

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE DISTINTAS UNIONES SOLDADAS FRENTE A LA FATIGA DE AMPLITUD CONSTANTE Y VARIABLE.**B. Zamorano, G. Atxaga, I. Aramburu y A. M. Irisarri****FUNDACION INASMET Mikeletegi Pasealekua 2, 20009 San Sebastián.**

Resumen: Se ha estudiado el comportamiento a fatiga tanto de amplitud constante como variable de tres uniones soldadas diferentes. Estas tres uniones corresponden a dos efectuadas entre materiales similares (acero al carbono con acero al carbono y acero inoxidable ferrítico con acero inoxidable ferrítico) y una en que se soldó una chapa de acero al carbono con otra de acero inoxidable ferrítico. Se ha intentado predecir la vida a fatiga en condiciones de amplitud variable a partir de los resultados obtenidos en los ensayos de amplitud constante. Se comprobó que la valoración era muy poco precisa ya que en ocasiones los valores experimentales rebasaban notablemente las expectativas y en otros la rotura se producía con una notable antelación al momento previsto. Esta dispersión se atribuyó a la heterogeneidad de las uniones soldadas. El examen en el microscopio electrónico de barrido de estas probetas reveló una falta de unión en aquellas que habían fallado de forma prematura, en tanto que las que habían mostrado una mayor vida a fatiga no presentaban defectos apreciables.

Abstract: The constant and variable amplitude fatigue behaviours of three welded joints have been studied. These joints correspond to two performed between similar materials (carbon steel – carbon steel and ferritic stainless steel – ferritic stainless steel) and one between dissimilar materials (carbon steel – ferritic stainless steel). The fatigue life under variable amplitude loading has been evaluated using the data obtained in the constant amplitude tests but it has been realised that predictions are poor because in some cases experimental values are markedly higher than expected while in other ones failure occurred prematurely. This lack of precision was attributed to the heterogeneity of the welded joints. Scanning electron microscope examination revealed that those that failed before than expected exhibit a lack of joining while those that have shown longer lives are practically free of weld defects.

1. INTRODUCCIÓN

La fatiga constituye el mecanismo responsable del fallo de un gran número de componentes que operan en unas condiciones de servicio que implican la aplicación de sucesivos ciclos de carga. Un único ciclo puede no ser suficientemente dañino para provocar la aparición de una grieta en la estructura pero la repetida aplicación de los ciclos conduce a su aparición, progresando hasta producirse el fallo, a menos de ser detectada en alguna de las inspecciones periódicas que se efectúen.

Como consecuencia, la estimación de la vida a fatiga de las estructuras resulta totalmente imprescindible si se desea garantizar que éstas operan de una forma segura y fiable, extrayendo sus máximas prestaciones pero sin que se produzcan fallos inesperados. El problema surge a la hora de intentar efectuar estas predicciones en base a los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio, ya que en la inmensa mayoría de los casos, éstos se han realizado en unas condiciones de fatiga de amplitud constante, totalmente diferentes a las que debe soportar la estructura en servicio, constituidas por una variación aleatoria de la tensión a lo largo del tiempo. En otro trabajo, que se presentará también en este Encuentro, se discuten los distintos métodos que se han propuesto para intentar utilizar los datos obtenidos en los ensayos de probetas realizados en unas condiciones de fatiga de amplitud constante en

la valoración de la vida de unas estructuras que operan sometidas a un espectro de cargas complejo, señalando las ventajas y limitaciones de cada uno ellos [1].

Para valorar la precisión de los diferentes modelos se utilizaron, además de datos extraídos de la bibliografía, una serie de resultados de fatiga de amplitud constante y variable que habían sido obtenidos en INASMET en un estudio previo. En éste se caracterizó la vida a fatiga de tres diferentes tipos de uniones soldadas; dos de ellas realizadas entre muestras de materiales similares (acero al carbono con acero al carbono y acero inoxidable ferrítico con acero inoxidable ferrítico) y la tercera uniendo dos materiales disimilares (acero al carbono con acero inoxidable ferrítico).

