

INFLUENCIA DEL GRADO DE ALEACION Y DEL METODO DE FABRICACION EN EL COMPORTAMIENTO MECANICO DE ACEROS DE CARRIL

J.L.González*, C.Rodríguez* y F.J.Belzunce**

*Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación (Universidad de Oviedo)

**Departamento de Materiales (Universidad de Oviedo)

Resumen. Este trabajo refleja el estudio realizado sobre tres calidades de aceros de microestructura perlítica de baja y media aleación, utilizados en la fabricación de carriles para uso ferroviario. El estudio comprende el análisis de características del acero tales como su composición química, microestructura, propiedades mecánicas convencionales y propiedades a fractura (velocidad de crecimiento de grietas por fatiga, tenacidad a fractura), y en último lugar el nivel de tensiones residuales introducido durante el proceso de fabricación. Se expone la influencia de la composición química y microestructura de estos aceros en todas estas propiedades y la singular importancia que ejerce la dirección de avance de la grieta sobre los resultados de fractura y fatiga.

Abstract. Three low and medium alloyed rail steels have been analysed in this work. The chemical composition, microstructure, mechanical properties, fracture properties (fracture toughness and fatigue crack growth rate) along with the residual stresses introduced during the rail manufacture have been experimentally determined. All these properties have been explained based on the chemical composition and microstructure of the rails. Finally, the crack growth direction was demonstrated to be an important parameter which controls the fracture and fatigue behaviour of the rails.

1. INTRODUCCION

Los carriles son elementos estructurales, cuyo fin es transmitir al suelo las cargas provocadas por el tráfico ferroviario y servir de guía al mismo, a los que se les exigirá, dada su gran importancia tanto social como industrial, un alto grado de fiabilidad con el fin de evitar fallos en servicio.

Aunque existen otros, uno de los problemas más graves que pueden sufrir estos elementos es la fractura frágil del carril, que normalmente va precedida por el crecimiento de una grieta mediante un proceso de fatiga [1]. Desde este punto de vista la longevidad del carril va a depender fundamentalmente de dos factores: por una parte del nivel de sollicitaciones al que va a estar sometido durante su servicio y que se deben no sólo al tráfico ferroviario sino también a tensiones inducidas durante el propio proceso de fabricación (tensiones residuales) [2], y por otra parte tanto de los defectos que puedan haber sido introducidos durante los procesos de fabricación y montaje [3] como de los que puedan nuclearse y crecer durante el servicio.

Dado que el nivel de cargas que ha de soportar el carril debido al tráfico ferroviario va en aumento, y las condiciones en cuanto a seguridad son cada vez más estrictas, surge la necesidad de desarrollar nuevas calidades de carril y nuevos procesos de fabricación que limiten los otros factores que influyen en el comportamiento en servicio del carril, y garanticen de este modo la más alta fiabilidad.

Por su parte, y con objeto de asegurar que tras la fabricación, los carriles muestren un nivel de calidad aceptable, en 1993 expertos de toda Europa ponen en

marcha una Propuesta de Norma Europea para aceros de carril [4] en la que se establecen los requisitos mínimos que deben cumplir estos elementos para su puesta en servicio.

En el presente trabajo se ha evaluado la influencia que tanto la composición química como el método de fabricación utilizado ejercen sobre el comportamiento mecánico del carril. Para ello se ha llevado a cabo una completa caracterización de tres tipos de acero de carril evaluando el comportamiento a fractura y fatiga y el nivel de tensiones residuales en las tres zonas características (cabeza, alma y pie). Además se ha estudiado la influencia de variables tan importantes como la posición de la probeta, la dirección de propagación de las grietas ó la relación de cargas utilizada en fatiga, sobre el comportamiento que estos elementos mostrarán ante la presencia de una grieta. Todo ello con un objetivo común: aportar todas las ideas y resultados que surgiendo de esta investigación puedan contribuir a la mejora tanto del control de calidad como del comportamiento en servicio de los carriles.

2.MATERIALES UTILIZADOS: ANALISIS MICROESTRUCTURAL Y PROPIEDADES MECANICAS CONVENCIONALES.

