

# METALURGIA FÍSICA DE LOS ACEROS PARA CONFORMADO.

**Palabras clave:** conformado de chapas metálicas, aceros para estampado, metalurgia física.  
**Key words:** sheet-metal forming, press-working steels, physical metallurgy.

En este artículo se identifican diferentes procesos de conformado de chapas, sollicitaciones a las que está expuesto su material, mecanismos básicos de deformación de metales y aportes que brinda la Metalurgia Física a su mejor comprensión y control. Con este fin se pasa revista a aspectos de esa disciplina que hacen al endurecimiento, ablandamiento y la anisotropía del material a ser procesado industrialmente.

In this paper different types of sheet-metal forming and the stresses experienced by the deforming material are identified. After that, the main deforming mechanisms of metals and the contribution given by the Physical Metallurgy to their better understanding and control are reviewed. To do this, the strengthening and softening mechanisms acting in steel sheet-metal working are summarized.

## ■ Lucio Iurman

Laboratorio de Metalurgia de la Universidad Nacional del Sur.  
Cargo: Profesor Consulto.

E-mail: lucio.iurman@gmail.com

## ■ INTRODUCCIÓN

La producción mundial de aceros en los últimos años fue de alrededor de mil seiscientos millones de toneladas. Aproximadamente la mitad correspondió a productos planos, distribuidos entre lo que se conoce como chapas (*sheets*) y placas (*plates*), según el espesor de los mismos. Desde el punto de vista del conformado, las chapas ocupan el lugar exclusivo de este universo. Serán el objeto de este trabajo.

En otro artículo de este número de C e I se muestran algunas operaciones industriales de conformado. Los productos de mayor relevancia de estas operaciones están dirigidos a la industria automotriz y a la de electrodomésticos. La variedad de exigencias, formas y tamaños de las piezas obliga a un conocimiento exhaustivo del comportamiento del material involucrado en el proceso para que el mismo sea exitoso. Este conocimiento ha ido avanzando a medida que se iba adquiriendo experiencia en la planta industrial. El

usuario de la chapa se hizo cada vez más exigente y el productor del acero debió suministrar un material acorde al proceso al que iba a ser sometido. El proceso de fabricación del acero se fue mejorando, sin perder de vista la ecuación de calidad y su costo de producción.

Los progresos realizados en la tecnología del estampado de chapas de acero fueron posibles gracias, entre otros factores, al avance de conocimientos de la metalurgia física aplicados en particular a los aceros.

Es lo que trataremos de reseñar en este trabajo.

### ■ 1. LA METALURGIA FÍSICA Y EL CONFORMADO DE CHAPAS DE ACERO EN 1969

En un artículo publicado en ocasión del centenario del *Iron and Steel Institute*, Duckworth y Baird (1969), se hacían la siguiente reflexión: "Uno de los hechos sorprendentes de los aceros de bajo contenido en carbono (*mild steels*", nota

del autor) es la extensión en que su desarrollo ha sido ignorado por los metalurgistas físicos hasta años recientes. Cuando se recuerda que los productos de hierro y acero constituyen el 94% de todos los metales usados en el mundo y que el acero no aleado es el 85% de todo el acero manufacturado, esta falta de consideración del acero blando por parte de los metalurgistas físicos es muy destacable".

Proseguían los autores mencionados: "Uno de los principales avances en el desarrollo de la comprensión de la chapa de acero utilizada para el conformado en frío ha sido el descubrimiento de cómo clasificar los diferentes tipos de procesos de conformado y definir las propiedades mecánicas particulares requeridas para la óptima performance en cada tipo de proceso. Los principales tipos de deformación involucrados en el estampado de chapas de acero son el embutido profundo, el estirado, y el doblado." En la Figura 1 se muestra el esquema que acompañaban en su trabajo. Si bien en la

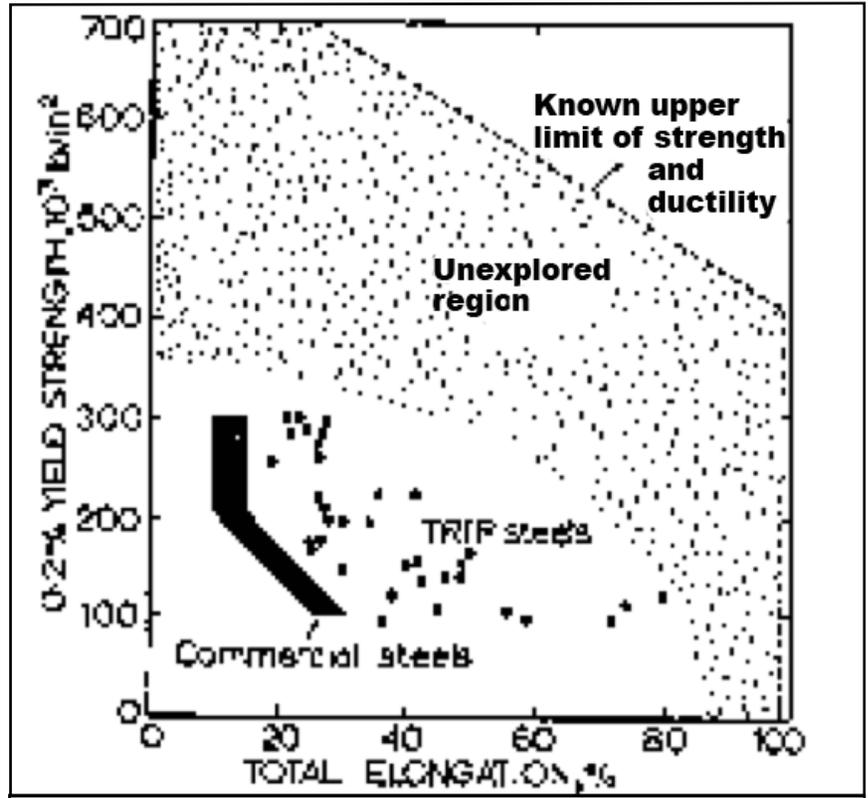
misma no se muestra en forma específica el doblado, además de ser esta operación típica del conformado de estanterías y muebles por ejemplo, está presente incluso en las dos mostradas.

Hay que mencionar, de todas maneras, que los metalurgistas físicos habían hecho ya contribuciones de utilidad en el campo del conformado, quizás todavía sin un pedido específico de los productores, y entre las cuales destacamos:

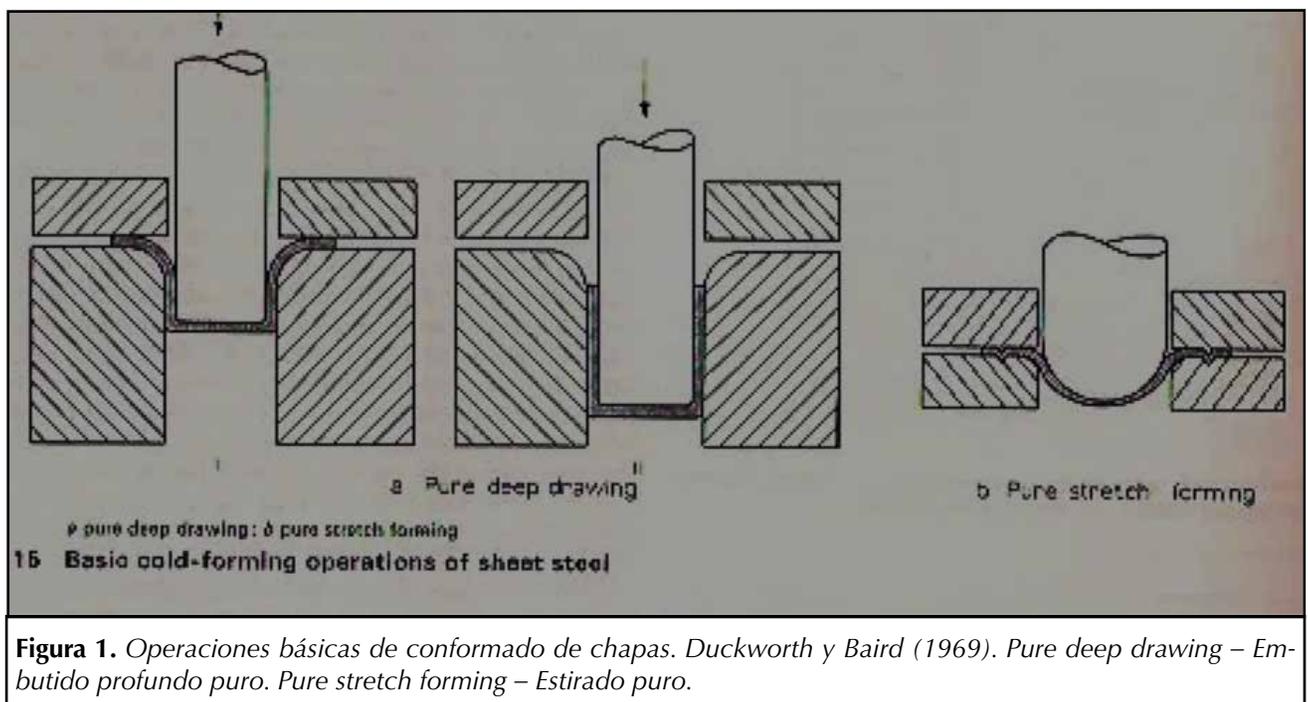
- Parámetro de anisotropía  $R$ , Lankford y otros (1950)
- Influencia del tamaño de grano en la tensión de fluencia de los metales, Hall (1951), Petch (1953)
- Comprensión del envejecimiento por deformación (*strain aging*), Cottrell (1956)

Por otra parte, Zackay (1969), mostraba en un gráfico resistencia – alargamiento, el campo de los aceros desarrollados hasta esa fecha, y las posibilidades predichas por la

teoría. Es lo que se muestra en la Figura 2. Se ve que el campo de desarrollo posible era muy amplio.



**Figura 2.** Relación entre la tensión de fluencia y el alargamiento en diferentes tipos de aceros. Zackay (1969). Yield strength – Tensión de fluencia. Total elongation – Alargamiento total. Commercial steels – Aceros comerciales. TRIP steels – Aceros TRIP. Unexplored region – Región no explorada. Known upper limit of strength and ductility – Límite superior conocido de resistencia y ductilidad.



