

UNA APROXIMACIÓN MICROESTRUCTURAL AL ESTUDIO DE LA FATIGA EN ENTALLAS CON TRATAMIENTO DE GRANALLADO

C. Vallellano, A. Navarro

Dpto. de Ingeniería Mecánica y de los Materiales

E.T.S.I.I. de Sevilla, Camino de los Descubrimientos s/n, 41092, SEVILLA

Resumen. El granallado es uno de los métodos clásicos de tratamiento superficial aplicado frecuentemente para mejorar la resistencia a fatiga de componentes metálicos. Los efectos macroscópicos de dicho proceso son la creación de una capa superficial endurecida por deformación en frío y la generación de un campo de tensiones residuales de compresión. Éstos son consecuencia de los cambios microestructurales producidos en la superficie del metal, tales como un incremento en la densidad de dislocaciones y una elevada deformación de los granos originales del material. En este artículo se pretende realizar un primer análisis de la mejora de la resistencia a fatiga de componentes entallados con tratamiento de granallado, basado en el conocimiento actual de la mecánica de fractura microestructural. El modelo planteado reproduce el comportamiento de las grietas pequeñas creciendo en un componente entallado con tratamiento de granallado, incorporando la influencia de las tensiones residuales y de la distorsión de la microestructura en la superficie de la pieza.

Abstract. Shot-peening is a classical method of surface engineering frequently applied to increase the fatigue resistance of metallic components. The macroscopic effects of this process are the creation of a cold work-hardened surface layer and a compressive residual stress field. These macroscopic effects are the consequence of microstructural changes within the surface layer, such as an increase in the density of dislocations and high deformation of the original grains. In this paper a first attempt is made to analyse the enhancement of fatigue resistance in shot-peened components based on the present understanding of microstructural fracture mechanics principles. The model developed reproduces the behaviour of small cracks growing in a notched shot-peened component, incorporating the influence of the residual stress field and the microstructural distortion in the surface.

1. INTRODUCCION

El comportamiento a fatiga de los metales está fuertemente influenciado por el estado y las propiedades mecánicas de la superficie y las capas subsuperficiales. Uno de los tratamientos superficiales empleados más frecuentemente en la industria para mejorar la resistencia a fatiga de componentes metálicos es el granallado (shot-peening), esto es, el bombardeo de la pieza con pequeñas bolas, en general, de material más duro que el que está siendo tratado. La eficacia de este proceso depende de gran número de variables, fundamentalmente de la energía del haz incidente (diámetro de la granalla, velocidad y ángulo de incidencia), del grado de cobertura (el cual debe ser en general superior al 100% para asegurar una distribución regular de las tensiones residuales) y de la dureza de la granalla. La combinación de tales parámetros produce diferentes distribuciones de tensiones residuales y dureza en la superficie y la subsuperficie de la pieza, de los cuales dependerá el comportamiento final de ésta y que, por tanto, deberán ser optimizados para cada material y aplicación específica. Sin embargo, no existe una teoría plenamente aceptada para determinar dichos perfiles de tensiones residuales y de dureza a partir de

los parámetros de operación del proceso de granallado y cuál es su influencia real en la mejora de resistencia del espécimen. La mayoría de las teorías actuales están basadas, por lo general, en consideraciones puramente fenomenológicas.

La evidencia experimental pone de manifiesto que este tratamiento es más efectivo en componentes sometidos a flexión o torsión, donde las tensiones máximas se producen en la superficie, siendo menos eficaz cuando la tensión es uniforme a lo largo de la sección del mismo. La interacción entre el gradiente de tensiones debido a la carga aplicada y la distribución de tensiones residuales de compresión en las proximidades de la superficie parece jugar un importante papel en el proceso de fatiga. Así, un caso de gran interés práctico en el que el granallado proporciona una mejora sustancial en la resistencia a fatiga es el de componentes con concentradores de tensión.