Como se comenta posteriormente, el empleo de la ley de acumulación de daño lineal de Palmgren y Miner, método que fue el primero utilizado en razón de su sencillez, condujo a unas predicciones que en algunos casos eran inferiores a los resultados experimentales, en tanto que en la gran mayoría el fallo se producía con antelación al plazo previsto. Esta pobre precisión de las previsiones se podía atribuir a la incapacidad de la ley para ofrecer unas predicciones fiables. Sin embargo, un análisis más detallado de los resultados obtenidos pone claramente de manifiesto la fuerte dispersión existente entre los valores registrados, tanto en los ensayos de fatiga de amplitud constante como, principalmente, en

los de amplitud variable. Por tanto, parece razonable el profundizar en el estudio de estos datos, y en el análisis de las probetas ensayadas, antes de pensar en aplicar otros modelos que requieren un cálculo más complejo.

En el presente trabajo se ofrece el análisis fractográfico de las distintas probetas, efectuado en el microscopio electrónico de barrido, y en base a estas observaciones se discuten las causas posibles de la falta de precisión de las predicciones de vida.

2. TÉCNICA EXPERIMENTAL

2.1. Materiales

Los materiales base empleados en el presente estudio consistieron en varias muestras de tubo, de 2 mm de espesor y una sección cuadrada de 50 x 50 mm, de dos aceros diferentes. El primero es un acero al carbono de media resistencia, calidad St - 42, y el otro un acero inoxidable ferrítico tipo AISI 409 con un contenido en carbono muy bajo (0.014%), 11.3% de cromo y unas pequeñas cantidades de níquel (0.39%) y titanio (0.1%) como únicos elementos de aleación reseñables. Se ve claramente que el porcentaje de cromo se halla en el límite inferior para mantener el carácter inoxidable del acero.

2.2. Uniones soldadas

Se efectuaron tres tipos de uniones soldadas diferentes entre estos materiales. Dos de ellas se llevaron a cabo uniendo muestras de un mismo acero (bien dos tubos de acero al carbono, o bien dos de acero inoxidable ferrítico) en tanto que la tercera unió entre sí dos aceros diferentes (acero al carbono con acero inoxidable ferrítico). Todas estas uniones se realizaron a tope por el proceso de soldadura por arco bajo gas de protección con electrodo consumible, habitualmente conocido con el nombre de proceso MIG. El aporte utilizado para la unión de las muestras de acero al carbono fue también un acero al carbono, en tanto que para las uniones entre las muestras de acero inoxidable o las de éste con el acero al carbono se usó un aporte de acero inoxidable austenítico tipo AISI 309. Se realizaron cuatro uniones soldadas de cada tipo en las mismas condiciones para permitir la extracción de todas las probetas necesarias para poder caracterizar el comportamiento a fatiga.

2.3. Ensayos de fatiga

La caracterización del comportamiento a fatiga se basó en la realización de ensayos de amplitud constante y de amplitud variable. Para este trabajo se mecanizaron de cada una de las distintas uniones soldadas, 16 probetas de fatiga planas (4 de cada uno de los tubos soldados), de 12 mm de anchura en su zona de ensayo y 50 mm de longitud de dicha zona. Estas probetas se extrajeron en la dirección transversal al cordón, y abarcando el metal depositado, ambas zonas afectadas y los dos materiales base. Dos de estas probetas se emplearon para efectuar los ensayos de tracción necesarios para determinar la

resistencia mecánica que posee cada unión. Además se obtuvieron otras cuatro para los ensayos de doblado de homologación del procedimiento de soldadura.

Diez de estas probetas se destinaron a la determinación de la curva de la amplitud de tensión frente al número de ciclos a rotura. Para ello se ensayaron aplicando una tensión axial, con control por carga y con una amplitud de tensión constante, conforme a las indicaciones de la norma ASTM E466 [2]. La relación entre las tensiones mínima y máxima R fue siempre cero. Todos los ensayos se prolongaron hasta que se produjera la rotura de la probeta o hasta que se alcanzara un límite de fatiga establecido en 2.000.000 ciclos, momento en el que se detuvo el ensayo.