**Figura 1.** Operaciones básicas de conformado de chapas. Duckworth y Baird (1969). Pure deep drawing – Embutido profundo puro. Pure stretch forming – Estirado puro.

Afortunadamente, los metalurgistas físicos recogieron el guante y los requerimientos productivos, económicos y de calidad que emergieron de la industria fueron logrados con el aporte del conocimiento de la metalurgia moderna. Se puede decir que actualmente el "contenido" de metalurgia física que hay en el seno de una chapa de acero para estampado de piezas exigidas en cuanto a conformabilidad, resistencia mecánica, o tenacidad es impresionante.

## ■ 2. ASPECTOS GENERALES DE METALURGIA FÍSICA APLICADOS A LOS ACEROS PARA CONFORMADO

La naturaleza especial del enlace entre los átomos de los metales origina, entre otros aspectos, su agregación en forma ordenada en el espacio, conocida como estructura cristalina. En este esquema, se denomina cristal (o grano) a una porción de metal con la misma orientación en el espacio, diferente de la de los

cristales adyacentes. En cada cristal se reconocen planos y direcciones, como quedan en evidencia cuando se talla un diamante, por ejemplo. Que no es un metal pero tiene el mismo tipo de organización espacial de los átomos. En los aceros encontramos básicamente dos estructuras cristalinas: el sistema cúbico centrado en el cuerpo y el cúbico centrado en las caras.

La denominación proviene de la celda básica que forma estas redes cristalinas y se ilustra en la Figura 3. El hierro y, por extensión, los aceros que son aleaciones de este elemento con otros, tiene una cualidad llamada *alotropía*, que implica la transformación de una estructura cristalina en otra diferente cuando cambia la temperatura. Por encima de una temperatura dada, los aceros están constituidos por un arreglo atómico llamado *austenita*, que pertenece a la estructura cristalina cúbica centrada en las caras y, por debajo de esta temperatura, que incluye a la

temperatura ambiente, por otro tipo de arreglo, *ferrita*, con estructura cúbica centrada en el cuerpo.

El conformado implica la presencia de una deformación plástica o irreversible. En los cristales metálicos esta deformación se produce por *deslizamiento de los planos cristalinos*, como se muestra en la Figura 4 (Iurman, 1986).

Los modelos teóricos de la física de los cristales, pensados como estructuras perfectas, predecían esfuerzos o tensiones necesarios para desplazar un plano cristalino sobre otro y producir de este modo una deformación plástica, entre diez y cien veces superior a los experimentales. Era obvio que los modelos no respondían a la realidad (Courtney, 1990). Para explicarlo se pensó entonces en defectos presentes en la estructura cristalina, cuya existencia pudieron revelar los avances en la tecnología de los rayos X. Estos defectos se conocen como *dislocacio-*

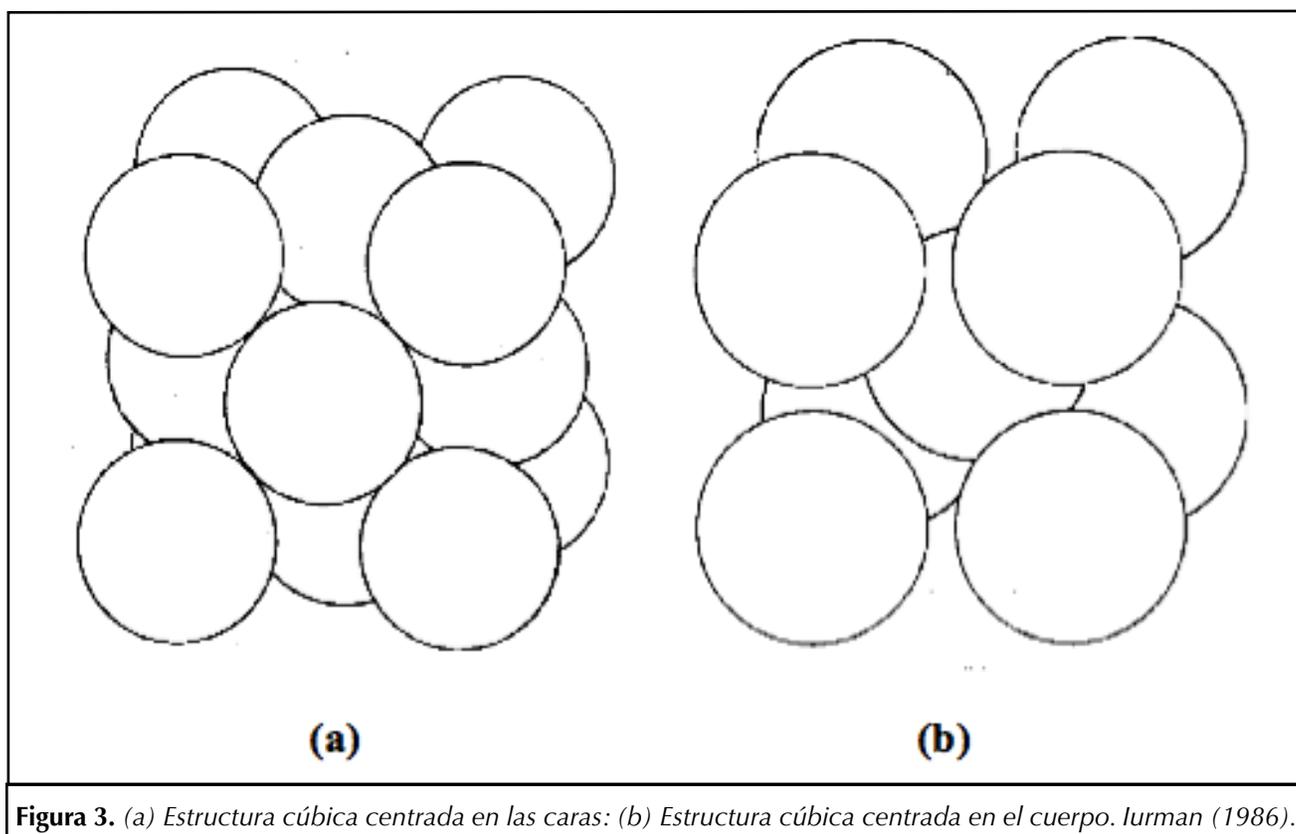
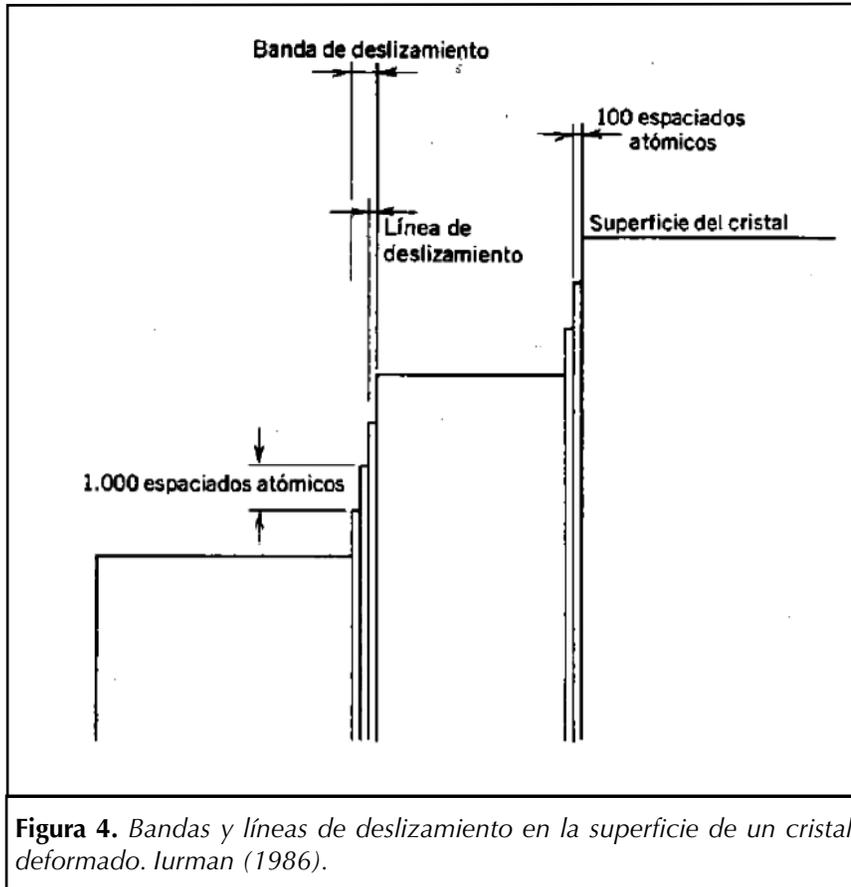


