

ACEROS LIBRES DE INTERSTICIALES PARA PRODUCTOS PLANOS LAMINADOS EN FRÍO. TEXTURAS Y EMBUTIBILIDAD

J. A. Pero-Sanz Elorz
Doctor Ingeniero Industrial

Los aceros ferríticos, como los ferritoperlíticos y los perlíticos, después de su laminación en caliente no presentan buena calidad superficial. La superficie resulta oscura, oxidada, no brillante, como puede advertirse en barras para hormigón armado, carriles, chapas para calderas y/o recipientes a presión, chapas para barcos, tuberías para oleoductos y gasoductos, alambroz, etc. Además, los laminados en caliente suelen presentar irregularidades de espesor.

Para muchas aplicaciones se requiere que el producto (delgado) tenga *buen acabado superficial* y *espesor uniforme*. Tal es el caso de planos "laminados en frío" utilizados para exteriores de carrocerías de automóvil, envases, muebles metálicos, etc. Se conocen como "laminados en frío" los aceros cuyo estado de entrega es el resultante de haber sido laminados en

caliente, decapados luego superficialmente, laminados después en frío (en fase "alfa"), y finalmente recristalizados. Como es lógico, para poder laminar en frío las estructuras ferritoperlíticas se requiere escasa proporción de perlita o (lo que es igual) que el contenido de carbono en el acero sea bajo ($\%C < 0,1$)

El consumo de laminados en frío supone cerca del 40% de la producción mundial de aceros. Aproximadamente la mitad de ese consumo corresponde a productos planos, de espesor entre 0,1 y 0,5 mm revestidos con estaño (hojalata); o bien a chapa galvanizada (revestida de zinc y de espesores entre 0,5 mm y 3 mm). El resto de la producción de esos aceros (*cold rolled*) se destina a carrocerías de automóvil, tubos laminados en frío, electrodomésticos, envases, muebles, etc.

miento total "verdadero", ϵ_T , pueden estimarse aplicando las fórmulas de **Pickering**, siendo d (en mm) el tamaño de grano de la ferrita):

$$Re \text{ (en MPa)} = 54 + 32.(\%Mn) + 83.(\%Si) + 354.(N_f^{1/2}) + 17.d^{1/2}$$

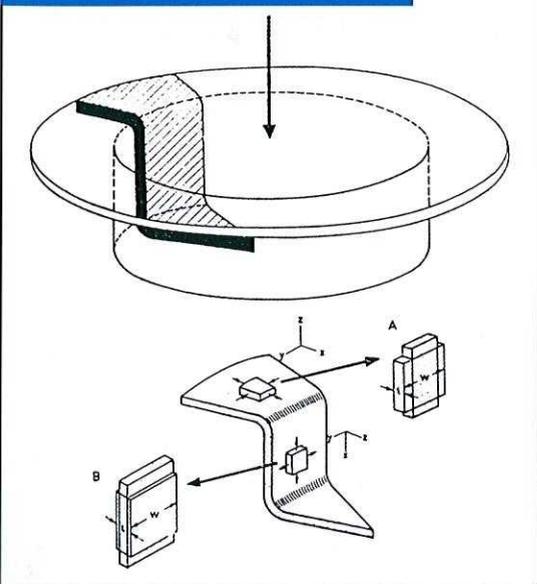
$$\epsilon_u = 0,28 - 0,2.(\%C) - 0,25.(\%Mn) - 0,044 (\%Si) - 0,039 (\%Sn) - 1,2 (N_f^{1/2})$$

$$\epsilon_T = 1,4 + 0,017 .d^{1/2} - 2,9 (\%C) - 2,2 (\%S) - 3,9 (\%P) - 0,25 (\%Sn) + 0,20 (\%Mn) + 0,16 (\%Sn)$$

El porcentaje de nitrógeno libre solubilizado en la ferrita N_f , no combinado a modo de nitruros o carbonitruros, tiene un marcado efecto en las propiedades. Los elementos que, como el nitrógeno, debido a su pequeño diámetro atómico, forman en el hierro soluciones sólidas no de sustitución sino de inserción, reciben el nombre de *intersticiales* (C, H, N, O). Esos elementos resultan desfavorables en los laminados en frío; sobre todo en cuanto *al envejecimiento del acero*.