Los materiales utilizados han sido tres tipos de acero de carril de 60 Kg/m, de fabricación española, que denominaremos N1, N2 y N3 y que habiendo sufrido el mismo proceso de fabricación se diferencian básicamente en el contenido en ciertos elementos de aleación presentes en su composición química. La tabla 2.1 muestra dicha composición.

| Carril | N1 | N2 | N3 |
|--------|------|------|------|
| %C | 0.72 | 0.73 | 0.72 |
| %Si | 0.25 | 0.28 | 0.27 |
| %Mn | 1.10 | 0.94 | 0.77 |
| %Cr | — | 0.28 | 0.52 |
| %Mo | — | 0.08 | 0.18 |
| %V | — | 0.07 | 0.10 |

Tabla 2.1. Composición química de las tres calidades de acero.

La fabricación de los carriles se realizó en una planta siderúrgica, donde los blooms obtenidos tras la colada continua son sometidos a un proceso de laminación en caliente hasta obtener los perfiles y dimensiones deseados. Tras el enfriamiento posterior a este proceso y debido a las altas curvaturas que adquieren, los carriles pasan al tren enderezador, que les somete a un proceso de enderezado en frío hasta que alcanzan el nivel de rectitud óptimo para su uso.

2.1. Microestructura

Realizado el análisis metalográfico de las tres zonas características del carril (cabeza, alma y pie), la tabla 2.2 nos muestra de manera resumida cuales han sido los resultados obtenidos

| Carril | N1 | N2 | N3 |
|--------|-------------------|-------------------|----------------------|
| Cabeza | Perlita | Perlita | Perlita |
| Alma | Perlita + Ferrita | Perlita + Ferrita | Perlita + Martensita |
| Pie | Perlita | Perlita | Perlita |

Tabla 2.2. Microestructura de los carriles.

Los tres carriles muestran una microestructura perlítica homogénea tanto en el pie como en cabeza, aunque dicha microestructura se va afinando conforme crece el contenido en aleantes del carril. En la tabla 2.3. se muestran los valores del espaciado interlaminar perlítico presentado por los tres carriles en la zona de cabeza. Estas medidas han sido realizadas sobre un número suficientemente representativo de micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido sobre superficies perpendiculares a la dirección de laminación. Como puede observarse, el espaciado interlaminar decrece conforme aumenta el contenido en aleantes del acero.

| Carril | N1 | N2 | N3 |
|--------|-------|-------|-------|
| Cabeza | 0,270 | 0,227 | 0,225 |

Tabla 2.3. Medidas del espaciado interlaminar perlítico en μm .

Por su parte, la microestructura presentada por los aceros en la zona del alma ya no es totalmente perlítica como lo era en cabeza y pie. Los carriles N1 y N2 cuentan con la presencia en esta zona, de ferrita en borde de grano, mientras que el N3 muestra bandas de

martensita dispuestas en dirección vertical y dispersas en la matriz perlítica.

Esta diferencia microestructural entre el alma y el resto de las zonas deriva directamente del proceso de fabricación de los carriles, y es consecuencia de dos fenómenos superpuestos: por un lado la presencia de una zona ligeramente segregada en la zona central del bloom de partida (segregación que será más notable conforme crece la aleación del acero), y por otro lado a que tras la laminación en caliente, la zona del alma, debido a su mayor esbeltez, se enfría más rápidamente que las otras dos regiones, pudiendo llegar a obtenerse estructuras frágiles no deseadas como en el caso del carril N3.

2.2. Dureza

La dureza es una de las propiedades que más interesa en el carril, en especial en la zona de cabeza, pues se relaciona directamente con la resistencia al desgaste. Cuanto más dura sea la cabeza del carril, mayor será su resistencia al desgaste, disminuyendo por tanto, las costosas operaciones de reposición y de mantenimiento [5].

La tabla 2.4 nos muestra los resultados de dureza obtenidos para las tres calidades de aceros y en las tres zonas características.

| Carril | N1 | N2 | N3 |
|--------|-----|-----|-----|
| Cabeza | 272 | 310 | 343 |
| Alma | 285 | 333 | 398 |
| Pie | 280 | 320 | 360 |

Tabla 2.4. Dureza HV10.