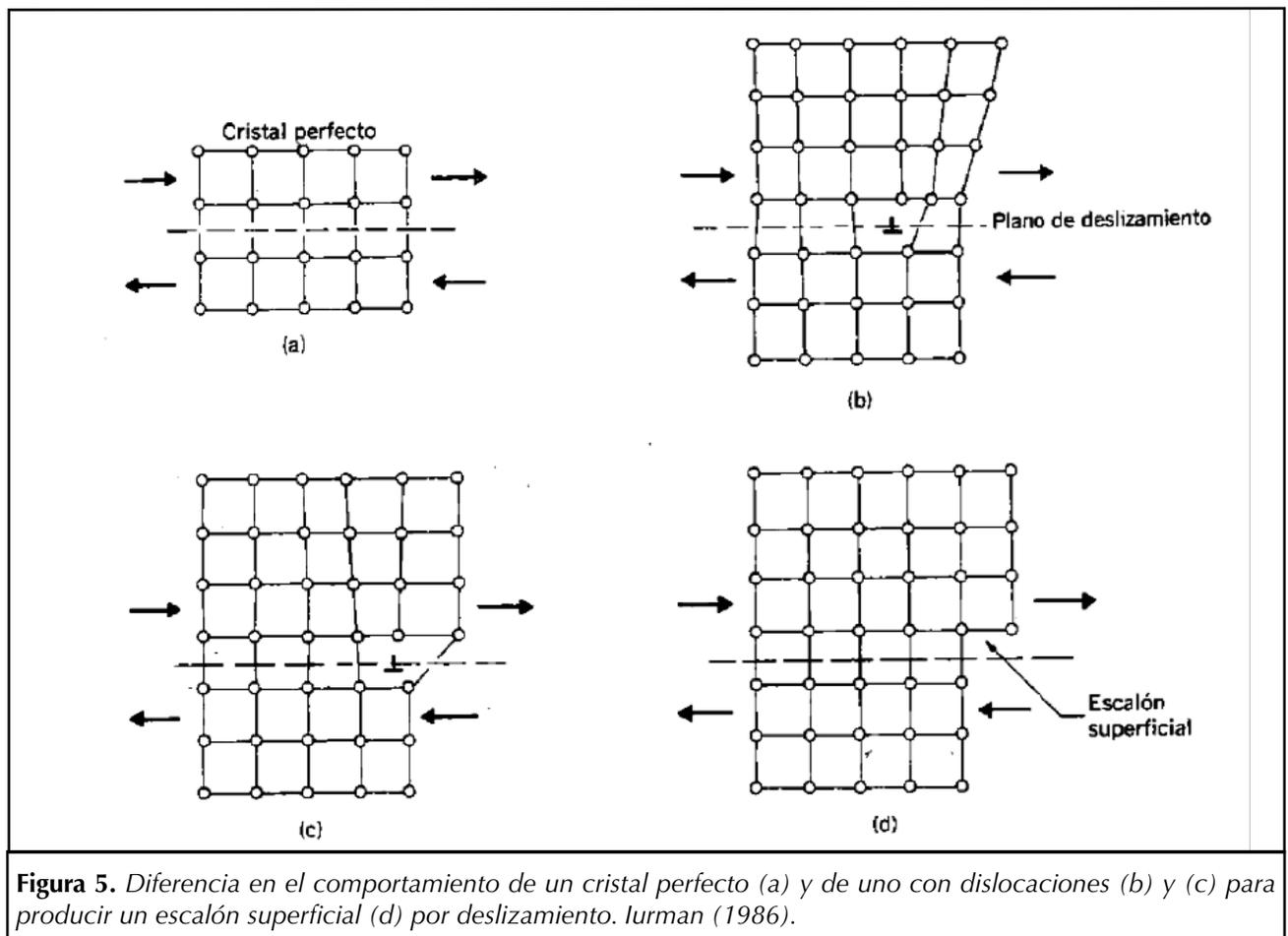
Figura 3. (a) Estructura cúbica centrada en las caras: (b) Estructura cúbica centrada en el cuerpo. Iurman (1986).



**Figura 4.** Bandas y líneas de deslizamiento en la superficie de un cristal deformado. Iurman (1986).

nes y explican muchos fenómenos relacionados con el comportamiento mecánico de los metales. En la Figura 5 se muestra una versión simplificada de este tipo de defectos y la forma en que su desplazamiento es responsable de que la deformación plástica se produzca a esfuerzos mucho menores que los necesarios según la teoría de un cristal perfecto: En éste, para deformar al cristal sería necesario romper simultáneamente todas las ligaduras atómicas entre el plano superior y el inferior. El desplazamiento del defecto se hace rompiendo una a la vez (Callister Jr., 1994).

De lo visto hasta aquí surge una premisa básica que regula el comportamiento mecánico de los metales en general y del acero en particular: *Todo aquello que facilite el desplazamiento de las dislocaciones hará que sea más fácil deformar al*



**Figura 5.** Diferencia en el comportamiento de un cristal perfecto (a) y de uno con dislocaciones (b) y (c) para producir un escalón superficial (d) por deslizamiento. Iurman (1986).

metal. Y recíprocamente, todo lo que dificulte el movimiento de las dislocaciones, hará que sea más difícil deformarlo. En un cristal no deformado existe un defecto de este tipo cada 10.000 espaciados atómicos aproximadamente. Cuando el metal se va deformando, opera en su seno un mecanismo de generación de nuevos defectos. Son las que se conocen como *Fuentes de Frank y Read* (Chalmers, 1962).

La multiplicación de defectos hace que los mismos interfieran en sus respectivos movimientos y el metal endurece. Es lo que se conoce como *endurecimiento por trabajo en frío*. Esto pone un límite a la deformación que se puede llevar a cabo en tales condiciones. Bien sea porque el metal está presentando una resistencia mayor a las posibilidades de los equipos de trabajado o porque se fragiliza y corre el peligro de romperse. Se recurre en estos casos a un tratamiento térmico de ablandamiento conocido como *recocido*. En este tratamiento, aparecen cristales nuevos, "limpios"

de defectos, que reemplazan a los anteriores. Hemos puesto intencionalmente entre comillas el término "limpios", por cuanto ya vimos que en un cristal no deformado hay una dislocación cada 10.000 espaciados atómicos aproximadamente, lo que hace que en una superficie de  $1 \text{ cm}^2$  afloren  $10^6 - 10^8$  dislocaciones! (Courtney, 1990).

### ■ 3. PROPIEDADES MECÁNICAS. EL ENSAYO DE TRACCIÓN

En los procesos de conformado, el material es sometido a esfuerzos externos que así lo deforman.

A los efectos de calcular la magnitud de los esfuerzos necesarios para ejercer la deformación es necesario conocer las propiedades mecánicas del material a trabajar. Usando un ensayo conocido como de tracción que se tratará en forma más exhaustiva en otro artículo de esta revista, se pueden determinar esos esfuerzos. En la Figura 6 se presenta lo que sucede cuando una muestra del material es sometida a

una fuerza de tracción creciente  $F$ . La muestra se estirará y aumentará su longitud.

A los efectos de independizar los datos obtenidos en el ensayo de las dimensiones de la muestra se divide la fuerza por la sección transversal y el alargamiento por la longitud inicial de referencia de la misma, se obtiene de este modo un diagrama llamado de *tensión - deformación*. Al principio, la deformación es proporcional a la tensión aplicada. La deformación es *elástica*, o sea al quitar la carga, el material recupera sus dimensiones originales. Superado un determinado valor de la tensión, llamado *tensión de fluencia*, la deformación deja de ser proporcional y elástica y se entra en el llamado campo de *deformación plástica*. Se trata de una deformación irreversible, o sea, no desaparece al descargar la probeta. La transición de un rango al otro, o *tensión de fluencia*, puede presentar características diferentes. En algunos metales la transición es suave, en otros está claramente marcada.

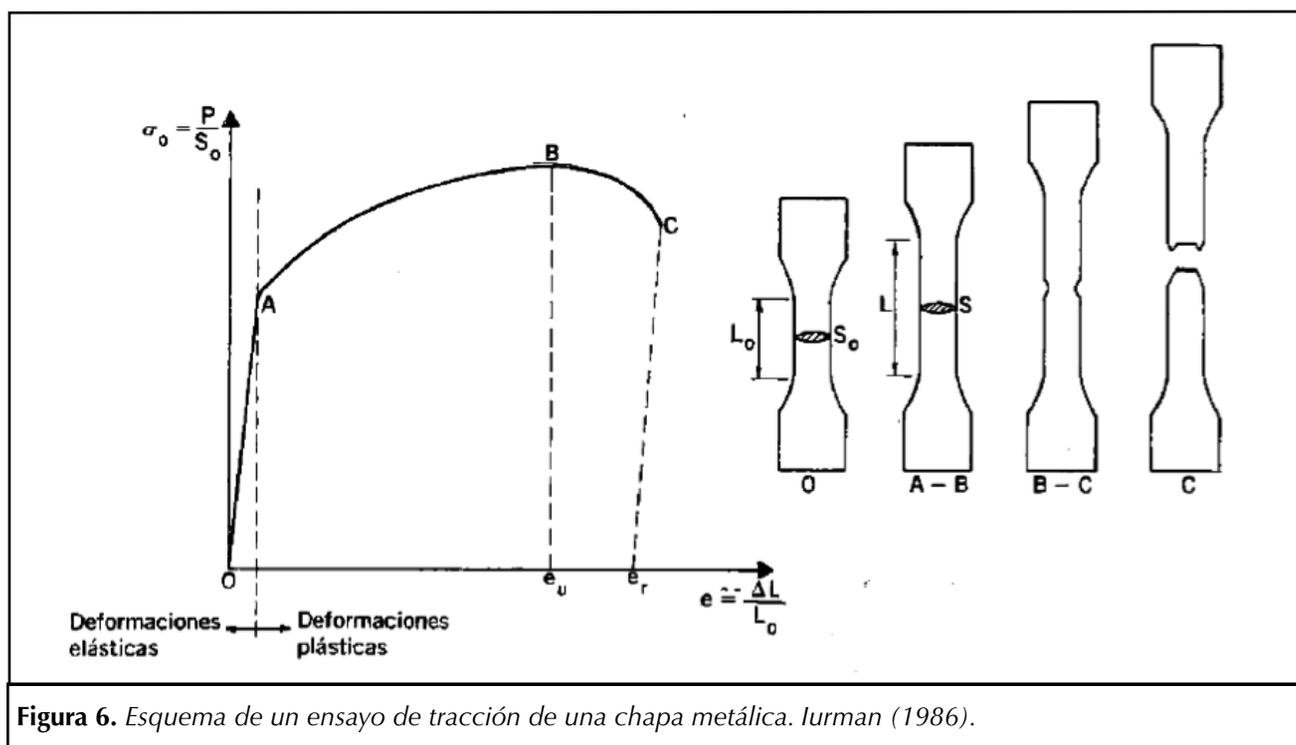


Figura 6. Esquema de un ensayo de tracción de una chapa metálica. Iurman (1986).

En muchos aceros de bajo carbono hay una tercera posibilidad conocida como *fluencia discontinua*.

Los datos que provee el ensayo de tracción del material investigado bajo un simple esfuerzo uniaxial da un amplio panorama de las propiedades del mismo. Con ellos se puede caracterizarlo y obtener información válida para el diseño de herramientas y del proceso para el conformado de las piezas.