Las cuatro probetas restantes extraídas de cada junta se ensayaron también bajo sollicitación axial y control por carga, pero, en este caso, bajo una amplitud de tensión variable, si bien se mantuvo la relación $R = 0$ entre la tensión mínima y la máxima de cada uno de los ciclos. Los ensayos se realizaron aplicando repetidos bloques de 100 ciclos de tensión baja, seguidos de 10 ciclos de alta, para volver a aplicar a continuación otros 100 ciclos de tensión baja y repitiendo el proceso hasta que se produce la rotura. Todos los ensayos de fatiga, sean de amplitud constante o variable, se efectuaron a temperatura ambiente.

2.3. Estudio fractográfico

Una vez finalizados los ensayos, una mitad de cada una de las probetas se destinó al análisis de su superficie de fractura en el microscopio electrónico de barrido. Por otra parte, se extrajo una probeta metalográfica, de la otra mitad para su examen en el microscopio óptico y, en algún caso, en el microscopio electrónico de barrido para intentar relacionar las facetas microestructurales y la posible presencia de defectos de soldadura con el comportamiento a fatiga de las uniones soldadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las figuras 1 a 3 muestran los resultados registrados en los ensayos de fatiga de amplitud constante de las probetas extraídas de las uniones soldadas de acero al carbono con acero al carbono, de acero inoxidable con acero inoxidable y de acero al carbono con acero inoxidable, respectivamente. La simple observación de estas gráficas revela algunos aspectos que merecen ser comentados.

En primer lugar, en todas estas gráficas se aprecia una fuerte dispersión de resultados, especialmente en las uniones en que interviene el acero inoxidable ferrítico, la cual no puede atribuirse, al menos en exclusiva, a la variación asociada con los resultados de los ensayos de fatiga. Por otro, la comparación entre las prestaciones de cada una de las juntas evidencia que el remplazar el acero al carbono por un acero inoxidable ferrítico, más caro, no sólo no representa ninguna mejora substancial sino que los resultados obtenidos son peores. Caso de

no ser absolutamente necesario el empleo de un acero inoxidable se recomienda por tanto continuar usando el tradicional acero al carbono de media resistencia, por lo menos hasta que se consiga obtener unas uniones soldadas de mejor calidad.

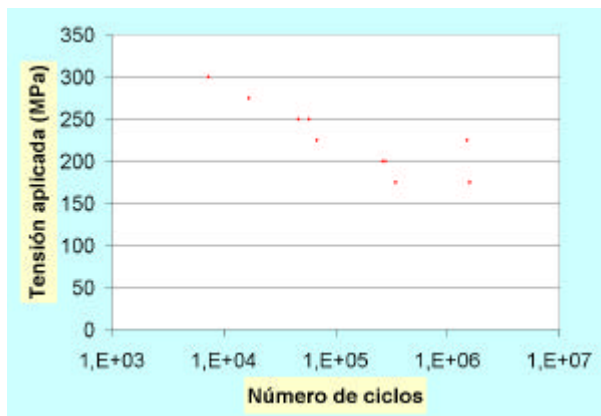


Fig. 1. Gráfica de la amplitud de tensión frente al número de ciclos a rotura obtenida en el ensayo de las probetas extraídas de la unión soldada acero al carbono – acero al carbono.

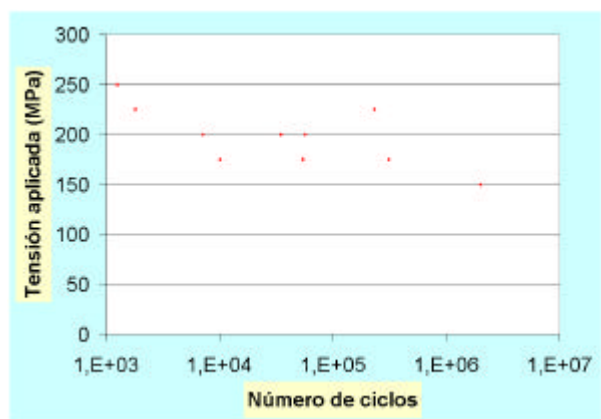


Fig. 2. Gráfica de la amplitud de tensión frente al número de ciclos a rotura obtenida en el ensayo de las probetas extraídas de la unión soldada acero inoxidable ferrítico – acero inoxidable ferrítico.