Como puede observarse, el carril N1 es el que presenta, en las tres zonas, los menores valores de dureza, resultado que concuerda con lo esperado: es el carril menos aleado y con los mayores valores de tamaño de grano y de espaciado interlaminar perlítico.

Conforme crece el grado de aleación el grano se va afinando y el espaciado interlaminar disminuye, con el consiguiente efecto endurecedor que ello supone, y que se refleja en incrementos de hasta 40 unidades de dureza en la cabeza del carril N2 con respecto al N1 y de hasta 75 en el caso del carril N3.

El efecto endurecedor que acompaña al afino de la microestructura perlítica se refleja de forma aún más acusada en la diferencia de dureza mostrada por el alma de los carriles con respecto a las otras dos zonas. Efecto que se verá incrementado por la segregación existente en esta zona, que dará lugar a la aparición, como en el caso del carril N3, de estructuras de temple que agudizan aún más el incremento de la dureza.

2.3. Propiedades mecánicas a tracción

Los ensayos de tracción se realizaron sobre probetas cilíndricas proporcionales de 10 mm de diámetro en su zona calibrada ($L_0 = 50$ mm), extraídas tanto de la cabeza como del alma del carril. Las correspondientes a la cabeza se extrajeron en la localización y dirección propuestas por el Protocolo de Norma Europea (longitudinal). Las del alma, situación que no contempla dicho Protocolo, se extrajeron tanto en dirección longitudinal (dirección de laminación) como vertical, y con la misma geometría que las de cabeza. En la figura 2.1 se muestra la localización de las probetas en el carril.

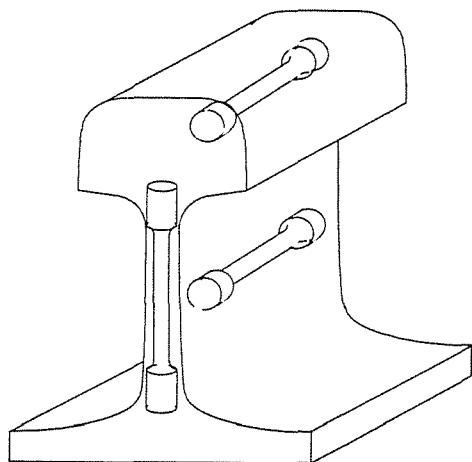


Figura 2.1. Localización de las probetas para ensayo de tracción

En función de los resultados obtenidos, que se reflejan en la tabla 2.5., se observa que al igual que ocurría con la dureza, tanto el límite elástico (σ_{ys}) como la resistencia a la tracción (σ_R) crecen con el contenido en aleantes del acero, decreciendo como es lógico el alargamiento. Además las diferencias en los resultados entre cabeza y alma de los carriles, ponen de nuevo de manifiesto la dependencia de la microestructura que muestran todas estas propiedades.

| CARRIL | Posición | σ_{ys} (MPa) | σ_R (MPa) | A % |
|--------|------------|---------------------|------------------|------|
| Nº1 | Cabeza | 479 | 946 | 12,5 |
| | Alma vert. | 525 | 947 | 11 |
| | Alma long. | 518 | 952 | 13,8 |
| Nº2 | Cabeza | 563 | 1030 | 11 |
| | Alma vert. | 628 | 1093 | 10,2 |
| | Alma long. | 651 | 1082 | 11,7 |
| Nº3 | Cabeza | 761 | 1149 | 11 |
| | Alma vert. | 867 | 1249 | 7,8 |
| | Alma long. | 889 | 1286 | 10,2 |

Tabla 2.5. Propiedades mecánicas a tracción de las tres calidades de acero en diversas posiciones.

Por su parte, la dirección de extracción de las probetas no parece tener ninguna influencia en las propiedades resistentes (σ_{ys} y σ_R) de la zona del alma, pero sí en el

alargamiento, que siempre será menor en las probetas extraídas en dirección vertical (perpendicular a la laminación).