Está suficientemente bien establecido que uno de los principales factores que gobiernan el crecimiento de una grieta por fatiga en materiales metálicos y, por ello, su resistencia a fatiga, es la interacción de dicha grieta en sus estadíos iniciales con las barreras al deslizamiento

plástico existentes en el material (e.g. los bordes de grano). Las técnicas basadas en la Mecánica de la Fractura Microestructural [1] permiten describir razonablemente bien tal interacción, con probada eficacia en numerosos casos prácticos [2]. El objetivo del presente trabajo es, en esta primera aportación, explorar las posibilidades de aplicación de tales técnicas para el análisis del comportamiento a fatiga de componentes entallados con tratamiento de granallado.

2. PARTICULARIDADES DEL CRECIMIENTO DE GRIETAS PEQUEÑAS EN SUPERFICIES GRANALLADAS.

En términos generales, los efectos que el granallado produce en el metal base pueden resumirse en dos. Primero, la creación de una zona superficial con una microestructura altamente distorsionada (*Zona 1*, véase Figura 1), la cual es el resultado de la intensa deformación plástica inducida por los impactos de la granalla. En dicha zona es usual encontrar multitud de defectos, tales como pliegues, micropicaduras, etc., que facilitan una temprana nucleación de grietas por fatiga. El segundo efecto es la generación de un campo de tensiones residuales de compresión, el cual se extiende sobre una determinada distancia conocida como profundidad de granallado (shot-peening depth, d). Más allá de la *Zona 1*, el material comienza a mostrar una textura similar a la del material virgen, donde los granos, aunque ligeramente deformados, son claramente distinguibles (*Zona 2* en la Figura 1).

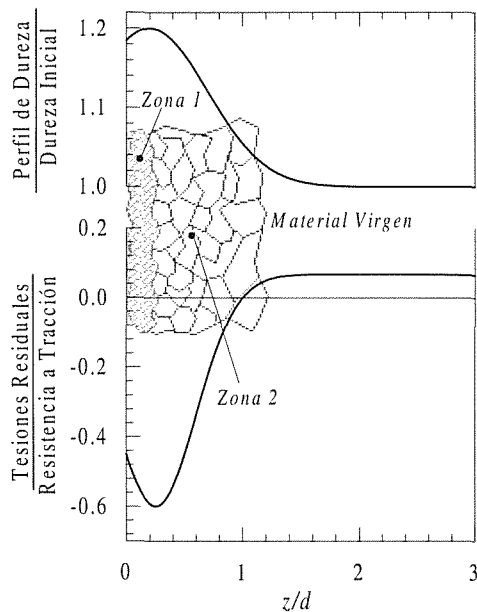


Fig 1. Cambios superficiales debidos al granallado.

Los estudios experimentales llevados a cabo por

Natkaniec, Kocanda y Miller [3] muestran que el crecimiento de grietas por fatiga dentro de la *Zona 2*, y más allá de ésta, presenta un comportamiento similar al observado en la propagación de grietas pequeñas en un componente sin tratar, mostrando el típico patrón oscilante de sucesivas deceleraciones y aceleraciones, asociado a la interacción entre la grieta y las barreras al deslizamiento plástico existentes en el material. En esta región la velocidad de propagación está influenciada principalmente por el campo de tensiones residuales de compresión y por la resistencia interpuesta por las barreras microestructurales. Sin embargo, este comportamiento no se observa dentro de la *Zona 1*. En dicha zona, la severa distorsión de los granos del material y el endurecimiento inducido por deformación reducen la capacidad de la grieta para generar zona plástica en el frente de misma y, con ello, su capacidad para crecer. Como consecuencia de esto, las grietas progresan en general por caminos muy tortuosos, zigzagueando, mostrando así una fractura predominantemente facetada. Dado que en el material granallado existe ya una alta densidad de dislocaciones e incluso los bordes de grano se encuentran en muchos casos fragmentados, el evento crítico para la propagación de una grieta en esta zona endurecida no parece ser la superación de las barreras microestructurales, sino más bien la generación de suficiente plasticidad en el frente de la grieta [4].