Finalmente, el simple examen visual de las probetas de fatiga, atacadas con el reactivo metalográfico adecuado para revelar las diferentes zonas de la junta, permite observar que el fallo de absolutamente todas ellas se ha producido en la zona de metal depositado. En el caso de las juntas en que uno de los materiales a unir era el acero inoxidable ferrítico, la rotura se produjo en el centro del cordón, pudiéndose calificar este resultado como esperado dada la menor resistencia mecánica del acero inoxidable austenítico que se empleó como metal de aporte. Conviene señalar que los ensayos de tracción condujeron a un valor medio de resistencia a la tracción de 188 MPa, en la unión efectuada entre dos muestras de acero inoxidable ferrítico, y de tan sólo 155 MPa, en las uniones disimilares entre acero al carbono y acero inoxidable. Se aprecia que ambos valores se sitúan por debajo de la amplitud de tensión aplicada en algunos

ensayos de fatiga. Sorprende en principio que el fallo de estas probetas no se produjera de forma inmediata sino tras soportar un considerable número de ciclos. El estudio fractográfico de las muestras en el microscopio electrónico de barrido permite ofrecer una justificación a esta aparente contradicción.

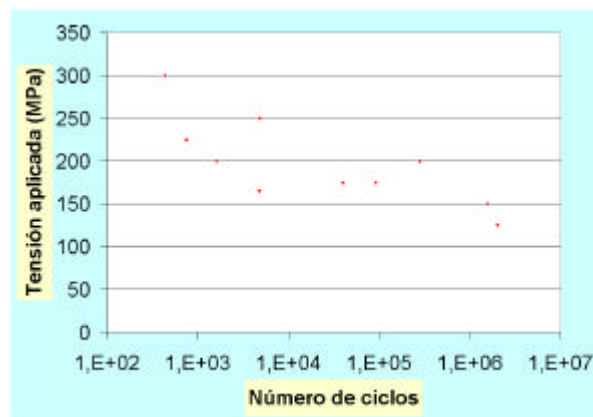


Fig. 3. Gráfica de la amplitud de tensión frente al número de ciclos a rotura obtenida en el ensayo de las probetas extraídas de la unión soldada disimilar acero al carbono – acero inoxidable ferrítico.

Sin embargo, en las uniones efectuadas entre muestras de acero al carbono la mayoría de los fallos se produjo a lo largo de la línea de fusión, límite entre el material base y el metal depositado. En este caso la resistencia a la tracción de la junta (422 MPa) supera claramente al valor de la amplitud de tensión aplicada en los ensayos de fatiga, por lo que no surge la citada contradicción. No obstante, tal y como se comenta posteriormente, el estudio fractográfico revela que esta unión también se halla lejos de ser uniforme.

Tabla 1. Resultados obtenidos en los ensayos de fatiga de amplitud variable de las probetas extraídas de las diferentes uniones soldadas.

Unión	Tensiones Baja / Alta	Número de bloques de ciclos
C - C	100 / 275	5055
C - C	100 / 250	> 18200
C - C	100 / 250	2463
C - C	100 / 225	2589
I - I	100 / 225	147
I - I	100 / 225	190
I - I	100 / 200	23
I - I	100 / 200	1189
C - I	100 / 225	254
C - I	125 / 200	1681
C - I	100 / 200	948
C - I	175 / 150	30

La tabla 1 resume el número de bloques de 100 ciclos de la tensión baja y 10 de la alta que se han aplicado hasta que se produjo la rotura. Se puede observar que salvo en el ensayo de una de las probetas extraídas de

la unión entre dos muestras de acero al carbono en que se rebasó el límite establecido sin que se produjera la rotura, en los restantes casos ésta se observó tras un número bastante reducido de bloques de ciclos de baja y alta amplitud de tensión. Una vez más, se aprecia que las prestaciones de la unión acero al carbono – acero al carbono son superiores a las ofrecidas por las uniones entre dos muestras de acero inoxidable ferrítico o en las uniones disimilares entre acero al carbono e inoxidable ferrítico. Esta observación se halla en concordancia con la tendencia mostrada por los resultados de los ensayos de fatiga de amplitud constante.