3. TENSIONES RESIDUALES

La utilización de aceros aleados permite obtener carriles de mayor dureza y por tanto más resistentes al desgaste, pero tiene como contrapartida una pérdida de ductilidad. Esto, unido a la gran longitud de los carriles, provoca que éstos muestren tras el enfriamiento posterior a la laminación altas curvaturas, que de no ser corregidas los harían totalmente inservibles para su uso.

Así y con objeto de eliminar dicha curvatura hasta que los carriles alcancen un nivel de rectitud aceptable, se les somete a un proceso de enderezado en frío, haciéndoles pasar por el tren enderezador, dispositivo formado por una serie de rodillos que someten al carril a altos niveles de deformación obligándole a enderezarse, aún a costa de introducir altos niveles de tensiones residuales en el mismo.

La acción combinada de dichas tensiones y las cargas debidas al tráfico ferroviario, provocan la existencia de zonas del carril fuertemente solicitadas, en las que de existir algún defecto de tamaño crítico podría desencadenarse la rotura frágil del carril. Dado que las cargas debidas al tráfico ferroviario son cada vez mayores, se deduce la necesidad, cada vez más imperiosa, de limitar el nivel de tensiones residuales en el carril.

Con este ánimo y en función de numerosos estudios experimentales que concluyen que el pie será la zona que presente los mayores niveles de tensiones residuales [1], la Propuesta de Norma Europea para Aceros de Carril, en su 1ª revisión [6], limita el estado tensional en esta zona a un valor máximo de 250 N/mm².

3.1. Determinación del nivel de tensiones residuales

La medida de tensiones residuales se realizó mediante la utilización de galgas extensométricas, según especificaciones de la 1ª Propuesta de Norma Europea para este ensayo. Las galgas se deben colocar en cabeza, alma y pie de la sección central de un trozo de carril de aproximadamente 1m de longitud. Posteriormente y por medios mecánicos, se libera dicha zona del resto del carril, cortando una laja de unos 20 mm de espesor de modo que las galgas queden en la parte central de la misma. La deformación producida por efecto de la relajación de tensiones inducida, se reflejará en las medidas de las galgas extensométricas colocadas a tal efecto y que indirectamente nos proporcionan el nivel de las tensiones liberadas.

Los valores obtenidos para las tres calidades estudiadas se reflejan en la tabla 3.1. Estos resultados muestran que en todos los casos el pie es la zona más solicitada,

encontrándose al igual que la cabeza sometida a tensiones de tracción, mientras que el alma está sometida a compresión. Por otra parte el nivel de tensiones residuales en las tres zonas del carril crece con el contenido en aleantes del mismo, llegándose a obtener valores que superan el límite máximo permitido por la normativa (250 N/mm^2) incluso en zonas de cabeza y alma (carril N3).

| CARRIL | N1 | N2 | N3 |
|--------|------|------|------|
| Cabeza | — | 170 | 262 |
| Alma | -188 | -233 | -256 |
| Pie | 225 | 286 | 348 |

Tabla 3.1. Resultados de tensiones residuales en los tres aceros (N/mm^2)

Tras la obtención de estos resultados y con el ánimo de rebajar el nivel de tensiones residuales en los carriles, se realizaron diversas modificaciones en la disposición de los rodillos del tren de enderezado hasta conseguir carriles que cumpliesen las especificaciones de la normativa, que como ya comentamos únicamente limitaba el nivel de tensiones residuales en el pie del carril. La tabla 3.2. muestra los resultados obtenidos para el carril N2 tras el nuevo proceso de enderezado (Enderezado 2) junto con los obtenidos anteriormente (Enderezado 1).

| CARRIL N2 | Enderezado 1 | Enderezado 2 |
|-----------|--------------|--------------|
| Cabeza | 170 | 337 |
| Alma | -233 | -195 |
| Pie | 286 | 235 |

Tabla 3.2. Tensiones residuales en el carril N2 para los dos procesos de enderezado utilizados (N/mm^2).