De acuerdo con lo anterior, es posible suponer que el comportamiento inicial de una grieta en un componente granallado sea como sigue. Las grietas se iniciarán rápidamente en alguno de los múltiples defectos creados en la superficie, propagándose a través de la zona altamente deformada, donde su crecimiento estará, por un lado, cohibido por las tensiones residuales de compresión y, por otro, favorecido por la elevada densidad de dislocaciones existentes en dicha zona. Así, la primera barrera microestructural efectiva capaz de contener su propagación la encontrará en el primer borde de grano situado más allá de la *Zona 1*, la cual, dependiendo de las condiciones de tensión que actúan en dicho instante sobre la grieta, podría llegar a bloquear, hasta parar, el crecimiento de la misma. En ausencia de un gradiente acusado en la tensión aplicada, dicha barrera condicionará la propagación o no de la grieta hasta el fallo de la pieza. El límite de fatiga se corresponderá, por tanto, con la mínima tensión aplicada requerida para que la grieta supere esta barrera.

Este patrón de comportamiento está en perfecto acuerdo con las observaciones experimentales realizadas en aleaciones de aluminio 7010 y 8090 [5]. En la citada referencia se puede ver que las grietas, iniciadas en la superficie del espécimen, se paran a distancias del orden de la profundidad de la zona endurecida bajo tensiones justo por debajo del límite de fatiga del componente tratado.

3. MODELO

En el modelo de crecimiento de grietas pequeñas por fatiga desarrollado por Navarro y de los Rios [1] la oposición del material a la propagación de una grieta, como se expresa en el bien conocido diagrama de Kitagawa-Takahashi, se establece a través de la siguiente expresión

$$\frac{\sigma_{Li}}{\sigma_{FL}} = \left(\frac{m_i^*}{m_1^*} \right) \frac{1}{\sqrt{i}} \quad (1)$$

donde σ_{FL} es el límite de fatiga del material, el cual representa la mínima tensión aplicada requerida para que una grieta, creciendo dentro de un grano de tamaño medio D , sobrepase el límite de grano o para ser, más exacto, supere la primera barrera microestructural efectiva. De la misma forma, σ_{Li} representa la mínima tensión requerida para propagar una grieta que se extiende sobre i medios granos ($iD/2$), $i = 1, 3, 5 \dots$. Por último, el factor m_i^* representa el efecto de la creciente oposición que el material ejerce al crecimiento la grieta a la hora de superar las sucesivas barreras microestructurales; su valor depende fundamentalmente de la diferente orientación cristalográfica entre el plano de propagación de la grieta y los planos de deslizamiento plástico de los distintos granos que abarca el frente de grieta, y de la oposición generada como consecuencia del fenómeno del cierre de grieta.

En el caso de una grieta pequeña creciendo desde una entalla, las condiciones de propagación dependerán, además, de la resistencia interpuesta por las sucesivas barreras, del campo de tensiones en los alrededores de la raíz del concentrador. La expresión equivalente a la ecuación (1) se puede expresar en este caso como

$$\int_0^1 \frac{\sigma(\zeta)}{\sqrt{1-\zeta}\sqrt{1+\zeta+2t^*/i}} d\zeta = \left(\frac{i}{i+t^*} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{\pi}{2} \sigma_{FL} \left(\frac{m_i^*}{m_1^*} \right) \frac{1}{\sqrt{i}} \quad (2)$$

donde ζ es una coordenada adimensional con origen en el fondo de la entalla, $\zeta = z/D/2$, y $t^* = t/D/2$, siendo t la profundidad de la entalla. $\sigma(\zeta)$ es el campo de tensiones enfrente de la entalla. Al igual que la ecuación (1) en especímenes sin concentradores de tensión, la ecuación anterior permite obtener una expresión del diagrama de Kitagawa-Takahashi para un componente entallado.

