carga registrada y a la pendiente de la rama de propagación de fisura a partir de dicho máximo en la curva carga-desplazamiento. Se trata, en resumidas cuentas, de una medida conjunta de tenacidad y velocidad de propagación de fisura en ambiente agresivo.

Los tratamientos comparados son los que aparecen en la Tabla 4. Es preciso destacar que el tratamiento que aquí

figura con el índice 3 (AH) es el que fue aplicado con asiduidad en los años 70 en las mismas vigas que posteriormente manifestaron problemas de fisuración asistida por el ambiente y que, a la postre, han originado este trabajo.

Cada uno de estos tratamientos será calificado, de acuerdo con el criterio comentado anteriormente, como de Clase I (efecto ambiental severo, tratamiento rechazable), II (efecto significativo del ambiente) o III (efecto despreciable; comportamiento óptimo). Además, dentro de la Clase III se distingue entre los Grados A y B siendo éste menos favorable que el anterior. Estos resultados se presentan en la Tabla 5.

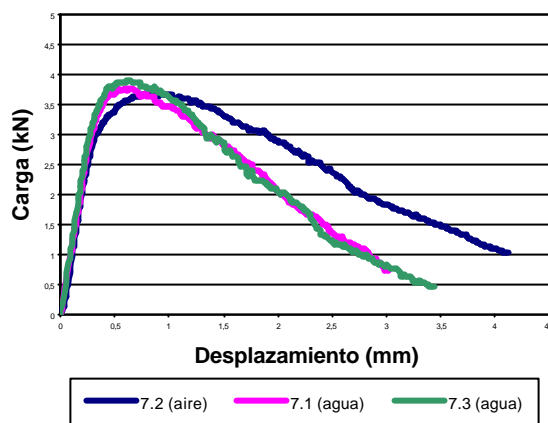


Figura 6 : Ensayos al aire y en agua del tratamiento 7, HTH, A

Tabla 4: Tratamientos térmicos estudiados

TRATAMIENTO 1: HTH, O			
Solubilización	Temple	Envejecimiento	Enfriamiento
1h, 1093 °C	Aceite	20h, 704 °C	Aire
TRATAMIENTO 2: HTH, 7S, A			
Solubilización	Enfriamiento	Envejecimiento	Enfriamiento
7h, 1093 °C	Aire	20h, 704 °C	Aire
TRATAMIENTO 3: AH			
Calentamiento	Enfriamiento	Enfriamiento	Mantenimiento
600 – 982 °C	885 °C, 24h	Aire	24 h, 704 °C
TRATAMIENTO 4: HTH,+S,O			
Solubilización	Temple	Envejecimiento	Enfriamiento
1,5h 1093 °C	Aceite	20h, 704 °C	Aire
TRATAMIENTO 5: HTH, LTS, O			
Solubilización	Temple	Envejecimiento	Enfriamiento
1h, 1066 °C	Aceite	20h, 704 °C	Aire
TRATAMIENTO 6: HTH, O, HTA			
Solubilización	Temple	Envejecimiento	Enfriamiento
1h, 1093 °C	Aceite	20h, 750 °C	Aire
TRATAMIENTO 7: HTH, A			
Solubilización	Enfriamiento	Envejecimiento	Enfriamiento
1h, 1093 °C	Aire	20 h, 704 °C	Aire

Tabla 5: Clasificación de los tratamientos térmicos estudiados

TRATAMIENTO	CLASIFICACIÓN
1: HTH, O	Clase III, Grado A
2: HTH, 7S, A	Clase III, Grado A
3: AH	Clase I, Rechazable
4: HTH, +S, O	Clase III, Grado A
5: HTH, LTS, O	Clase III, Grado A
6: HTH, O, HTA	Clase III, Grado B
7: HTH, A	Clase III, Grado A

La principal característica reseñable de estos resultados es el rechazo del tratamiento térmico 3 (AH), sospechoso a priori de ser el responsable de la susceptibilidad del material frente a la corrosión intergranular. Por otra parte, también se han observado otros resultados de interés que se resumen a continuación:

- Un enfriamiento en aire tras la solubilización es preferible frente a un temple en aceite.
- Tiempos de solubilización superiores a una hora no producen cambios apreciables.
- Se justifica la necesidad de temperaturas de solubilización elevadas (dentro del rango EPRI), recomendándose el valor de 1093°C.
- Si bien en los trabajos previos no se apreciaba la necesidad de una determinada temperatura de envejecimiento, estos resultados recomiendan un valor de 704°C.