Como puede observarse, el nuevo proceso de enderezado consigue rebajar el nivel de tensiones en el pie por debajo del valor límite, pero a costa del incremento elevadísimo de las tensiones residuales en cabeza que llegan a duplicarse, situación peligrosísima si se tiene en cuenta que esta zona es la que posteriormente, durante el servicio, sufrirá las mayores solicitaciones. Parece pues, que la solución basada en la modificación del proceso de enderezado no es la adecuada, de lo que se deriva que el único modo de controlar los niveles de tensiones residuales en los carriles pasa por una mejora de los procesos previos al enderezado, sobre todo del enfriamiento tras la laminación en caliente. Otra reflexión que conviene comentar es el vacío que la 1ª Revisión de la Propuesta de Norma Europea deja, al no restringir el nivel de tensiones residuales en las zonas de cabeza y alma, que lleva a situaciones como la comentada anteriormente, de carriles que cumpliendo las especificaciones de la citada Norma serían potencialmente peligrosos tras su puesta en servicio.

4. CARACTERIZACION MECANICA A FRACTURA Y VELOCIDAD DE CRECIMIENTO DE GRIETAS POR FATIGA

Como se ha comentado en capítulos anteriores, uno de los fallos más graves que puede sufrir un carril, es su fractura frágil, que normalmente irá precedida por el crecimiento de una grieta mediante un proceso de fatiga. La Propuesta de Norma Europea establece el procedimiento experimental a seguir para la realización de dichos ensayos. Aunque dicho Protocolo propone únicamente que los ensayos se realicen sobre probetas extraídas de la zona de cabeza (que generalmente es la zona sometida a mayores solicitaciones), en este trabajo se han realizado además ensayos de velocidad de crecimiento de grietas por fatiga y de tenacidad a fractura sobre probetas extraídas del alma del carril ya que esta zona presentaba, en todos los carriles estudiados, diferente microestructura que el resto, teniendo además que soportar elevados esfuerzos, sobre todo en tramos curvos.

4.1. Ensayos de tenacidad a la fractura

Los ensayos de tenacidad a fractura fueron realizados de acuerdo con la Propuesta de Norma Europea a una temperatura de $-20 \pm 2^\circ\text{C}$ siguiendo las especificaciones de la Norma ASTM E399-90 sobre probetas de flexión en tres puntos con una simple entalla lateral (SENB) con una separación entre apoyos de cuatro veces el ancho de la probeta ($S=4W$). Las probetas de la cabeza fueron extraídas en las zonas y con las dimensiones recomendadas por la Propuesta de Norma ($B=25\text{mm}$, $W=40\text{mm}$). Las probetas del alma se ajustaron a las posibilidades geométricas en esta zona ($B=15\text{mm}$, $W=15\text{mm}$). La figura 4.1 es una representación de las mismas.

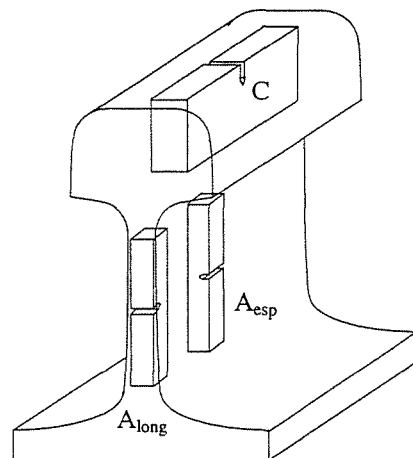


Figura 4.1. Zonas de extracción de probetas para alma y cabeza en el carril.

La tabla 4.1 muestra los valores medios obtenidos del factor de intensidad de tensiones correspondiente a la carga máxima, $K_{\text{máx}}$ ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$), en cabeza y alma. La razón por la que se toma este parámetro como el representativo del comportamiento a fractura de estos materiales, en vez de K_{Q} , es como ya se comentaba en anteriores trabajos [7], la ocurrencia de pequeños crecimientos inestables de la grieta (Pop-ins) durante el transcurso del ensayo, que dan como resultado elevadas

relaciones $P_{m\acute{a}x}/P_Q$, que por una parte invalidan a K_Q como parámetro representativo de la tenacidad a fractura de estos materiales y por otra provocan una gran dispersión de resultados para este parámetro.

| CARRIL | N1 | N2 | N3 |
|---------------------|------|------|------|
| CABEZA(C) | 42.5 | 39 | 42 |
| ALMA (A_{esp}) | — | — | 36.2 |
| ALMA (A_{long}) | 39.5 | 32.8 | — |

Tabla 4.1. Valores de $K_{m\acute{a}x}$ en distintas posiciones de los carriles.