Con el fin de comprobar el grado de precisión de los distintos modelos de acumulación del daño de fatiga se ha efectuado una evaluación de la vida a fatiga de las diferentes uniones, en condiciones de amplitud variable utilizando los datos obtenidos en los ensayos de fatiga de amplitud constante. Estas predicciones de vida se han comparado con los valores del número de ciclos a rotura registrados en los ensayos de fatiga de amplitud variable.

En primer lugar se ha empleado la ley de acumulación de daño lineal propuesta por Palmgren [3] y Miner [4], ley que, aunque ha recibido numerosas críticas, sigue gozando de un notable grado de aceptación debido a su gran sencillez de cálculo. Para ello se ha aplicado la expresión:

$$X \cdot \left\{ (100 / N_1) + (10 / N_2) \right\} = 1 \quad (1)$$

Donde N_1 y N_2 representan el número de ciclos a rotura obtenido en los ensayos de fatiga de amplitud constante para las tensiones baja y alta, respectivamente, y X es el número de bloques de ciclos que se deberían aplicar hasta que se produzca el fallo. Para algunas amplitudes de tensión se han obtenido en los ensayos de fatiga de amplitud constante dos valores del número de ciclos a rotura que son notablemente diferentes. En estos casos se ha optado por efectuar el cálculo individualmente con cada uno de ellos, al objeto de valorar la dispersión que pudiera producirse en las predicciones, en lugar de adoptar la media de ambos o el valor que se obtendría por el ajuste de todos los datos experimentales a una curva.

La tabla 2 permite comparar las predicciones realizadas en cada caso frente a los resultados experimentales que se obtuvieron en los ensayos de amplitud variable. Se puede comprobar que existe una fuerte discrepancia entre unos, sin que se pueda observar una tendencia a sobreestimar o subestimar la vida a fatiga. La primera impresión que se obtiene es que el método fracasa en su intento de ofrecer una predicción correcta del daño acumulado en unas condiciones de fatiga de amplitud variable y se debería buscar otro más preciso para conseguir efectuar con éxito esta labor.

Conviene recordar que se ha señalado que la ley de acumulación de daño de Palmgren y Miner tiende a subestimar el daño cuando primero se aplican los ciclos

de mayor amplitud y a sobrestimarlo cuando el orden es el inverso [5]. En el presente caso el cambio de amplitud se produce varias veces, tanto en el sentido baja – alta como en el opuesto, por lo que no existe certeza acerca de cual de ellos será el que predomine.

Tabla 2 Predicciones de vida a fatiga de amplitud variable y resultados obtenidos en los ensayos.

Unión	Tensiones	Predicción	Resultado
C - C	100 / 225	17636 / 5087	2589
C - C	100 / 250	3773 / 4473	> 18200 / 2463
C - C	100 / 275	1549	5055
C - I	100 / 225	74	254
C - I	100 / 200	11707 / 160	1681 / 948
C - I	150 / 175	5774 / 3167	30
I - I	100 / 225	179 / 10732	147 / 190
I - I	100 / 200	2976 / 4436 / 685	23 / 1189

Sin embargo, habida cuenta de la fuerte dispersión de resultados observada, tanto en los ensayos de fatiga de amplitud constante como variable, que pone en duda la homogeneidad de estas uniones soldadas, se consideró conveniente efectuar un estudio fractográfico de las diferentes probetas en el microscopio electrónico de barrido. Los resultados de este estudio se comentan a continuación.

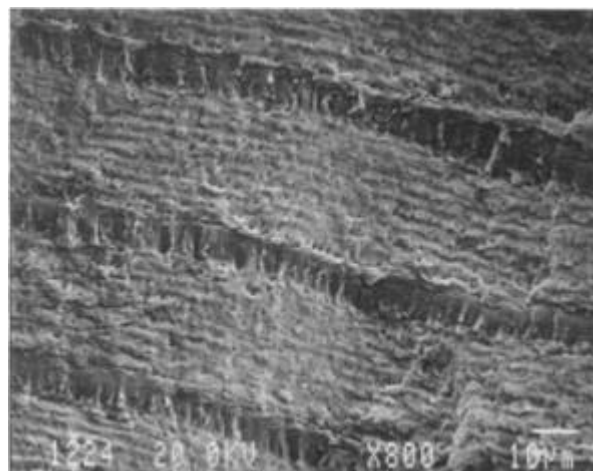


Fig. 4. Micrografía de la superficie de fractura de una probeta ensayada a fatiga de amplitud variable.