Con el transcurso del tiempo llega a producirse un envejecimiento de estos aceros provocado por la difusión de los elementos intersticiales hasta producir un anclado de las dislocaciones, siempre existentes (también en estado recristalizado) en el interior de la ferrita. Entre las manifestaciones de envejecimiento al cabo del tiempo (*strain aging*) se cuentan - por lo que respecta al ensayo de tracción -: incremento del límite elástico Re , aumento de dureza, palier de fluencia (*yield point*), líneas de Lüders y disminución del alargamiento

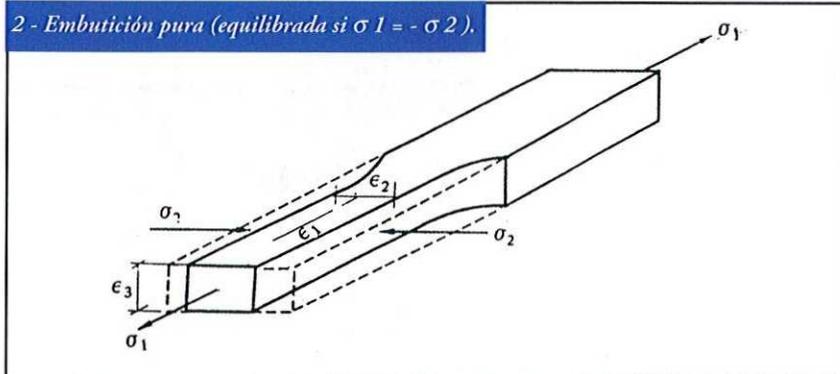
1- Estado de tensiones y deformaciones en el ala y pared de una copa cilíndrica durante el proceso de embutición.



Propiedades de uso de los aceros laminados en frío

Conviene que esos productos planos presenten escasa resistencia a la deformación plástica (*bajo límite elástico*) a fin de poder lograr en ellos formas definitivas por conformado mediante pequeños esfuerzos, también en frío, por embutición, estirado, estampación, doblado, etc. En primera aproximación, los valores del límite elástico de estos aceros, Re , de su alargamiento uniforme, ϵ_u , y del alarga-

2 - Embutición pura (equilibrada si $\sigma_1 = -\sigma_2$).



total. El incremento del límite elástico en estos aceros, al cabo de 10 días de envejecimiento, siendo N_f y O los porcentajes respectivos de nitrógeno y oxígeno en solución sólida de inserción en la ferrita (y Mn su porcentaje en solución sólida de sustitución), puede estimarse en: ΔR_e (en MPa) = $15,4 (1250 \cdot N_f - 0,5 \cdot Mn + 30 \cdot O + 0,8)$. Y habida cuenta de que el recorrido medio de un átomo por difusión es proporcional a la raíz cuadrada de su coeficiente de difusión, D , multiplicado por el tiempo - es decir, $X = (D \cdot t)^{1/2}$ - y que la difusión se activa térmicamente (D sigue la ley de Arrhenius) el envejecimiento aumenta con la temperatura.

Entre los defectos producidos por el envejecimiento merecen citarse las líneas de deformación localizada (*stretchers strains*) en las chapas de acero dulce para exteriores de automóvil si las chapas recristalizadas han sido deformadas por estampación en frío luego de prolongado tiempo de almacenamiento. Esas líneas (que se ponen muy de manifiesto una vez pintada la carrocería) tienen el mismo origen que el palier de fluencia y las líneas bandas de Lüders: la generación de nuevas dislocaciones al romperse los anclajes que sobre las dislocaciones originales ejercerían los elementos intersticiales.