Está bien establecido que, si no se produce relajación de las tensiones residuales en la pieza granallada durante la aplicación de la carga cíclica, el efecto de dichas tensiones en el comportamiento a fatiga del componente

no puede ser tenido en cuenta simplemente superponiendo las tensiones residuales linealmente a las tensiones aplicadas [6]. En este sentido, se ha sugerido que, a falta de un modelado directo de las causas que producen las tensiones residuales, el efecto de las mismas se incorpore combinándolas con las tensiones aplicadas por medio de las expresiones tradicionalmente usadas en fatiga para tener en cuenta el efecto de una tensión media aplicada a la pieza, por ejemplo, por medio de la conocida relación de Goodman. De acuerdo con estas indicaciones, el efecto de las tensiones residuales producidas por el granallado puede ser incorporado en las expresiones anteriores definiendo en cada punto una tensión alterna equivalente $\sigma_{eq}(\zeta)$ a través de la expresión:

$$\frac{\sigma_a(\zeta)}{\sigma_{eq}(\zeta)} + \alpha \frac{\sigma_m(\zeta) + \sigma_R(\zeta)}{\sigma_u(\zeta)} = 1 \quad (3)$$

y sustituyéndola por $\sigma(\zeta)$ en la ecuación (2). Aquí $\sigma_a(\zeta)$ y $\sigma_m(\zeta)$ son las tensiones alterna y media inducidas por la carga aplicada respectivamente, $\sigma_R(\zeta)$ representa la tensión residual y $\sigma_u(\zeta)$ es la resistencia a tracción del material en cada punto. Esta última podrá ser correlacionada con el grado de dureza local en la región subsuperficial. El coeficiente α será igual a la unidad cuando $\sigma_m(z) + \sigma_R(z)$ sea positivo (línea original del diagrama de Goodman para tensiones medias positivas) y será menor que uno cuando las tensiones medias resultantes sean negativas, lo cual refleja el efecto beneficioso de las tensiones medias de compresión en fatiga. En lo que sigue se considerará un valor de α igual a 0.5, como valor representativo en este rango.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis del efecto del granallado en las condiciones umbrales de propagación de grietas pequeñas en componentes con concentradores de tensión se han empleado las expresiones (2) y (3) propuestas anteriormente. En este primer estudio, la intensidad del granallado se ha tenido en cuenta indirectamente a través de la consideración de diferentes profundidades de granallado (d).

Para llevar a cabo las simulaciones será necesario especificar las distribuciones de tensiones residuales y de dureza inducidas en el material, así como la profundidad del granallado. En este sentido, se ha observado que las variaciones en los parámetros del proceso de granallado, dentro de los rangos usuales en la práctica, tienen un ligero efecto sobre el valor máximo de las tensiones residuales alcanzadas, siempre que la dureza de la granalla sea superior, o al menos

igual, a la del material tratado. Dicho valor máximo es función del tipo de material base y suele encontrarse, típicamente, en torno a un 60% de la resistencia a tracción, situándose ligeramente por debajo de la superficie, a una distancia de aproximadamente un 25% de la profundidad de granallado [7]. La profundidad de granallado d y la profundidad de la zona endurecida $d1$ dependen de las propiedades mecánicas del material. Ambas aumentan al incrementar la energía del haz de granalla. Por simplicidad en los cálculos, se ha considerado un valor típico de $d1 = 0.2 d$. Así mismo, se ha supuesto, como suele ser habitual, que el máximo aumento en la dureza del material en la subsuperficie es

el que se origina la grieta, mientras que en el espécimen tratado se corresponderá con el primer borde de grano efectivo una vez atravesada la *Zona I*. En este último caso y como se ha discutido anteriormente, en la *Zona I* la densidad de dislocaciones es tan elevada y la distorsión del material es tan severa que los bordes de grano no presentan una oposición efectiva al paso de la grieta dentro de dicha zona. El segundo umbral, el límite de propagación hasta el fallo, representa la mínima tensión necesaria para una grieta se propague por fatiga a través de cada una de las sucesivas barreras microestructurales, provocando así la rotura de la pieza. Este último se corresponde, obviamente, con el límite de