Los valores en la zona de cabeza para los tres tipos de carril cumplen con las exigencias del Protocolo de Norma y son muy similares. En todo caso, las pequeñas diferencias no parecen estar relacionadas con el grado de aleación del carril, sino con la lógica dispersión de resultados que normalmente presentan estos ensayos. Sí que se advierte en cambio, un brusco descenso de la tenacidad en la zona del alma con respecto a la cabeza. En el caso del carril N3 este descenso podría relacionarse con la diferente microestructura mostrada por ambas zonas ya que la dirección de propagación de la grieta era en ambos casos perpendicular a la de laminación. Sin embargo el hecho de que el carril N2 muestre un descenso de tenacidad mucho más brusco que el anterior, cuando la diferencia microestructural entre las dos zonas de este carril era mucho menos acusada, parece indicar que además de la microestructura deberá tenerse muy en cuenta la dirección de propagación de la grieta (transversal en cabeza y longitudinal en el alma) en la caracterización a fractura de estos materiales.

4.2. Ensayos de crecimiento de grietas por fatiga.

Los ensayos de crecimiento de grietas por fatiga fueron realizados sobre probetas con la misma geometría y localización que las utilizadas en los ensayos de tenacidad a fractura (figura 4.1) sólo que en el alma únicamente se ensayaron las probetas entalladas denominadas A_{long} . Las dimensiones de las probetas de cabeza coincidían con las especificadas por la Propuesta de Norma Europea ($B=20\text{mm}$, $W=45\text{mm}$). En el alma, como en el caso anterior, las dimensiones se ajustaron a las posibilidades geométricas de dicha zona ($B=W=15\text{mm}$). Los ensayos fueron realizados a temperatura ambiente, en control de carga y con una frecuencia de ciclado de 30Hz. Aunque la Propuesta de Norma especifica la adopción de una relación de cargas $R=0.5$, también se realizaron ensayos con $R=0.1$ con objeto de cuantificar la influencia de dicho parámetro sobre la velocidad de propagación de grietas por fatiga.

La figura 4.2 que nos muestra los resultados en cabeza de los tres aceros para $R=0.5$, indica para todos ellos, un comportamiento similar, no pudiendo establecerse una relación directa entre grado de aleación y las velocidades de crecimiento de grieta en esta zona.

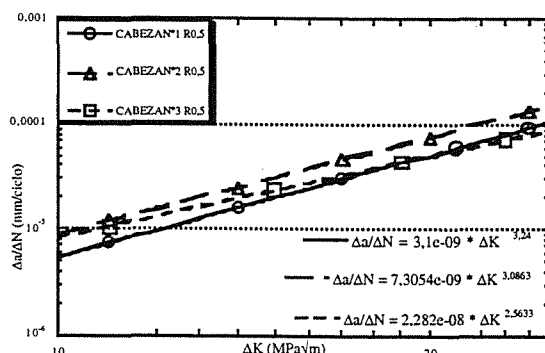


Figura 4.2. Curvas de velocidad de crecimiento de grieta por fatiga en la cabeza para los tres aceros ($R=0.5$).

Por su parte, si observamos los resultados obtenidos en la zona del alma de los carriles, que se muestran en la figura 4.3, tampoco parece que la diferente microestructura presentada por los tres aceros en esta zona afecte claramente a la velocidad de crecimiento de grietas por fatiga.

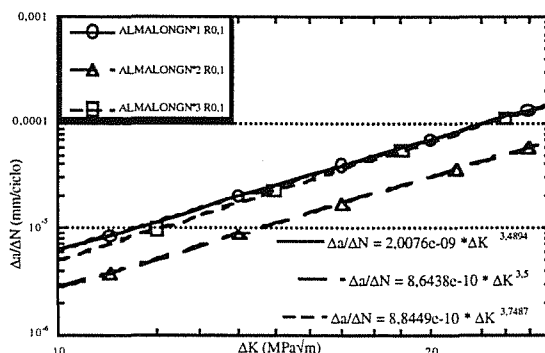


Figura 4.3. Curvas de velocidad de crecimiento de grieta estable por fatiga en el alma para los tres aceros ($R=0.1$).