Para remediar el envejecimiento de aceros que contienen elementos intersticiales en solución sólida conviene producir un ligero estirado previo, antes de la estampación, para que la deformación resulte uniforme, no localizada. Tiene la misma fi-

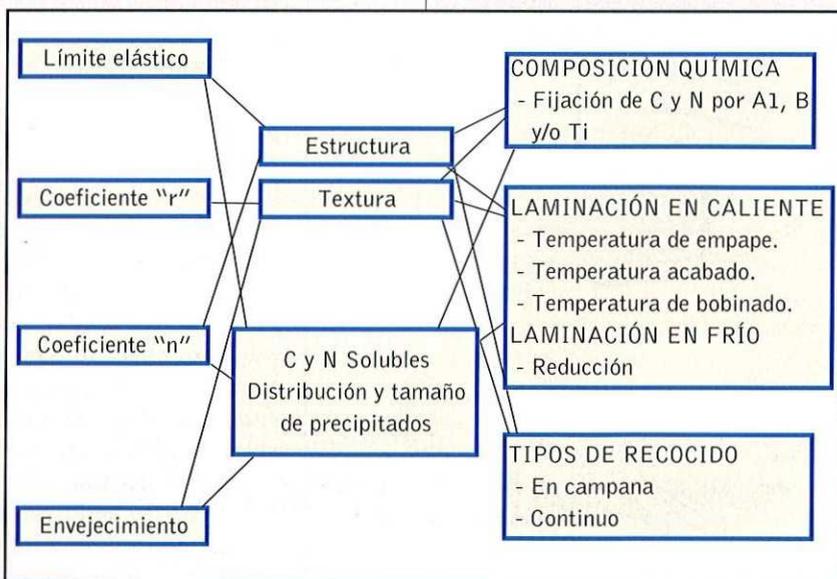
nalidad el laminado atemperante, o laminado en frío con reducción entre 0,25-1% mediante cilindro alisador, que suele darse en acería a las bobinas de chapa fina después de laminación en frío y recristalización. El límite elástico después de ese "temper rolling" favorece que la fluencia sea continua, sin serraciones.

Otra propiedad requerida en las chapas laminadas en frío es una buena aptitud a la embutición ya que muchos de los productos obtenidos a partir de esos planos adquieren su forma definitiva mediante ese proceso de conformado. La operación de embutir se realiza colocando la chapa sobre una matriz de forma adecuada y empujando el metal contra ella mediante un punzón. Para evitar que la chapa se levante durante la operación es necesario colocar sobre ella un ani-

llo sujetachapas cuya misión no consiste en actuar como mordaza (en ese caso la operación sería un "estirado") sino simplemente como guía. En la Figura 1 se ilustra, simplificada, un esquema de los estados de tensión y deformación en la embutición profunda: en la zona que no ha entrado todavía entre el punzón y la matriz (zona del ala) la chapa está sometida a tracción radial y compresión circunferencial; en la pared de la copa ya embutida la chapa está sometida a compresión normal y tracción radial; y en el fondo de la copa, supuesta la ausencia de fricción entre el punzón y el material, existe un estado de tracción biaxial.

La embutición pura, también denominada "equilibrada", se caracteriza (Figura. 2) por un estado de tensiones y deformaciones tal que: $\sigma_1 = -\sigma_2$, $\sigma_3 = 0$ ($\epsilon_1 = -\epsilon_2$ y $\epsilon_3 = 0$) siendo los valores ϵ los alargamientos verdaderos medidos en la dirección perpendicular a la tracción y a lo ancho de la chapa

Las calidades de aceros en cuanto a embutibilidad suelen clasificarse, de menos a más, con las denominaciones CQ (*Commercial Quality*), DQ (*Deep Quality*) y DDQ (*Deep Drawing Quality*). La aptitud de una chapa para ser embutida queda cualifica-



3- Interacción de variables en las propiedades de los aceros de laminación en frío.

da habitualmente mediante su *coeficiente de anisotropía normal de Lankford*, determinado por ensayo de tracción: $r = \epsilon_2 / \epsilon_3$. El valor de "r" resulta tanto mayor (y por tanto mejor la embutibilidad) cuanto menor sea el adelgazamiento que experimenta la chapa durante la deformación. O, lo que es igual, cuanto mayor sea la intensidad de la componente {111} en la textura de la chapa (cuya figura de polos es otro procedimiento para determinar la embutibilidad)

En cuanto a embutibilidad, otro parámetro de calidad de las chapas es su coeficiente de anisotropía plana, $\Delta r = (r_0 + r_{90} - 2.r_{45}) / 2$, valor que caracteriza las variaciones del coeficiente "r" en el plano de la chapa según el eje de la probeta de tracción coincida con el de la dirección de laminación (0°) o bien corresponda con una dirección situada a 90° o a 45° de la dirección de laminación.