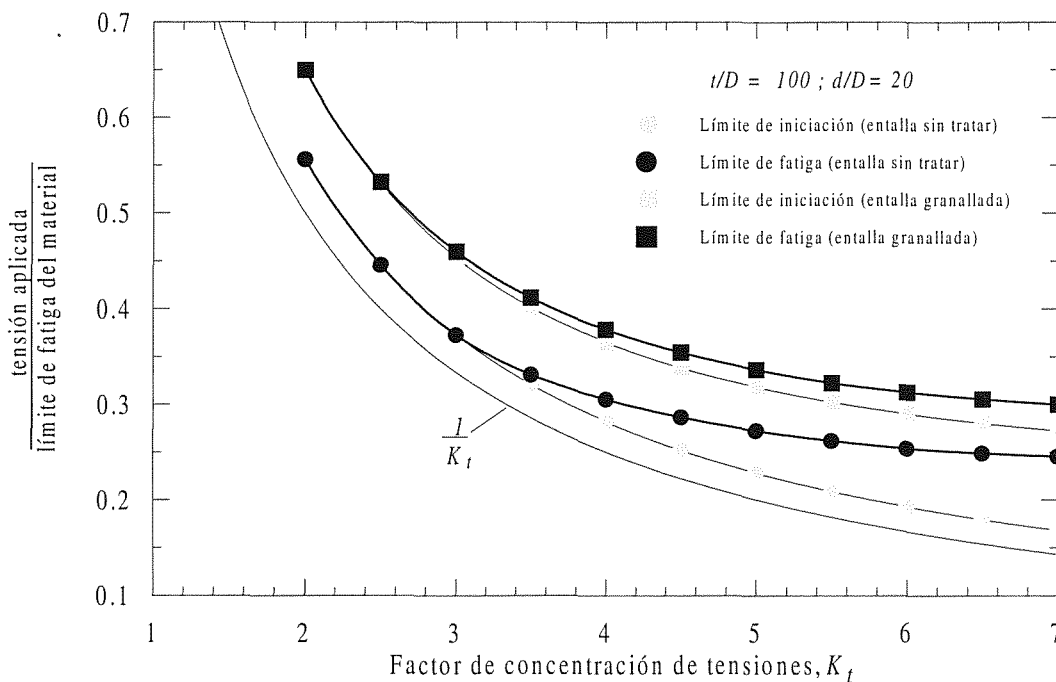


Fig 2. Límites de iniciación y de propagación hasta el fallo (límite de fatiga) en función de la severidad del concentrador para un componente con y sin tratamiento de granallado

de 1.2 veces la dureza del material base, lo que conducirá a un incremento similar en la resistencia a tracción local del material [8]. En la Figura 1 se muestran la distribución de tensiones residuales y el perfil de dureza empleados en las simulaciones siguientes, los cuales recogen las características comentadas.

La Figura 2 muestra las tensiones umbrales para la iniciación y la propagación hasta el fallo de una grieta por fatiga en un componente con y sin tratamiento de granallado. La primera de ellas, el límite de iniciación, se corresponde con la mínima tensión aplicada necesaria para permitir que una grieta, previamente nucleada en el material, sea capaz de superar la primera barrera microestructural significativa del material. En el caso de la pieza sin tratar dicha barrera será el límite de grano en

fatiga convencional del componente entallado.

Cualquier tensión aplicada entre los dos límites anteriores provocará que se inicie una grieta en el componente, que ésta crezca a través de un cierto número de granos, pero que finalmente quede bloqueada en alguna de las barreras microestructurales, convirtiéndose en una grieta no-propagante. Ambos límites delimitan, por tanto, la conocida región de grietas no-propagantes.

En la Figura 2 se muestra la evolución del límite de iniciación y del límite de fatiga en función de la severidad de la entalla, en el caso de una pieza sin y con tratamiento de granallado. Se ha elegido una profundidad relativa de entalla de 100 veces del tamaño medio de grano. Por simplicidad, la simulación se ha

llevado a cabo para una tensión aplicada de media cero y suponiendo que no se produce relajación en las tensiones residuales durante el proceso de fatiga.