Sin embargo, si comparamos los resultados obtenidos entre la cabeza y el alma de un mismo carril, se observa sistemáticamente, como la zona del alma muestra una mayor velocidad de propagación que la zona de cabeza tanto para $R=0.1$ como para $R=0.5$. Las figuras 4.4 y 4.5 muestran este efecto en los carriles N1 y N2 respectivamente. La explicación a este hecho parece estar basada en la diferente dirección de propagación de las grietas que en el caso de la cabeza era en dirección vertical (perpendicular a la de laminación) mientras que en el alma lo hacían en dirección longitudinal (paralela a la de laminación).

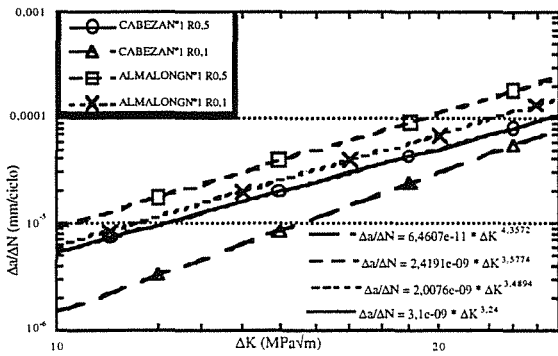


Figura 4.4. Curvas de velocidad de crecimiento de grieta estable por fatiga en la cabeza y alma del acero N°1 (R=0.5 y R=0.1).

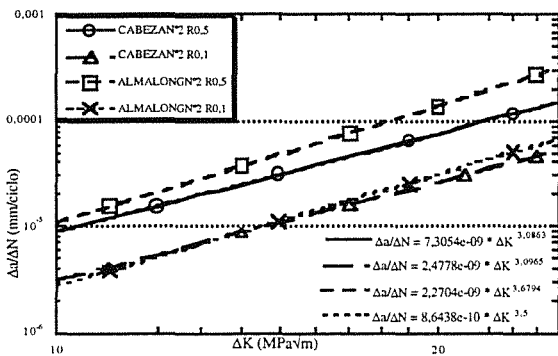


Figura 4.5. Curvas de velocidad de crecimiento de grieta estable por fatiga en la cabeza y alma del acero N°2 (R=0.5 y R=0.1).

Estas mismas figuras también muestran que, como cabía esperar, conforme crece la relación de cargas (R) utilizada en los ensayos de fatiga, también lo hace la velocidad de crecimiento de grietas por fatiga.

5. CONCLUSIONES

El presente estudio ha dado lugar a diversas conclusiones, que podemos agrupar del siguiente modo:

5.1. Respecto a la influencia de diferentes variables en la microestructura y comportamiento mecánico de los aceros de carril

1.- La composición química afecta a la microestructura perlítica del acero. Observando los tres tipos de acero, se puede comprobar que a medida que aumenta el contenido en aleantes disminuye tanto el tamaño de la colonia perlítica como el espaciado interlaminar perlítico.

2.- Con el aumento del grado de aleación aumenta la probabilidad de aparición de zonas segregadas, lo que unido a unas inadecuadas condiciones de fabricación,

más concretamente a un elevado gradiente térmico durante el enfriamiento, puede dar lugar a la presencia, en algunas zonas como el alma del carril, de microestructuras no deseadas como la martensita.

3.- Las propiedades mecánicas convencionales del acero dependen de su composición química, cumpliéndose en general, que al incrementarse el contenido en aleantes, aumenta la dureza y las propiedades mecánicas resistentes (límite elástico y tensión de rotura), disminuyendo el alargamiento. Asimismo, la presencia de zonas segregadas en la zona central del alma del carril modifica su comportamiento mecánico.

4.- Las tensiones residuales en las tres zonas del carril, aumentan con el grado de aleación del acero, dependiendo asimismo de las condiciones de fabricación, y en este último supuesto más concretamente, de la velocidad de enfriamiento tras la laminación.