Al alargarse el material, la sección transversal del mismo disminuye. O sea, la fuerza se está aplicando sobre una sección transversal cada vez más pequeña. Este efecto se conoce como *ablandamiento geométrico*. Quiere decir que en el estirado de una chapa, existen dos fenómenos contrapuestos: Endurecimiento físico y *ablandamiento geométrico*. Al principio, el endurecimiento supera al *ablandamiento*, poco a poco se van igualando y cuando esto sucede, se produce lo que se llama una *inestabilidad plástica*. Varía el estado de tensiones, hasta ese momento uniaxial, cambia el sistema de deformación, que de general pasa a ser localizado, se produce lo que se conoce como la *estricción*, la carga empieza a caer y la *estricción* a ser cada vez más pronunciada hasta que tiene lugar la rotura de la probeta. La tensión máxima se denomina *resistencia a la tracción*.

Hasta aquí, los hechos. Es importante analizar la contribución que puede hacer la metalurgia física en la comprensión de los mismos para poder controlarlos y, eventualmente, modificarlos. Para ello, analizaremos dos de los temas en los que la metalurgia física ha contribuido, ya que hacen a características importantes del material de partida, la chapa a ser conformada: los *mecanismos de endurecimiento* y de

*ablandamiento de los metales*.

#### ■ 4. MECANISMOS DE ENDURECIMIENTO DE LOS METALES

Analizaremos en este punto las distintas posibilidades que existen para aumentar la resistencia mecánica de los metales no aleados y de las aleaciones metálicas que son necesarias por razones estructurales, de reducción de peso, o cuando se necesita una alta capacidad de estiramiento, donde es conveniente un buen grado de relación de endurecimiento. Algunas de estas posibilidades se pueden encontrar en los metales a los que no se han agregado elementos aleantes, llamados "puros" aunque no lo son estrictamente hablando. En la mayor parte de los casos, sin embargo, se recurre a la adición de otros elementos, con los que se forman las llamadas "aleaciones metálicas", que amplían las posibilidades de mejorar las propiedades mecánicas.

Cabe señalar que los mecanismos que se analizan a continuación para endurecer los metales no aleados son también aplicables a las aleaciones metálicas.

##### a) Metales no aleados.

Hay básicamente tres mecanismos a los que se puede acudir para endurecer un metal no aleado (Lurman, 1986).

- Variación de temperatura
- Disminución de tamaño de grano
- Deformación en frío

##### Variación de temperatura.

Ya hemos visto que algunos metales presentan variaciones alotrópicas, o sea cristalizan con diferentes

estructuras. La ferrita es más blanda que la austenita y tiene un comportamiento muy diferente en lo que a deformación se refiere (Ginzburg, 1989).

Sin embargo, aunque no existan variaciones alotrópicas en un metal dado se puede decir en general que una disminución de temperatura conlleva un aumento en su resistencia mecánica. En algunos, como el hierro, esto es más pronunciado que en otros cuando está presente con una estructura cúbica centrada en el cuerpo. En algunos casos de conformado de piezas difíciles, el enfriamiento de partes de la chapa ha sido fructífero gracias a este efecto de la temperatura (Lucaioni y otros, 2000).

##### Disminución del tamaño de grano.

Los bordes de grano son discontinuidades en la red cristalina. El ordenamiento de los átomos allí no tiene la regularidad característica del interior de los cristales. Constituyen por lo tanto los bordes de grano barreras para el movimiento de las dislocaciones y, como tales, endurecen al metal. Cuanto más pequeño es el tamaño de grano, más bordes hay en un volumen dado y, por lo tanto, más resistente es el metal. Esto ha sido estudiado por Hall y Petch, como ya se ha indicado al principio de este trabajo, y ha dado lugar a la ecuación que se ha hecho famosa como la *ley de Hall y Petch* que vincula la tensión de fluencia de un metal con el tamaño de grano del mismo:  $\sigma_y = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2}$

Donde:

$\sigma_y$  = tensión de fluencia del metal

$\sigma_0$  = resistencia de la red al desplazamiento de las dislocaciones

$k$  = factor que depende del metal

$d$  = diámetro medio de los granos (se entiende como tamaño medio)

La relación de Hall y Petch ha dado lugar a muchos desarrollos. Esto se debe a que, lamentablemente, en los metales existe una relación inversa entre resistencia mecánica y ductilidad (incluida la tenacidad). A mayor resistencia, menor ductilidad y tenacidad, y viceversa. Este mecanismo de endurecimiento, la disminución del tamaño de grano, es el único que aumenta la resistencia mecánica sin sacrificar ductilidad y aumenta también la tenacidad. Ha constituido por lo tanto la base del desarrollo de los aceros microaleados de alta resistencia y baja aleación, conocidos por su sigla en inglés, *HSLA Steels* ("High Strength Low Alloy Steels").

El tamaño de grano influye sobre

la tensión de fluencia pero no altera significativamente la resistencia a la tracción. Un tamaño de grano relativamente grande (no demasiado) resultará en una tensión de fluencia menor y por lo tanto es preferible en aceros para estampado. Existe un límite en este caso: Si el grano es demasiado grande, al deformarse la pieza presentará una rugosidad superficial, conocida como "piel de naranja", totalmente indeseable.

Por lo visto hasta aquí, el tamaño de grano de un acero para conformado deberá ubicarse entre ciertos límites. En los aceros, de acuerdo con la Norma ASTM E-112, elaborada por la asociación norteamericana de estandarización de ensayos de materiales conocida como ASTM, se suele identificar el tamaño de grano mediante un número  $N$  que resulta de la relación siguiente, en la cual

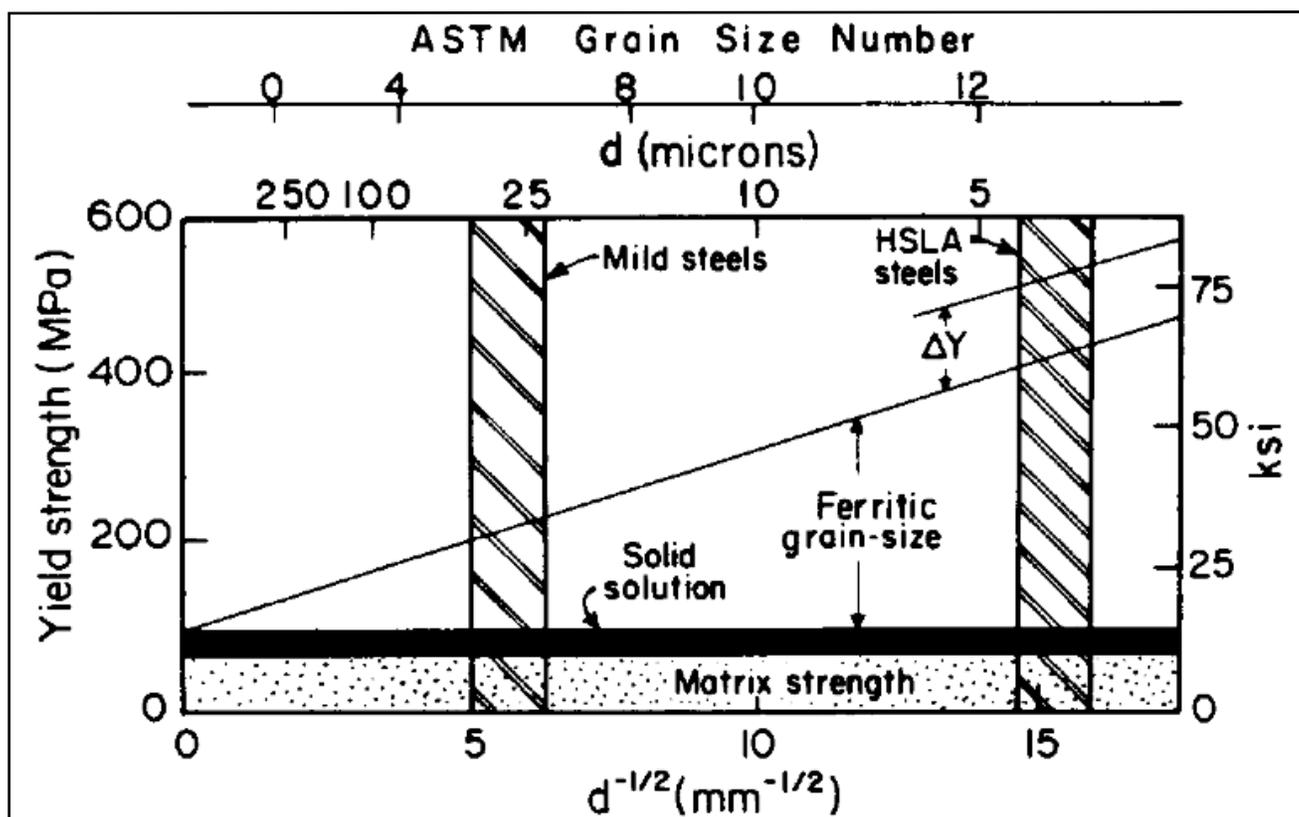
los aumentos son la amplificación de la imagen cuando la observación se hace con un microscopio:

Cantidad de granos por pulgada cuadrada a 100 aumentos =  $2^{N-1}$

O sea, el número  $N$  es mayor cuanto menor es el tamaño de grano. Los tamaños de grano usuales en los aceros van de 1 a 8 y el ideal para los aceros aptos para conformado está entre 6 y 7. Se ve claramente como los principios de metalurgia física van delineando los parámetros en los cuales se encuentran las características de estos aceros, ver Figura 7 (Krauss, 2005).

Deformación en frío.

Ya se ha señalado que durante la deformación en frío aumenta la cantidad de dislocaciones, lo que difi-



**Figura 7.** Contribución de diferentes mecanismos de endurecimiento en la tensión de fluencia de los aceros. Krauss (2005). Yield strength – Tensión de fluencia. ASTM grain size number – Número ASTM de tamaño de grano. Matrix strength – Resistencia de la matriz. Solid solution – Solución sólida. Ferritic grain-size – Tamaño de grano ferrítico. Mild steels – Aceros blandos. HSLA steels – Aceros de alta resistencia y baja aleación.

culta su desplazamiento y así endurece al metal. En forma simultánea, disminuye su capacidad para ser deformado sin romperse. Es lo que se muestra en la Figura 8.