Como se puede apreciar en la citada figura, el modelo refleja el esperado incremento en la resistencia a fatiga del componente granallado respecto del componente sin tratar. Se predice una sustancial diferencia entre los límites de iniciación y de propagación hasta el fallo, especialmente acentuada en las entallas más agudas, en perfecto acuerdo con las tendencias observadas en los resultados experimentales presentados en la literatura. Así mismo, se puede observar que la región de grietas no-propagantes es más estrecha en el espécimen granallado. Esto está provocado principalmente por el hecho de que, en este caso, la grieta siempre crece a través de la zona subsuperficial altamente deformada y, por tanto, su longitud al alcanzar la primera barrera efectiva es mayor que en un componente sin tratar, donde es en general del orden del tamaño medio de grano.

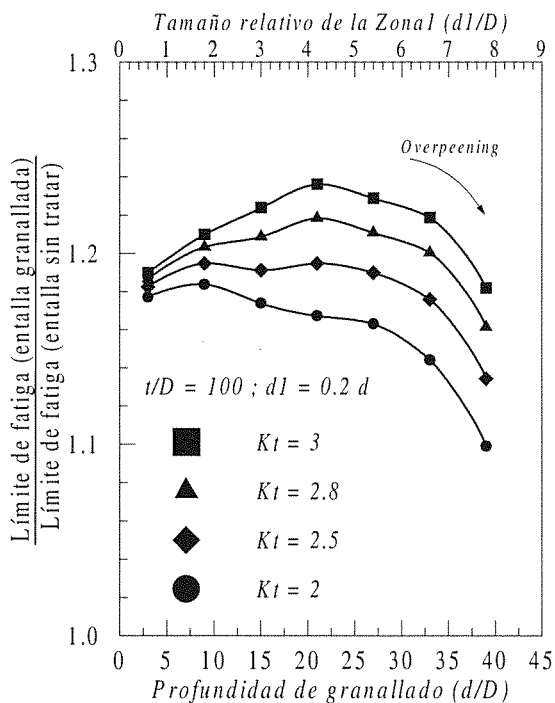


Fig 3. Efecto de la profundidad del granallado y de la severidad del concentrador en la resistencia a fatiga.

Uno de los parámetros más importantes en el modelo descrito es claramente la profundidad de granallado, ya que ésta determina la porción de material sometida a tensiones residuales de compresión y, con ello, la zona en la que la capacidad de avance de la grieta se encuentra mermada. La Figura 3 muestra la influencia de dicho parámetro en la resistencia a fatiga de un componente entallado con diferentes factores de

concentración de tensiones y distintas profundidades de granallado. En todos los casos el valor de la máxima tensión residual de compresión se ha mantenido constante, lo cual es una suposición realista siempre que d se extienda sobre un número de granos relativamente grande, típicamente superior a 10 granos. En dicha figura se puede observar que el efecto beneficioso del granallado es mayor a medida que aumenta la severidad de la entalla. Esta tendencia conecta perfectamente con las observaciones de diversos autores. Así, por ejemplo, Akber et al. [9], en sus estudios de la influencia del granallado en probetas entalladas de aleación de Al-Zn, han puesto de manifiesto que la mejora en la resistencia a fatiga de la pieza era sustancialmente mayor al aumentar el factor de concentración de tensiones, en su caso, desde un valor próximo a 2 hasta 5.

Por otra parte, es interesante notar que las curvas mostradas en la Figura 3 exhiben un máximo a medida que aumenta la profundidad d . O en otras palabras, a medida que se incrementa la intensidad del granallado la mejora en la resistencia a fatiga del componente tiende a aumentar, hasta alcanzar un valor óptimo para cada espécimen entallado. A partir de dicho valor, el efecto beneficioso de dicho tratamiento en la resistencia a fatiga del componente comienza a disminuir. Este hecho refleja extraordinariamente bien el efecto perjudicial de un excesivo tratamiento de granallado, conocido en la literatura anglosajona como "overpeening", el cual está asociado en general con la producción de un elevado daño en la superficie del metal base.