El examen de las superficies de fractura de las probetas en el microscopio electrónico de barrido ya revela una primera diferencia entre las que han mostrado un buen comportamiento a fatiga y las que fallaron de forma prematura. Las primeras muestran la morfología típica de una rotura por fatiga que si bien se observa en todas ellas es particularmente evidente en las ensayadas bajo esfuerzos de fatiga de amplitud variable. En este caso, tal y como se aprecia en la micrografía de la figura 4 se distinguen claramente las huellas dejadas por los ciclos de mayor amplitud, sensiblemente más acentuadas, de

las correspondientes a los demás ciclos, que aparecen mucho menos marcadas. Si todas las probetas hubieran presentado esta morfología de fractura se podría haber medido el avance producido por cada ciclo de fatiga y, de esta forma, calculado el daño.

Desgraciadamente, la morfología de la mayoría de las fracturas es totalmente diferente, lo que impide llevar a cabo con éxito esta tarea. En la mayoría de las probetas se observa la presencia de un gran número de cúpulas dúctiles, que llegan a ocupar una fracción apreciable de la superficie de fractura, entre las cuales se intercalan zonas, mucho menos extensas, de estrías de fatiga. La micrografía de la figura 5, obtenida en la superficie de fractura de una probeta extraída de la unión entre dos muestras de acero inoxidable, permite apreciar un claro ejemplo de esta morfología mixta. La presencia de las cúpulas dúctiles en la superficie de fractura indica la contribución a la rotura de un mecanismo estático de coalescencia de microcavidades, además del lógico de fatiga, acelerando el mismo y acortando la vida a fatiga de la unión soldada. Esta observación concuerda con obtenidos en los resultados de los ensayos efectuados.

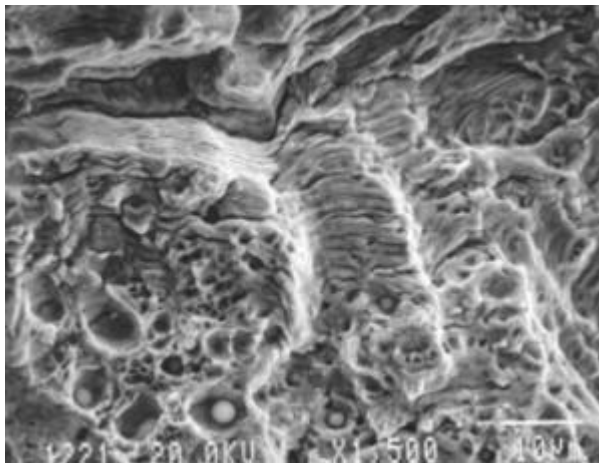


Fig. 5. Micrografía de la superficie de fractura de una probeta ensayada a fatiga mostrando la presencia de cúpulas dúctiles y estrías de fatiga.

Esta observación ya marca una apreciable diferencia entre las probetas que fallaron de forma prematura y aquellas otras que mostraron un buen comportamiento a fatiga. No obstante, es el examen de aquellas cuya vida a fatiga fue especialmente corta el que revela las diferencias existentes entre unas y otras probetas que se extrajeron de la misma unión soldada, confirmando la falta de homogeneidad de las juntas. Efectivamente, la micrografía de la figura 6, obtenida en la superficie de fractura de otra probeta de fatiga extraída de la misma unión entre dos muestras de acero inoxidable, exhibe una zona clara constituida por el material que ha sido unido por soldadura y otras, de tonalidad más oscura, en las que aún se aprecia la superficie inalterada de la muestra que se pretendía unir, indicando que el intento de conseguir una unión fiable y homogénea se saldó con un fracaso.

Una simple valoración de las áreas ocupadas por unas y otras permite constatar que la sección unida tan sólo representa una mínima fracción del total. Esto supone que la sección resistente es sensiblemente menor que la calculada teóricamente y, por tanto la tensión aplicada realmente notablemente mayor que la calculada. Si a esto se añade el hecho de que la observación a mayores aumentos de la superficie de fractura de esta probeta pone de manifiesto que incluso en las zonas unidas la rotura por fatiga ha tenido una participación mínima, y que ésta se ha producido fundamentalmente provocada por mecanismos de fallo estático, la justificación de la corta vida a fatiga es evidente.