Entre las propiedades de uso de los laminados en frío cuenta también su aptitud al estirado. El estirado puro, o estado de tensión plana, queda definido por $\sigma_1 = \sigma_2 > 0$, $\sigma_3 = 0$; siendo $\epsilon_1 = \epsilon_2$ y $\epsilon_3 = -2\epsilon_1$.

Para la conformación de chapas por estirado convienen altos valores del coeficiente "n", obtenido mediante el ensayo de tracción ya que, a partir de la curva convencional de tracción (σ_s , A) - de esfuerzos aparentes

($\sigma_s = F / S_0$) y alargamientos $A = (L-L_0) / L_0$: L_0 - puede obtenerse punto a punto la curva real de tracción (σ_r , ϵ) mediante: $\epsilon = \ln(A+1)$, $\sigma_r = \sigma_s(A+1)$. Esa curva real de esfuerzos - deformaciones sigue con sensible aproximación la ley de Ludwick: $\sigma_r = K.\epsilon^n$. Por tanto, puede determinarse el valor de "n" al dibujar esa curva real en escalas logarítmicas ($\log \sigma_r$ en ordenadas y $\log \epsilon$ en abscisas) en el dominio que no aparezca estricción, o, lo que es lo mismo, mientras los alargamientos sean uniformes (es decir, en tanto $S_0.L_0 = S_r.L$) ya que se obtendrá una recta cuya pendiente es el valor "n". Se demuestra fácilmente que el valor de "n" así determinado coincide precisamente con la abscisa del punto de intersección de las curvas (σ_s , ϵ) y ($d\sigma_r / d\epsilon$, ϵ) y, por tanto, "n" es igual al alargamiento máximo uniforme ϵ_u .

La ventaja que para el estirado conlleva un alto valor de "n" se desprende de que, durante la deformación, si el esfuerzo aplicado pudiera llegar a producir estricción en un determinado punto de la chapa, ese punto experimentaría una importante consolidación por acritud (ya que "r" aumenta con "n") y serían las zo-

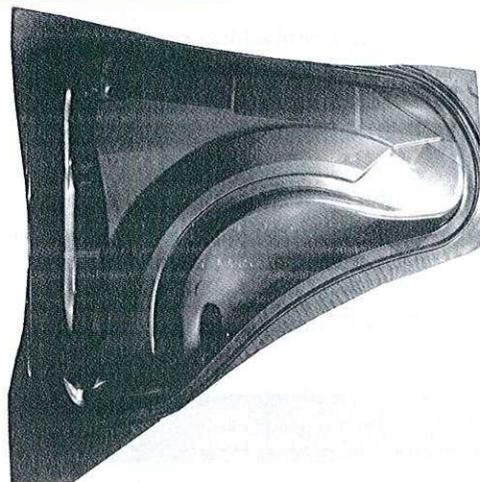
nas contiguas, menos resistentes, las que proseguirían deformándose. Por tanto, cuando el valor de "n" es grande se logra una deformación uniforme del material en vez de progresar la estricción. El valor del coeficiente "n" puede estimarse en primera aproximación en función de la composición química del acero: $\epsilon_u = 0,28 - 0,2.(\% C) - 0,25.(\% Mn) - 0,044(\% Si) - 0,039(\% Sn) - 1,2(N_f^{1/2})$. Esta expresión pone de manifiesto el carácter desfavorable de los elementos intersticiales C y N.