Al mismo tiempo que esto ocurre, en el interior de los granos metálicos, la multiplicación y agrupamiento de las dislocaciones provoca una segmentación en la red cristalina y se generan subgranos, de orientaciones levemente distintas entre vecinos, separados por regiones de

alta concentración de dislocaciones conocidas como "marañas". Es lo que se muestra en la Figura 9 y tiene mucho interés en el estudio de los mecanismos de ablandamiento que se analizarán más adelante.

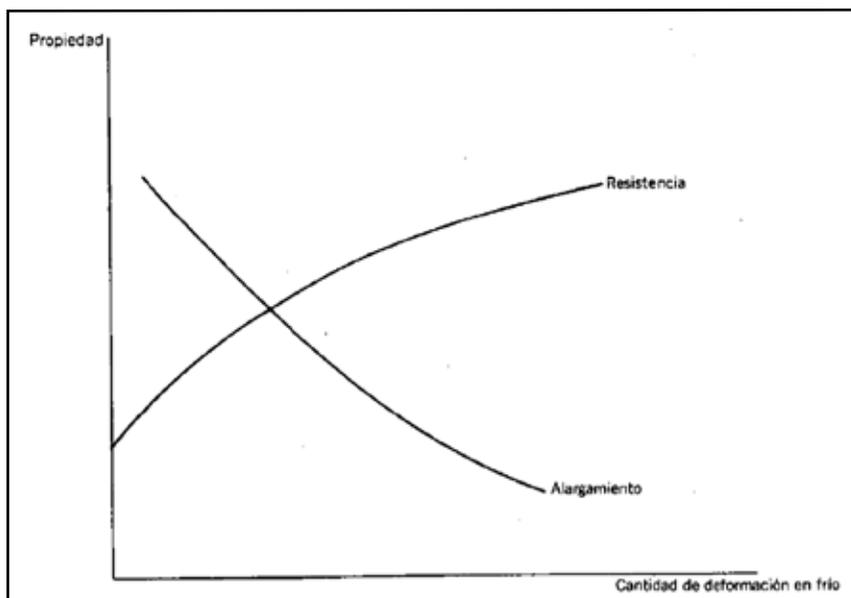
Los metales no aleados son en general relativamente blandos. Los mecanismos de endurecimiento vistos hasta aquí presentan limitaciones en cuanto a la resistencia mecánica posible de alcanzar y como se mencionó en la introducción estaban re-

feridos a la fabricación de productos de la industria automotriz previa a las modernas exigencias de disminución del peso de los vehículos y seguridad de los pasajeros y la de electrodomésticos. En ellos se usan fundamentalmente aceros no aleados. Pero además, el conformado y sus leyes son aplicados en un campo metálico mucho más amplio, no tan voluminoso pero importante y necesario. Los aceros inoxidables tienen cada vez más aplicaciones generales siendo muchas de ellas piezas estampadas. Las aleaciones especiales como las de titanio de la industria aeronáutica también requieren del conformado como proceso de fabricación. Es por ello que se recurre a las aleaciones metálicas, que son aleaciones de metales con otros elementos, pero conservando las características de uniones atómicas propias de los metales.

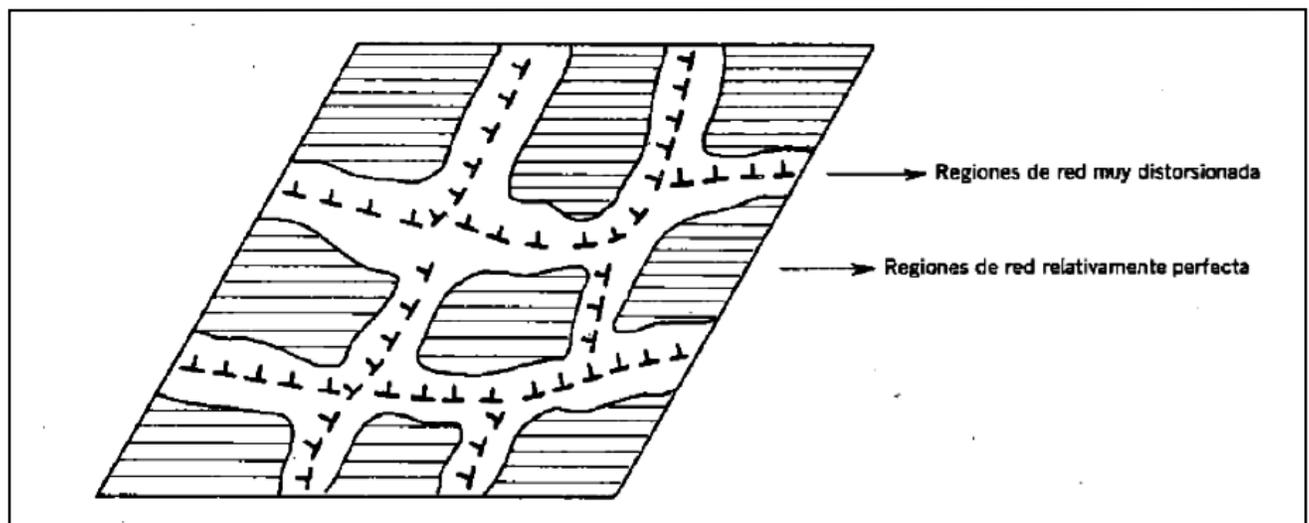
Se pueden distinguir dos grandes grupos de aleaciones metálicas, entre otros:

- Soluciones sólidas
- Aleaciones de dos o más fases

Antes de proseguir, y puesto que ya aparece el término, conviene



**Figura 8.** Comportamiento de los metales en función de la cantidad de deformación en frío. Iurman (1986).



**Figura 9.** Estructura de un metal deformado en frío. Iurman (1986).

aclarar el concepto de *fase*. En Física se entiende por fase a *toda porción, que puede incluir a la totalidad de un sistema, que es físicamente homogénea dentro de sí misma y limitada por una superficie, de tal modo que sea mecánicamente separable de cualquier otra porción* (Askeland, 2004).

### b) Aleaciones por solución sólida.

Es posible introducir átomos diferentes en la red cristalina de un elemento puro. Se habla de *soluciones sólidas* por similitud de lo que ocurre cuando se disuelve un sólido en un líquido. Una solución sólida constituye una fase, puesto que una vez que el átomo *B* está en una red de átomos *A*, ya no es posible metalúrgicamente volver a separarlos y se considera a esa solución como físicamente homogénea.

Los átomos *B* (solutos) pueden entrar en la red de los *A* (solvente) de dos maneras distintas: ocupando lugares de la red correspondientes a los átomos *A* o bien ocupando los intersticios o "huecos" de esa red. En el primer caso se habla de *soluciones sólidas sustitucionales*. En el segundo, se forman lo que se cono-

ce como *soluciones sólidas intersticiales*.

Existen leyes que regulan una situación o la otra, pero en general podemos decir que átomos de soluto mucho más pequeños que los del solvente formarán soluciones sólidas intersticiales (carbono y nitrógeno en los aceros), mientras que los de tamaños similares darán lugar a soluciones sólidas sustitucionales (manganeso, silicio, níquel, cromo, etc.). En la Figura 10 se ilustran en forma esquemática redes cristalinas con solutos intersticiales y sustitucionales.

En general, las soluciones sólidas son más duras (o sea más resistentes) que los metales puros. Si bien el tema es bastante más complejo, en principio esto se explica por el hecho de que los átomos de soluto, tanto sustitucionales como intersticiales, deforman la red cristalina en la que están disueltos. En el caso de los sustitucionales, el lugar que ocupan es o más grande o más pequeño que el del átomo del solvente. En cuanto a los intersticiales, por lo común el intersticio en la red es más pequeño que el radio atómico del soluto. La deformación de la red, en ambos casos, genera tensiones

alrededor del soluto que dificultan el desplazamiento de las dislocaciones, y por lo tanto endurecen al metal. Como es de prever, el endurecimiento será función del tipo de soluto (por los tamaños relativos, entre otras cosas) y de la concentración de soluto. Es lo que muestra en la Figura 11.

Los solutos intersticiales endurecen más que los sustitucionales. Es el caso del carbono y del nitrógeno en los aceros. Además de la razón mencionada, en este caso existe un efecto adicional. Los solutos distorsionan siempre a la red del solvente. Esta distorsión es menor si la red ya está distorsionada. Es lo que ocurre en proximidades de las dislocaciones. Por este motivo y volviendo a los aceros, el carbono y el nitrógeno no aleados presentes en el acero se ubican en cercanías del núcleo de la dislocación, como se muestra en la Figura 12. Y se produce un efecto de "anclaje" de la dislocación que obliga a ejercer un esfuerzo mayor para moverla y deformar al metal. Este posicionamiento de los solutos se conoce como "*atmósferas de Cottrell*" y tiene una gran importancia tecnológica por dar lugar al *envejecimiento por deformación*, que ha sido y es un dolor de cabeza muy