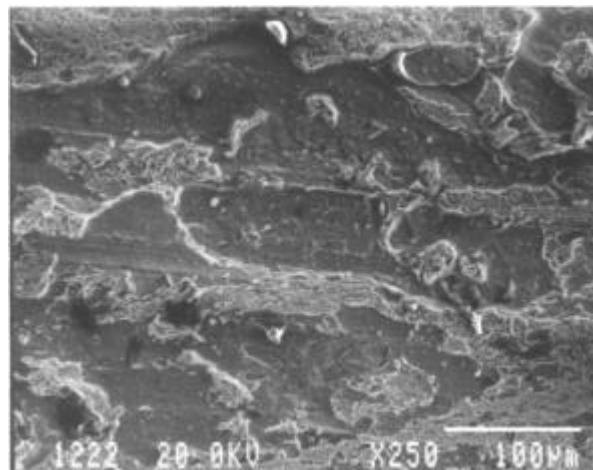


Fig. 6. Micrografía de la superficie de fractura de una probeta ensayada a fatiga mostrando la presencia de amplias zonas sin unir.

Aunque los defectos son particularmente apreciables en la unión inoxidable – inoxidable también se observan en las uniones disimilares y, en menor medida, en las efectuadas entre acero al carbono e inoxidable. A título de ejemplo en la micrografía de la figura 7 se presenta un poro, de dimensiones considerables, presente en la superficie de fractura de una de las probetas extraídas de la unión disimilar.

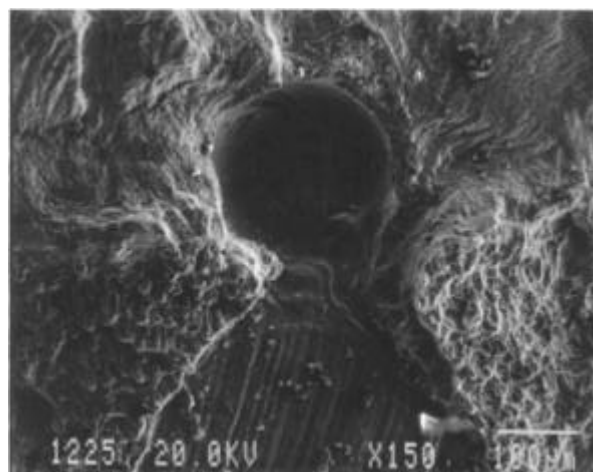


Fig. 7. Micrografía de la superficie de fractura de una probeta ensayada a fatiga mostrando la presencia de un poro de dimensiones considerables.

Aún más, antes se ha comentado que la resistencia a la tracción de las uniones soldadas acero inoxidable – acero inoxidable y acero al carbono – acero inoxidable era inferior a la máxima tensión aplicada en algunos ensayos de fatiga, de amplitud constante o variable, lo que, en principio, resulta una clara contradicción. Sin embargo, el examen en el microscopio electrónico de barrido de las superficies de fractura de las probetas de tracción revela que también éstas se hallan plagadas de defectos que afectan negativamente a su resistencia, que resulta notablemente inferior a la que sería capaz de ofrecer una junta sana.

Finalmente, conviene señalar que estas observaciones de microscopía electrónica se han visto refrendadas por las efectuadas en el microscopio óptico. Como se ha indicado se han obtenido muestras metalográficas de las otras mitades de las probetas de ensayo, incluyendo las superficies de fractura. El examen de estas probetas en el microscopio óptico confirma que la soldadura ha conseguido unir adecuadamente tan sólo un pequeño porcentaje del espesor del tubo. La micrografía de la figura 8 permite comprobar este punto.