Como resumen de lo anterior, atendiendo a la conformabilidad de los aceros laminados en frío, para poder cubrir un amplio rango de operaciones de conformado, conviene que el acero tenga:

- Bajo límite elástico R_e (para aminorar esfuerzos)
- Alto valor de "r" (para embutibilidad)
- id. id de "n" (para estirado sin estricción)
- id. id del alargamiento total a fractura (para ductilidad)
- Resistencia al envejecimiento.

En la calidad de las chapas laminadas en frío interaccionan muchos factores, resumidos en la Figura 3, que condicionan la textura y la estructura micrográfica de esos aceros: diámetro del grano ferrítico, distribución y tamaño de segundas fases libres solubilizados en la ferrita; los

4- Aleta delantera del Ford Fiesta, en acero IF.



5- Panel de revestimiento interno lateral, electrocincado y prefosfatado, del Seat Toledo, en acero IF.



procesos de laminación en caliente (V.gr. temperatura de empape, temperatura de acabado, temperatura de bobinado) laminación en frío (V.gr. porcentaje de reducción en frío). Y, sobre todo, la modalidad de recocido de las chapas laminadas en frío según se realice en campana o en continuo. En cualquier caso conviene siempre un bajo contenido de elementos intersticiales

La elaboración de los aceros IF comporta un cuidadoso control de la composición química para lograr muy bajos contenidos de carbono - calidad ELC (*Extra Low Carbon*, 0,003%) o calidad ULC (*Ultra Low Carbon*, 0,001 %) - y de otros elementos intersticiales así como de metales (P, S). Ese cuidado en la elaboración encarece el coste de estos aceros, cuya producción mundial es de varios millones de toneladas anuales.

Para su obtención no es factible la vía H.E.A (Horno eléctrico de arco): no puede partirse exclusivamente de chatarra sino de arrabios con bajo grado de contaminación. Después de afinar el arrabio en el convertidor se requiere el desgasificado por argón bajo vacío y operaciones complementarias de metalurgia: para rebajar aún más el contenido en metales, es preciso ajustar el contenido en microaleantes y lograr la especificación final del acero.

Posteriormente el acero es colado en continuo, laminado en caliente, laminado en frío y sometido a un recocido de recristalización en fase ferrítica.

La eliminación del nitrógeno no llega a ser completa en la degasificación: suelen quedar unas 15 partes por millón (0.0015%N) por lo cual es necesario que el acero contenga Ti y/o Nb a fin de que reaccionen en estado sólido con el nitrógeno (y también con el carbono) para conseguir precipitar estos elementos intersticiales a modo de nitruros o carbonitruros. Los elementos que, como el Ti y Nb eliminan el carbono de la ferrita suelen denominarse depuradores o "recogedores de basura" (*scavenging elements*).

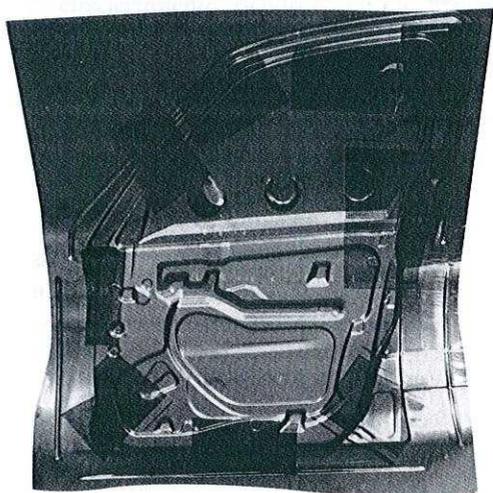
Los nitruros son más estables al calentamiento -menos solubles (tanto en la ferrita como en la austenita)-

que los carburos. Las solubilidad de esos nitruros y carburos en la ferrita resulta menor que en la austenita. Además, en el rango de temperaturas de la ferrita, esos nitruros resultan menos solubles que el AlN y por ello el Ti y el Nb resultan más efectivos que el Al para fijar el N. La cantidad de Ti ha de ser suficiente para eliminar todo el carbono y todo el nitrógeno a modo de TiC y TiN. La relación estequiométrica Ti/C es aproximadamente igual a 4 y también resulta prácticamente igual a 4 la relación Ti/N. Por ello la cantidad de Ti en un acero de 0.001%C y 0.0015%N ha de ser al menos 0.01%Ti.