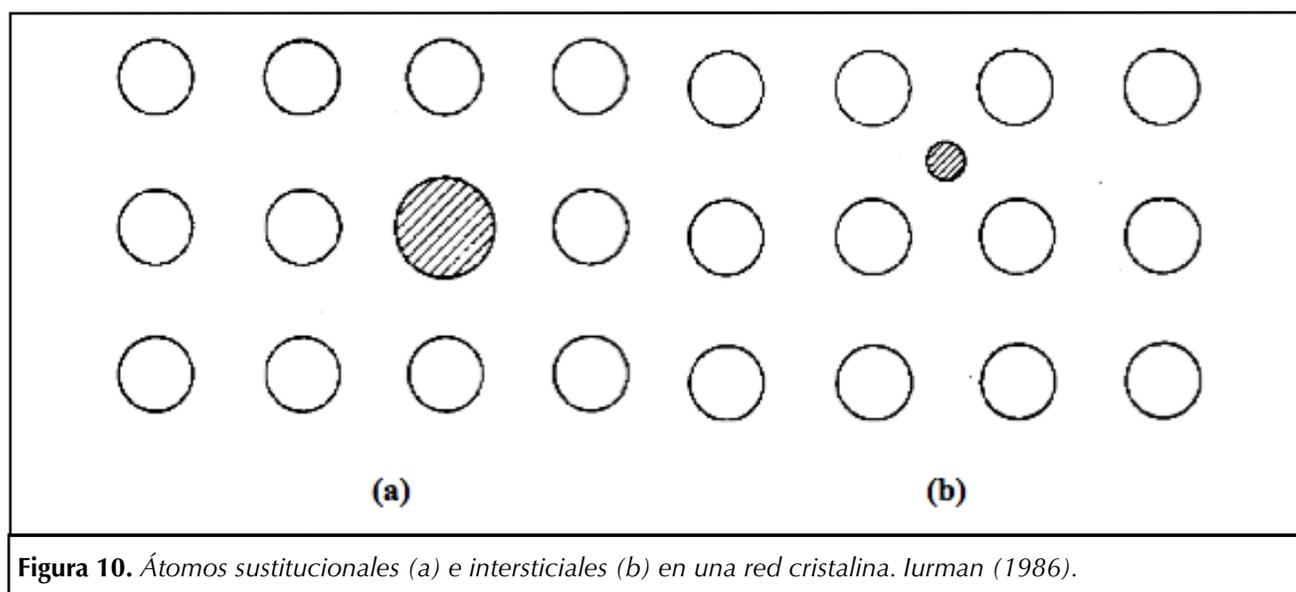


Figura 10. Átomos sustitucionales (a) e intersticiales (b) en una red cristalina. Iurman (1986).

grande para los involucrados en la fabricación y uso de las chapas de acero para conformado. Lo analizaremos más adelante.

b) **Aleaciones con segundas fases.**

Al igual que el azúcar en el café y la sal en el agua, la solubilidad de un elemento en otro está en general limitada en las aleaciones metálicas. El soluto distorsiona la red, esto requiere una cierta energía y en algún momento el sistema opta por formar compuestos entre el metal base y el

elemento aleante. Hablamos de sistemas bi o multifásicos. En el caso de los aceros para conformado, los compuestos más comunes son los carburos, nitruros y carbonitruros. Por semejanza con el ejemplo de la sal y el azúcar, que cuando se sobrepasa la solubilidad van al fondo del recipiente que contiene la solución, se dice que las nuevas fases *precipitan* en el seno de la fase madre.

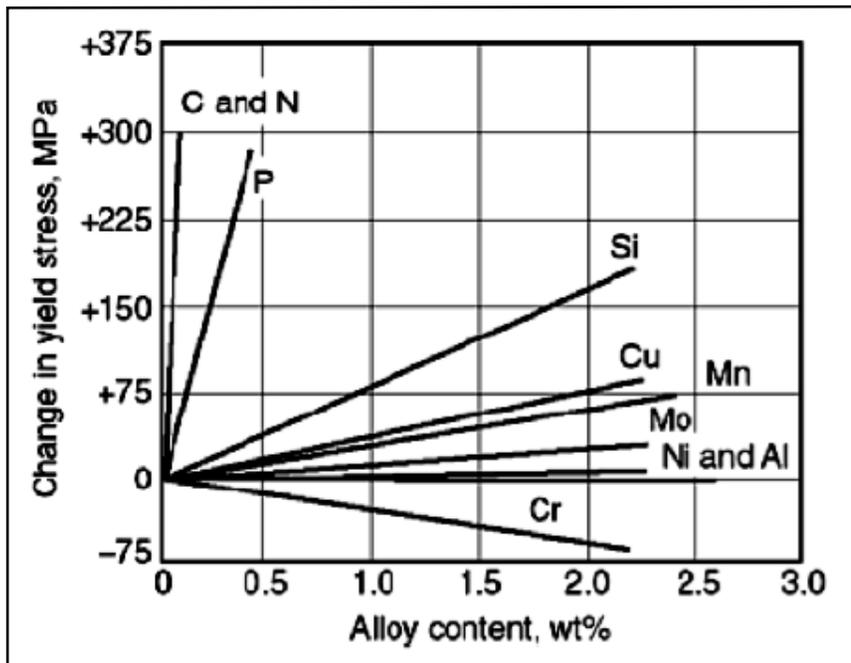
Al igual que los solutos, las segundas fases constituyen obstáculos para el desplazamiento de las dislocaciones y por lo tanto endurecen al metal (Reed-Hill, Abbaschian, 1994). Pero además, las segundas fases pueden formar en el interior de la aleación regiones con propiedades mecánicas diferentes a las originales. Por este motivo, el comportamiento mecánico de una aleación metálica formada por dos o más fases depende de:

- La naturaleza dúctil o frágil y la cantidad de las fases presentes
- La distribución de las mismas
- El tamaño y la forma de las fases

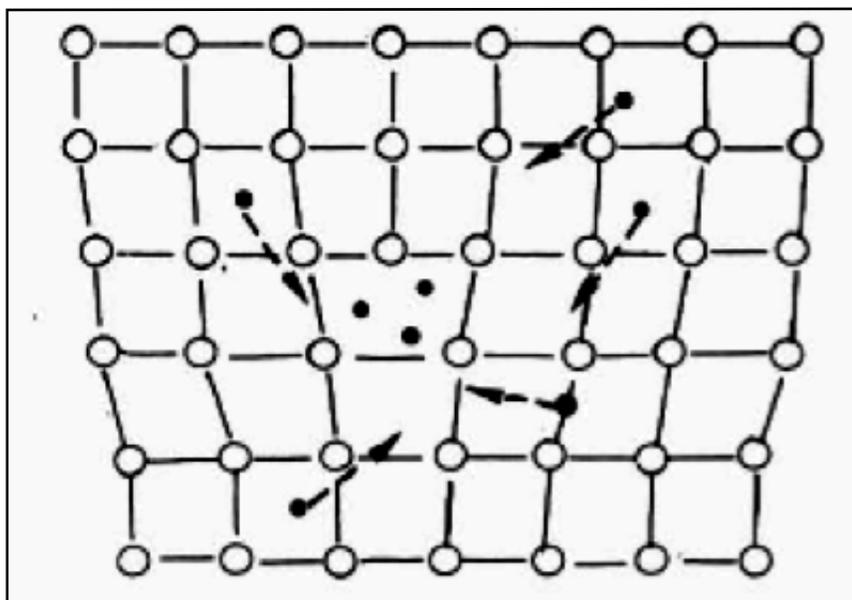
En la Figura 13 se muestran las distintas configuraciones que puede adoptar una aleación bifásica (Sachs, 1954).

Como ejemplo de la influencia de la cantidad y forma de las fases presentes, en la Figura 14 se muestra la resistencia mecánica de un acero que contiene carburos en forma de láminas con diferentes espaciados y/o globulares (Sachs, 1954).

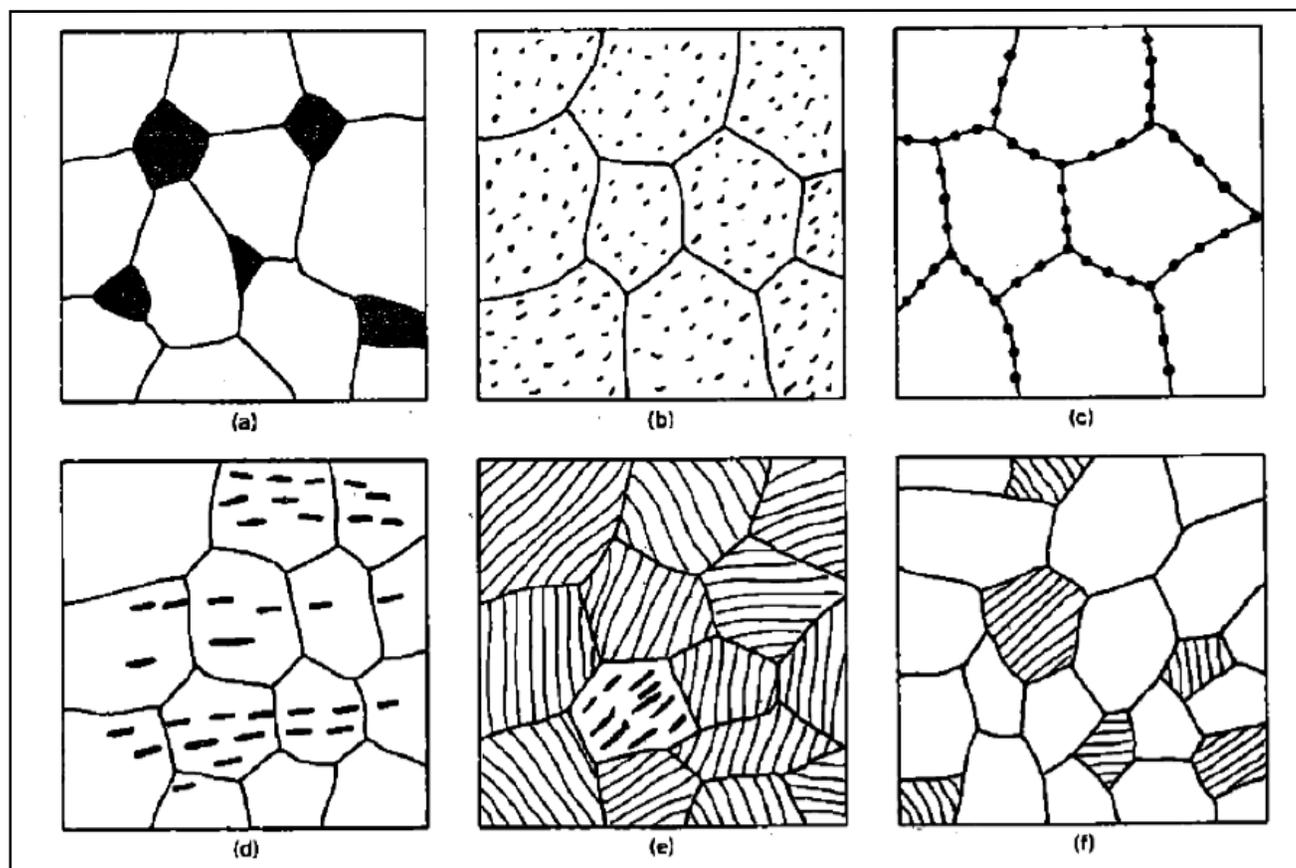
En cuanto a la influencia del tamaño de las partículas de precipitado en la resistencia mecánica de un acero, la Figura 15 ilustra este aspecto. Por esto se suele decir que cuando una partícula de precipitado es visible en el microscopio óptico,



**Figura 11.** Influencia de los elementos en solución sólida sobre los cambios en la tensión de fluencia de los aceros ferríticos de bajo carbono. Bramfitt (1997). Change in yield stress – Cambio en la tensión de fluencia. Alloy content – Contenido de la aleación.