5.- La tenacidad a fractura de los aceros objeto de estudio no parece depender de la composición química de los mismos (aceros perlíticos), habiéndose observado sin embargo que la presencia de fases no perlíticas y la dirección de propagación de la grieta son variables que ejercen una influencia notable en esta propiedad. Por otro lado, dada la gran dispersión de resultados mostrada por K_{IQ} , comportamiento observado para los tres tipos de aceros estudiados, a nuestro entender el valor que mejor representaría el comportamiento a fractura de estos materiales sería el factor de intensidad de tensiones en el punto donde se desencadenaría la rotura catastrófica del material ($K_{M\text{máx}}$).

6.- En el caso de los aceros estudiados, la velocidad de crecimiento de grietas por fatiga, no parece depender significativamente ni de la composición química del acero ni de la microestructura, siendo la dirección de propagación de las grietas la variable que más afecta a este parámetro. Por su parte, la utilización de diferentes relaciones de cargas (R=0.5 y R=0.1), pone de manifiesto que la velocidad de crecimiento de grietas por fatiga crece conforme lo hace dicho parámetro.

5.2. Respecto a la Propuesta de Norma Europea

7.- Se deberían limitar los niveles de tensiones residuales no solamente en el pie del carril, sino también en la cabeza, puesto que es posible modificar el proceso de enderezado de manera que se obtengan los valores más bajos allí donde se desea pero a costa de elevarlos en otras zonas.

8.- Sería conveniente, sobre todo en el caso de carriles muy aleados, la realización de ensayos de tenacidad a fractura y de velocidad de crecimiento de grietas por fatiga no sólo en la cabeza, sino también en el alma,

puesto que un aumento del contenido en aleantes junto con un incorrecto proceso de fabricación, puede dar lugar a la aparición en esta zona de estructuras frágiles no deseadas, hecho que influye en gran medida en su comportamiento a fractura.

5.3. Respecto al proceso de fabricación

9.- El proceso utilizado en la fabricación de estos carriles debe de ser estudiado y mejorado dada su gran influencia sobre el comportamiento mecánico de los mismos.

10.-La mejora en el proceso de fabricación de estos aceros se basará fundamentalmente en un control más estricto del nivel de segregación existente en la parte central del bloom de partida y en la modificación del proceso de enfriamiento tras la laminación en caliente con objeto de rebajar la velocidad de enfriamiento, sobre todo en la zona del alma, en las calidades más aleadas. Este último aspecto junto con el análisis en profundidad del proceso final de enderezado en frío permitirá obtener las características resistentes deseadas sin introducir un nivel de tensiones residuales excesivo.

6. REFERENCIAS

[1] ORE, "Factors influencing the fracture resistance of rails in the unused condition", Report No.1, Office for Research and Experiments of the International Union of Railways, Utrech (1984).

[2] Jablonsky D., Tang Y. H. and Pelloux R.M., "Simulation of railroad crack growth life using laboratory specimens". Theo. and Applied Fracture Mechanics, 14 (1990) 27-36.

[3] Alias J., "Le rail". Edit. EYROLLES. (1987)

[4] E.N., "Draft european rails standard. Part 1: flat bottom symmetrical railways rails 46 Kg/m and above", CEN/TC256/WG4/5/4 (Septiembre 1993)

[5] Orringer O., "Some suggestions for adjusting rail tests schedules to reflect track characteristics maintenanc, traffic, and weather", Rail Steels Developments, manufacturing and Performance, AIME Iron and Steel Society, Warandale, PA (1993) 149-159.

[6] E.N., "Railway applications-track. Part 1.: flat bottom symmetrical railways rails 46 Kg/m and above", Second draft of the Committee Draft Standard. CEN/TC256/WG4/9/2 (Febrero 1996).

[7] C. Rodríguez, F.J. Belzunce y J.L. González, "Tenacidad a la fractura y resistencia de grietas por fatiga de aceros utilizados en la fabricación de carril", Anales de Mecánica de la Fractura, Vol. 13 (1996) 301-305.