Los productos comerciales suelen mantener una relación Ti/(C+N), expresada en porcentaje en peso, entre un 6 y un 12. Pero dejar algo de C y N disueltos en la ferrita -aunque rebaja la conformabilidad y favorece el envejecimiento - puede, sin embargo, suele resultar beneficioso porque eleva la cohesión intergranular ya que un inconveniente de los aceros IF es su tendencia a la fractura intergranular debida a la presencia de TiC y TiN en juntas de grano, que las debilita. De hecho, la temperatura de transición dúctil-frágil (*Impact Transition Temperature*, ITT) de estos aceros resulta más alta que la de los aceros convencionales calmados con Al (que llegan a temperaturas inferiores a -70 °C). Por ejemplo, para contenidos de P de unas 250 ppm, la ITT de aceros IF es superior a -20 °C (por eso se procura que el P no exceda 100 ppm).

A veces suele añadirse a los IF algo de Nb, del orden de 0.005%, por su efecto afinador del grano ferrítico después de la laminación en caliente. Ello favorecerá luego, en la chapa laminada en frío y recocida en continuo CA, la textura {111}. Con todo, en algunos casos, debe prescindirse del Nb porque eleva unos 100 °C la temperatura de recristalización; y si la chapa laminada en frío es muy fina (del orden de 0,7 mm) puede deformarse.

6- Panel interno de la puerta delantera derecha del Citroën Xsara-Picasso, en acero IF.



Aceros libres de elementos intersticiales (*Interstitial Free, IF*)

El desarrollo de aceros libres de elementos intersticiales ha marcado un hito en la conformabilidad de chapas delgadas de aceros ferríticos. Ha permitido obtener calidades de embutición excelentes EDDQ (*Extra Deep Drawing Quality*) asociadas a límites elásticos muy bajos (Re inferiores a 150 MPa)-a veces excesivamente blandos-, con coeficientes "r" superiores a 2. Además, por carecer prácticamente de carbono y nitrógeno solubilizados en la ferrita resultan prácticamente inmunes al envejecimiento lo que justifica su empleo creciente en la industria de automoción (V.gr. para paneles y aletas del Ford Fiesta, Seat Toledo, Citroën Xsara-Picasso- Figuras 4, 5 y 6, etc.)

7- Microestructura de acero IF laminado en caliente.



La que sigue es una composición típica de acero IF *ultra low carbon*. En partes por millón en peso: 10 ppm C, 15 ppm N, 100 ppm Ti (0.010%Ti), 100 ppm P- refosforado-, 100 ppm Mn, 5 ppm S. Las características mecánicas de este acero resultaron ser: Re igual a 120 MPa, alargamiento superior al 50% (para Lo igual a 50 mm), coeficiente "n" superior a 0,25, coeficiente "r" de Lankford a igual a 2,5 en la dirección de laminación.

Los procesos de laminación en caliente, temperaturas de bobinado, laminación en frío y recocido de los aceros IF difieren del esquema seguido en otros aceros no IF: al no contar éstos con AlN -y su influencia sobre las texturas-; ni precisar, salvo excepciones, una sobremaduración después de la recristalización del laminado en frío.

La temperatura de empape debe ser baja (habitualmente 1.150 °C)

para que no se redissuelvan los TiN o NbN precipitados ya previamente a la laminación en caliente. En cuanto al programa de laminación en caliente, supone una doble laminación: desbaste en caliente a 1.000 °C y acabado en fase alfa (Figura 7) para resaltar

más la textura {111} en el plano de laminación. La laminación en frío se hace habitualmente con reducciones del orden del 70-80%, y lubricación abundante, hasta un espesor final de 0,6-0,9 mm. Pero todo hace suponer que resultan más favorables deformaciones en frío del 90 %, al rebajar Δr. Hemos podido verificar una polarización de las componentes de textura hacia las orientaciones {111} y {100} a medida que aumenta el porcentaje de reducción en frío (Figura 8).