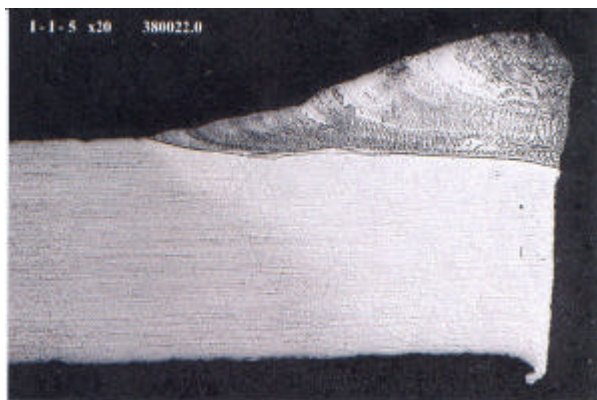


Fig. 8. Micrografía de una sección transversal a la unión inoxidable – inoxidable.

A la vista de todas estas observaciones la conclusión en el sentido de atribuir el mínimo acierto conseguido en la valoración de vida a fatiga a la heterogeneidad de las uniones soldadas, y a la consiguiente dispersión de los valores de la vida a fatiga, y no a una falta de precisión del método empleado en estas predicciones parece lógica. Por tanto, se considera que las mejoras en las predicciones que se pudieran lograr por la utilización de otros métodos más complejos sería, cuando mucho, mínima y no justifica el trabajo adicional que requiere.

4. CONCLUSIONES

a.- Los resultados de los ensayos de fatiga muestran una fuerte dispersión que ha sido atribuida a la acusada heterogeneidad existente en las uniones soldadas.

b.- Las uniones efectuadas entre dos muestras de acero inoxidable o las disimilares entre acero al carbono e inoxidable exhiben un comportamiento a fatiga inferior

al que presentan las uniones realizadas entre muestras de acero al carbono por lo que la sustitución de este material no se ve justificada desde este punto de vista.

c.- El estudio metalográfico y la observación de las superficies de fractura en el microscopio electrónico de barrido ponen de manifiesto que las uniones realizadas no cubren la totalidad de la sección de las muestras de material base, sino que una gran parte queda sin unirse adecuadamente. Esto supone una disminución de la sección efectiva que conduce a una rotura prematura, no sólo por la menor resistencia del acero austenítico usado como aporte, sino, fundamentalmente, por esta falta de unión de gran parte de la sección.

d.- El análisis fractográfico muestra la presencia de un considerable número de cúpulas dúctiles, que llegan a constituir la mayor parte de la superficie de fractura, lo que indica la participación en el proceso de rotura de un mecanismo de fallo estático por coalescencia de microcavidades, lo que supone una mayor velocidad de propagación de las grietas de fatiga y un menor tiempo a rotura. Además se observan algunos defectos de otro tipo, tales como poros, que actúan en el mismo sentido.

e.- La razón más plausible de la pobre precisión de las predicciones de la vida a fatiga se halla en la falta de homogeneidad de las uniones soldadas y, por tanto, de los resultados de los ensayos y no en el método usado en esta predicción. Por este motivo, se considera que el empleo de otros modelos más complejos no conducirá a mejoras apreciables en las predicciones y su no se justifica, aún menos si se considera el trabajo adicional que este cambio conlleva.

f.- Es necesario conseguir una mejora en la calidad de las uniones soldadas para optimizar las prestaciones de las mismas y poder considerar ventajosa la sustitución del acero al carbono por acero inoxidable, aspecto que en la situación actual no sólo no representa beneficio alguno sino que parece incluso contraproducente.

5. REFERENCIAS

- [1] Aramburu I. e Irisarri A. M. “Análisis de los modelos de acumulación de daño de fatiga” a ser presentado en este mismo Encuentro (2003).
- [2] ASTM E466 Standard practice for conducting constant amplitude axial fatigue tests of metallic materials. Annual Book of Standards, Vol. 03.01
- [3] Palmgren A. Die Lebensdauer von Kugellager. Z.V.D.I. Vol. 68, 1924, 339-341
- [4] Miner M. A. Cumulative Damage in Fatigue. J. Appl. Mech. Vol. 12, 1945, A159 – A164.
- [5] Manson S. S. y Halford G. R. Re-examination of Cumulative Fatigue Damage Analysis – An Engineering Perspective. Engng. Frac. Mech. Vol. 25, Nº 5/6, 1986, 539 – 571.