Las conclusiones de este apartado señalan, por tanto, al tratamiento térmico 7 (HTH,A) como el más adecuado para resolver la problemática planteada. Se trata de un proceso tipo HTH consistente, tras optimizar los parámetros, en una etapa de solubilización de 1h a 1093°C seguida de un envejecimiento de 24h a 704 °C.

5.- APLICACIÓN SOBRE LA VIGA DISPONIBLE

Una vez definido el tratamiento optimizado, la siguiente etapa consiste en su aplicación sobre la viga en instalaciones industriales adecuadas para, finalmente, comprobar que se satisfacen todos los requisitos exigidos: por un lado los de estabilidad dimensional (que a la postre supondrán la validación o rechazo del modelo de EF generado) y, por otro, los de resistencia en ambientes agresivos (principalmente a través del ensayo R.L.T., previo despiece de la viga).

De manera muy resumida se describen seguidamente los principales resultados:

- Tras recibir el tratamiento optimizado y realizar un informe metrológico exhaustivo se ha comprobado la estabilidad geométrica del elemento y el cumplimiento de las tolerancias prescritas. Además, los pequeños desplazamientos residuales medidos coinciden, en orden de magnitud, con los previstos por el modelo numérico.
- El despiece de la viga para extraer probetas tipo R.L.T. se concentró en aquellas regiones

particularmente susceptibles a la aparición de fisuras en el pasado. El resultado de los ensayos fue el previsto, probetas de cualesquiera de las zonas estudiadas recibieron la clasificación de Clase III, Grado A, que garantiza un efecto ambiental insignificante.

- Además, se realizaron otros ensayos de cualificación del tratamiento (comportamiento mecánico –tracción y dureza-, tamaño de grano, estudio de inclusiones, diversos ataques) todos ellos con resultado positivo de acuerdo con las exigencias de la normativa consultada.

6.- CONCLUSIÓN

A la luz de las reflexiones anteriores se concluye que el tratamiento térmico optimizado debe constar de una etapa de solubilización de 1h a 1093°C seguida de una de precipitación de 20h a 704°C, con enfriamiento en gas inerte en ambos casos.

Se ha demostrado que este tratamiento garantiza el cumplimiento de los requisitos, tanto de estabilidad dimensional del elemento estructural tanto mecánicos y de resistencia frente a IGSCC del material.

7.- REFERENCIAS

- [1] A.A. Stein, M.S. Gennaro (1990), Material Specification for Alloy X750 for Use in LWR Internal Components (Revision 1), EPRI NP-7032 RP-2181-4.
- [2] R. Ballinger, C.S. Elliott, S. Hwang, J. Prybylowsky (1993), The Effect of Thermal Treatment on the Fracture Properties of Alloy X-750 in Aqueous Environment, EPRI CR-102-437.
- [3] Metals Handbook ASM, Ninth Edition, Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Pure Metals (Volumen 2).
- [4] T. Kekkonen and H. Hanninen (1985), The Effect of Heat Treatment on the Microstructure and Corrosion Resistance of Inconel X-750 Alloy.
- [5] Floreen, S. and Nelson, J.L. (1983), The Effects of Heat Treatment and Composition on the Stress Corrosion Cracking Resistance of Inconel Alloy X-750.
- [6] M.T. Miglin, H.A. Domian, D.L. Batty (1989), Microstructure and Stress Corrosion Resistance of Alloys X-750, 718 and A-286 in LWR environments, EPRI-NP-6392-SD.
- [7] Shahinian, P. (1978), Fatigue Crack Growth Characteristics of High-Temperature Alloys.
- [8] R.G. Ballinger, I.S. Hwang, C.K. Elliot (1993), The Effects Of Heat Treatment and Environment on Corrosion Fatigue, EPRI TR-102-436 P-2181-05.
- [9] Abaqus/CAE User`s Manual.
- [10] Abaqus/Standard User`s Manual. Volumen I, II y III.
- [11] Abaqus/Standard Example Problems Manual.