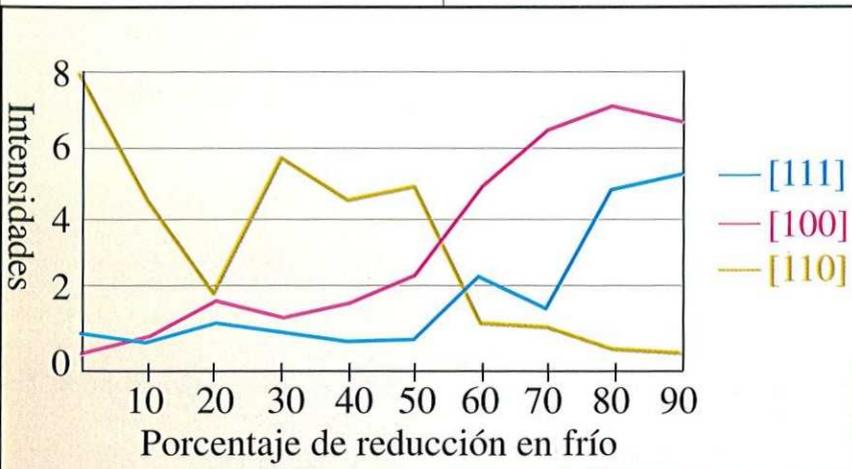
En el ámbito de los aceros altamente aleados, los aceros libres de intersticiales presentan también un futuro muy prometedor. Concretamente los aceros inoxidables ferríticos IF actualmente compiten en aplicaciones con los inoxidables austeníticos por sus ventajas en cuanto a precio y resistencia a corrosión bajo tensiones, unido a su buena conformabilidad (valores de "r" del orden de 1,9).

Agradecimientos

A mi colega el profesor J. I. Verdeja (y a nuestros colaboradores J. Asensio, F. Menéndez, V. J. Martínez y G. Romano) por su concurso en el tema de los aceros laminados en frío, objeto de investigación conjunta entre las Escuelas de Ingenieros de Minas de Oviedo y Madrid. A *Aceralia* por el suministro de aceros IF e información; y, concretamente, a sus ingenieros Carlos Espina y Angeles Cabal por las fotografías aportadas de aleta y paneles de automóvil en aceros IF.

Referencias

- Pickering, F.B. - "Physical Metallurgy and the Design of Steels" Ed. App. Scien.Publ. (1983)
- Takechi, H. - "Metallurgical aspects on Interstitial Free Steel from Industrial Viewpoints". ISIJ International, Vol. 34, pp. 1-8 (1994)
- Senuma T & Kawasaki K.- "Texture formation in Ti-bearing IF steels sheets throughout the rolling and annealing processes in terms of the influence of hot rolling conditions on deep drawability"-ISIJ International, Vol. 34, pp.51-60 (1994)
- Verdeja J.A, Martínez V.J, Pero-Sanz J.A.- "Acero libre de intersticiales para embutición" Revista de Minas,15, pp. 79-82 (1997)
- Pero- Sanz J.A., Martínez V., Verdeja J.I. "Annealing textures for drawability; influence of the degree of cold rolling reduction for low and extra low carbon ferritic steels". Materials Characterization, pp. 303-309 (1999)
- Pero-Sanz J.A. - "Ciencia e Ingeniería de Materiales" Editorial Dossat, 4ª Edición, Madrid (2000)
- Martínez V.,Verdeja J.I, Pero-Sanz J.A- "Interstitial Free: influence of the alpha - phase hot rolling and cold rolling reduction to obtain extra deep drawing quality", Mater. Charact. Vol 46, pp 45-53 (2001)
- Asensio J, Verdeja J.I, Pero-Sanz J.A - Ferritic steels. Optimization of hot-rolled textures through cold rolling and annealing. Mater. Charact., Vol 47, pp. 119-127 (2001) ■



8- Evolución de las intensidades de texturas, en un acero IF, con el porcentaje de laminación en frío.