**Figura 12.** Formación de atmósferas de Cottrell. Pero Sanz (2000).



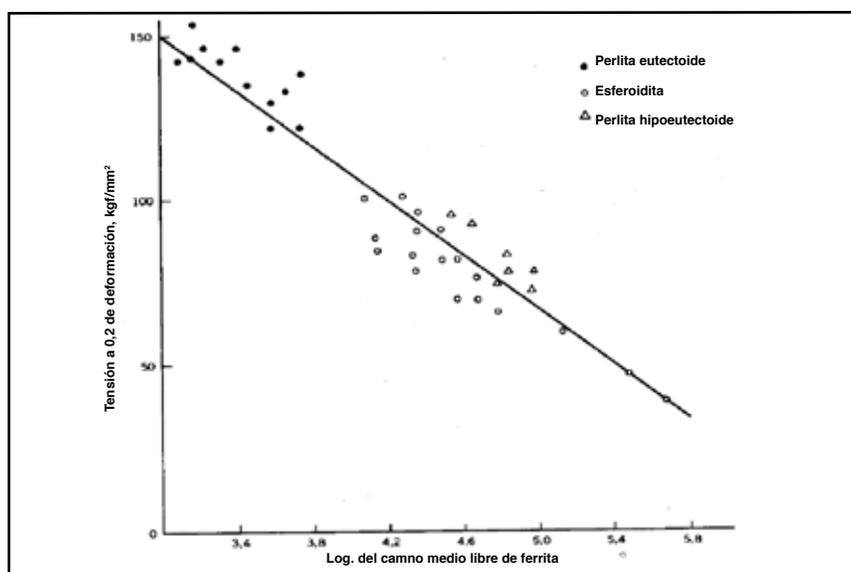
**Figura 13.** Estructuras representativas de aleaciones metálicas bifásicas. Sachs (1954).

- (a) Estructura heterogénea básica: Cristales separados de cada fase
- (b) Segunda fase dispersa en la matriz de la primera
- (c) Segunda fase sobre borde de grano de la primera
- (d) Segunda fase en ristras
- (e) Mezcla de ambas fases en colonias granulares (eutécticos, eutectoides)
- (f) Granos de una fase y colonias de ambas fases

su efecto dista de ser el más efectivo (Ginzburg, 1989).

## ■ 5. FLUENCIA DISCONTINUA Y ENVEJECIMIENTO POR DEFORMACIÓN

En los aceros de bajo carbono utilizados para operaciones de conformado se presenta un fenómeno, conocido como fluencia discontinua, que ha sido y es, un verdadero problema para productores y usuarios de este material, como ya indicáramos en su momento. Se trata de la *fluencia discontinua*, que se produce durante el estirado de una chapa. Como se muestra en la Figura 16, la tensión aumenta en



**Figura 14.** Resistencia a la deformación en función del logaritmo del camino medio de ferrita en aceros con distribución de carburos laminares y del tamaño de los carburos esferoidales. Iurman (1986).

rango elástico hasta un cierto valor, llamado *punto de fluencia superior*, luego cae y oscila alrededor de un valor menor que se conoce como *punto de fluencia inferior*, en el cual tiene lugar una cierta cantidad de deformación, para retomar después la curva normal de endurecimiento (Lurman, 1986). Mientras la carga oscila alrededor del punto de fluencia inferior, en la superficie de la cha-

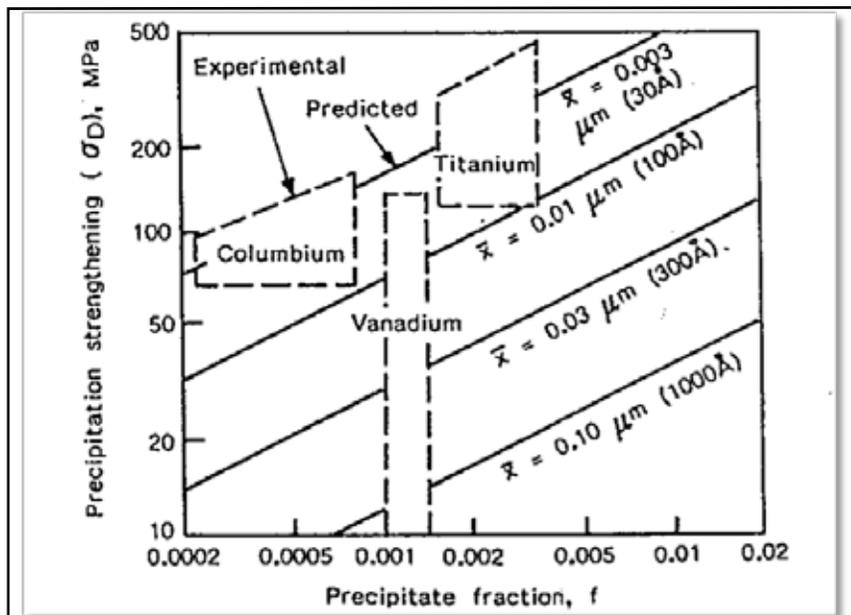
pa aparecen unas bandas, llamadas *bandas de Luders*, que se muestran en la parte izquierda de la figura.

Las bandas de Luders no alteran las características mecánicas de la chapa, pero sí afean su superficie. Son por lo tanto inaceptables si esa superficie estará expuesta en el producto conformado. Se pueden corregir si, previo al estampado del

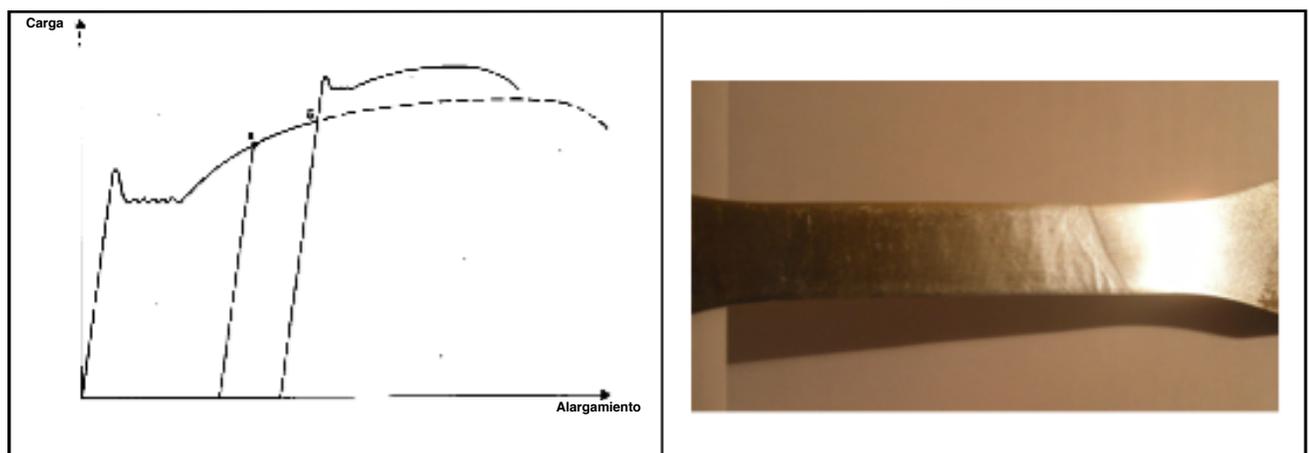
producto final, la chapa es deformada entre rodillos que aplanan esos defectos. El problema es que si pasa un tiempo no demasiado prolongado entre esa operación y el conformado, las bandas vuelven a aparecer. Por este motivo, al fenómeno se lo conoce como "*envejecimiento por deformación*" (*strain aging*). Es lo que se puede ver en la Figura 16. Si se descarga la probeta ensayada y se vuelve a cargar inmediatamente, no aparece la fluencia discontinua en esta recarga. Pero si se descarga y se espera un cierto tiempo (algunos días), el fenómeno reaparece, y las bandas también.

¿A qué se debe este fenómeno y cómo evitarlo? Uno de los primeros logros de la Metalurgia Física fue, justamente, explicarlo y por ende brindar los elementos para resolverlo.

Se ha visto que los solutos, y especialmente los intersticiales, tienen predilección por ubicarse en las proximidades de las dislocaciones y anclarlas. En el caso del acero de bajo carbono, los dos elementos más activos en este sentido son el carbono y el nitrógeno (Rigaut, G., 1996). Los dos se encuentran normalmente disueltos en estos aceros, provenien-



**Figura 15.** Influencia de la fracción y del tamaño de las partículas de precipitado sobre el endurecimiento por precipitación, según el modelo de Ashby-Orowan, comparado con observaciones experimentales para ciertas adiciones de microaleación (*Microalloying '75*). (Ginzburg, 1989).