5. CONCLUSIONES

El modelo propuesto permite reproducir, a partir del conocimiento actual del proceso de crecimiento de las grietas pequeñas, el comportamiento a fatiga de un componente entallado con tratamiento de granallado. A tenor de la evidencia experimental, la hipótesis principal para dicho estudio ha sido la siguiente. Una vez nucleada la grieta en la superficie de la pieza, como consecuencia del daño inducido por el proceso de granallado, podrá crecer siempre sin detenerse a través de la zona fuertemente deformada, favorecida por la alta densidad de dislocaciones disponibles en dicha zona. Los bordes de grano se encuentran altamente deformados e incluso fracturados, y no presentan una oposición sustancial al crecimiento de la misma. Sin embargo, una vez fuera de dicha zona la grieta deberá enfrentarse con las barreras microestructurales existentes en el material (e.g. bordes de grano) y deberá de ser capaz de propagarse a través de ellas mediante la generación de deslizamiento plástico dentro de los granos adyacentes a éstas. Dichas barreras podrían contener temporalmente el avance de la grieta e incluso pararla definitivamente, dependiendo del nivel de tensiones aplicadas sobre el componente.

Siguiendo la descripción anterior, el modelo propuesto refleja adecuadamente el comportamiento característico de un componente granallado, como, por ejemplo, la relativa mejora en la resistencia a fatiga de la pieza, la existencia de un rango óptimo de aplicación de dicho tratamiento y el efecto perjudicial de un granallado excesivo. Obviamente, en el actual estado de este trabajo, tales conclusiones son necesariamente cualitativas, aunque en perfecto acuerdo con las tendencias experimentales expuestas en la literatura.

Loaded Notched Components”, Proceedings of the 5th International Conference on “Shot Peening”, Oxford, U.K (1993).

5. REFERENCIAS

- [1] Navarro, A. and de los Rios, “Fatigue Crack Growth Modelling by Successive Blocking of Dislocations”, E.R., Proc. R. Soc. Lond. A-437, 375-390 (1992).
- [2] Navarro, A., Vallellano, C., de los Rios, E.R. y Xin, X.J., “Notch Sensitivity and Size Effects Described by a Short Crack Propagation Model”, Engineering Against Fatigue (J.H. Beynon, M.W. Brown, T.C. Lindley, R.A. Simth and B. Tomkins, Eds.), A.A. Balkema Publishers (1997).
- [3] Natkaniec, D., Kocanda, S. y Miller, K. J., “Influence of Shot-peening on Short Crack Behaviour in a Medium Carbon Steel”, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 19. No. 7, 911-917 (1996).
- [4] de los Rios, E.R., Walley, A., Milan, M.T. and Hammersley, G., “Fatigue Crack Initiation and Propagation on Shot-peened Surfaces in A316 Stainless Steel”, Int. J. Fatigue, 17, 7, 493-499 (1995).
- [5] Mutoh, Y., Fair, G.H., Noble, B. y Waterhouse, R.B., “The Effect of Residual Stresses Induced by Shot-peening on Fatigue Crack Propagation in Two High Strength Aluminium Alloys”, Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 10, No.4, 261-272 (1987).
- [6] Macherauch, E. y Kloos, K.H., “Assessment of Residual Stress”, in “Advances in Surface Treatments: Technology-Applications-Effects,”, Vol.4: Residual Stresses, Editado por A. Niku-Lari, Pergamon Press (1987).
- [7] Fuchs, H.O. y Daly, J.J., “Mechanical Production of Self Stresses”, in “Advances in Surface Treatments: Technology-Applications-Effects,”, Vol.4: Residual Stresses, Editado por A. Niku-Lari, Pergamon Press (1987).
- [8] Lawrence, F.V. (Jr.) and Yung, J.Y., “Estimating the Effect of Residual Stress on the Fatigue Life of Notched Components”, in “Advances in Surface Treatments: Technology-Applications-Effects,”, Vol.4: Residual Stresses, Editado por A. Niku-Lari, Pergamon Press (1987).
- [9] Akber, J.A., Kyriacou, S. And El-Zafrany, A.M., “Effect of Shot Peening on the Fatigue Life of Axial