**Figura 16.** Efecto del envejecimiento por deformación sobre la curva Carga – Alargamiento en el ensayo de tracción de un metal con fluencia discontinua (izquierda); Bandas de Luders en una probeta de acero (derecha). (Lurman, 1986).

tes de su proceso de elaboración. Al anclar las dislocaciones, hacen que sean necesarios esfuerzos mayores para moverlas. Una vez que se ha alcanzado ese esfuerzo mayor y se desbloquean, se pueden mover bajo la acción de esfuerzos menores, y por eso la carga disminuye. Se produce la oscilación de tensiones alrededor de la tensión de fluencia inferior y allí es cuando aparecen las bandas. Cada banda nueva produce una leve disminución de la tensión y poco a poco las bandas cubren toda la superficie de la probeta. A partir de allí, se retoma el endurecimiento sostenido habitual y desaparece el defecto superficial. La explicación de la formación de las bandas es un tanto más compleja, pero está vinculada con lo que acabamos de indicar. La deformación que sigue a la que se produce en el rango de la fluencia discontinua hace que las dislocaciones estén alejadas de los solutos. Pero si se descarga la probeta y se deja un cierto tiempo, los solutos se moverán en el interior de la red cristalina mediante un proceso conocido como *difusión* para volver a ubicarse en cercanías de las dislocaciones y las volverán a anclar. La causa de esta difusión es que con la nueva configuración de proximidad soluto-dislocación, la energía del sistema es menor. En Física, todos los sistemas tienden a evolucionar a niveles de menores energías, siempre que se les dé tiempo y temperatura suficientes para hacerlo. En este caso, el tiempo es de algunos días a temperatura ambiente, o menos a temperaturas mayores. A 100 °C, por ejemplo, con media hora es suficiente para que los solutos vuelvan a anclar a las dislocaciones (Cusminsky y otros, 1973).

Las soluciones para este problema son entonces dos: Se eliminan los solutos o se los combina con al-

gún otro elemento para formar compuestos, a los que les resulte prácticamente imposible difundir a través de la red.

La primera solución apuntó a disminuir el contenido de solutos. Dio lugar a aceros cada vez más bajos en contenido de estos elementos. Esta solución presenta dos problemas: Es muy difícil y costoso obtener aleaciones con elevados grados de pureza. En lo que respecta al carbono, se desarrollaron *aceros de bajo y de ultra bajo carbono*. En el caso del nitrógeno, se necesitan instalaciones especiales en la sección acería para bajar su contenido en el acero. El segundo problema ya se ha mencionado: que los metales puros son relativamente blandos. Por lo tanto, para obtener la necesaria resistencia mecánica en un producto de acero de muy bajo carbono es necesario aumentar el espesor de la chapa, con ello el peso y por ende el consumo de combustible en el caso de vehículos. De todas maneras, hay productos en los que esta solución es válida.

La segunda solución, combinar el soluto con algún otro elemento, se logró, entre otras tecnologías, mediante el aluminio. En alguna parte del proceso de fabricación del acero se desoxida el metal líquido, para que no se produzcan efervescencias durante la solidificación. Se llama *calmado del acero* (*killling* en inglés). Cuando este calmado se lleva a cabo con aluminio, se forma nitruro de aluminio y esto quita parte de ese soluto que actuaría como lo descrito en la fluencia discontinua si estuviera en estado atómico. También se están utilizando otros elementos para formar compuestos con el carbono y con el nitrógeno, entre ellos el titanio.

## ■ 6. PROCESOS DE ABLANDAMIENTO. RECUPERACIÓN. RE-CRISTALIZACIÓN

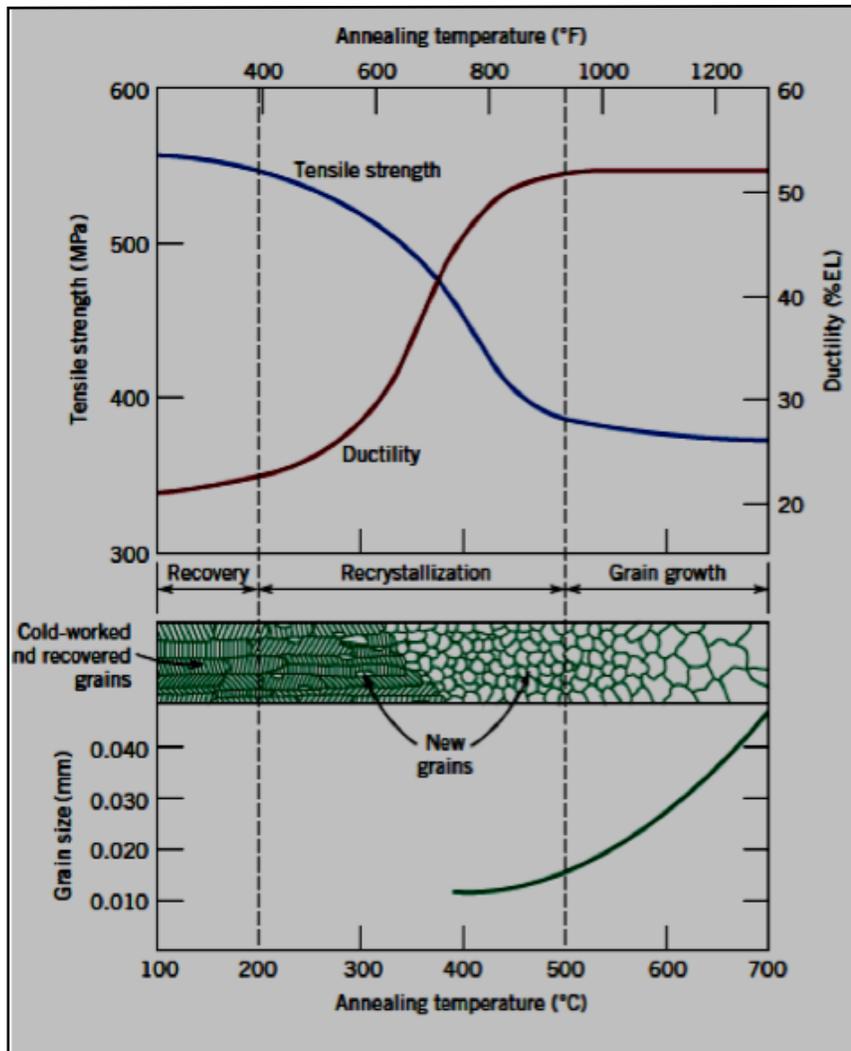
En el Punto anterior hemos señalado que la deformación plástica endurece los metales y los fragiliza. La causa principal es la multiplicación de defectos cristalinos, como son las dislocaciones. Dado que las dislocaciones son defectos térmicamente inestables, su multiplicación aumenta la energía interna del sistema. Para ablandar al metal endurecido por trabajado, se lo somete a un tratamiento térmico conocido como *recocido contra acritud o de recristalización*.

Antes de seguir, es necesario aclarar que existen muchos tratamientos conocidos como de recocido en los aceros. En general, son tratamientos con cambios de fase, en los que mediante un calentamiento se provoca el cambio de la ferrita en austenita. Ésta es luego enfriada en diferentes condiciones y en el recocido esas condiciones hacen que el acero se ablande y recupere total o parcialmente la ductilidad perdida.

El caso del recocido de recristalización es diferente, por cuanto el ablandamiento se consigue sin cambio de fase, o sea sin superar la temperatura de transformación ferrita-austenita.

En la Figura 17 se muestra lo que ocurre con ciertas propiedades y con la estructura de un metal deformado en frío cuando el mismo es calentado a temperaturas crecientes por debajo de la crítica de transformación ferrita-austenita (Callister Jr., 1984).

El metal deformado tiene una alta resistencia mecánica, poca ductilidad, elevada energía interna y una



**Figura 17.** Fenómenos que se producen al calentar un metal deformado en frío. Callister (1994). Annealing temperature - Temperatura de recocido. Tensile Strength - Resistencia a la tracción. Ductility (% El) - Ductilidad (% Alargamiento). Recovery - Recuperación. Recrystallization - Recristalización. Grain growth - Crecimiento de grano. Cold worked and recovered grains - Granos deformados en frío y recuperados. New grains - Granos nuevos. Grain size - Tamaño de grano.

estructura de granos alargados en la dirección de la deformación previa. En el calentamiento de ese metal, se distinguen tres etapas: *Recuperación* - *Recristalización* - *Crecimiento de grano*. Analizaremos brevemente lo que ocurre en cada una.

#### a) Recuperación.

El nombre de *recuperación* de esta etapa se debe a que, al calentar el metal, algunas propiedades, tales como la resistencia eléctrica y la

corrosividad, recuperan sus valores originales. Ni la resistencia mecánica ni la ductilidad se alteran sensiblemente. Mediciones de energía interna indican que la misma disminuye. La microestructura de granos alargados no sufre modificaciones de forma.

¿Qué ha pasado? Las redes cristalinas, además de defectos como las dislocaciones ya vistas, presentan otros, entre ellos las *vacancias*, que son sitios de la red no ocupados por

átomos. Se demuestra en Metalurgia Física que las vacancias son defectos que están en equilibrio termodinámico y que aumentan en cantidad con la temperatura. La presencia de vacancias permite que la dislocación se mueva de un plano a otro mediante un movimiento no conservativo conocido como *trepado*. Al cambiar de plano, una dislocación se puede combinar con otra de signo opuesto. Se distinguen dislocaciones de signo opuesto cuando el plano extra (Ver Figura 5) de una está en la parte superior y el de la otra, en la inferior. Al combinarse, se anulan los dos defectos puesto que ahora la red está completa. Por esa razón se atraen dislocaciones de signos distintos. Pues bien, al anularse de este modo una cantidad considerable de dislocaciones (Figura 18), los planos deformados recuperan parte de su configuración (Lurman, 1986). Un análisis con microscopía óptica no detecta cambios importantes en la microestructura, que sigue siendo de granos alargados.

#### b) Recristalización.

A temperaturas más elevadas se produce un fenómeno diferente. La resistencia mecánica baja con temperaturas crecientes y la ductilidad aumenta. Al mismo tiempo, si se observa la microestructura se nota la aparición de granos nuevos, aproximadamente equiaxiales, que tienen un aspecto más "limpio" desde el punto de vista metalográfico. Esto se debe a que tienen muchas menos dislocaciones y se restauraron las propiedades mecánicas previas a la deformación en frío. Este fenómeno se denominó *recristalización*, porque se creía que la deformación plástica había deteriorado tanto los cristales metálicos que los mismos ya no se podían definir como cristales ordenados. Con temperaturas crecientes, la *recristalización* se va completando hasta que todos los

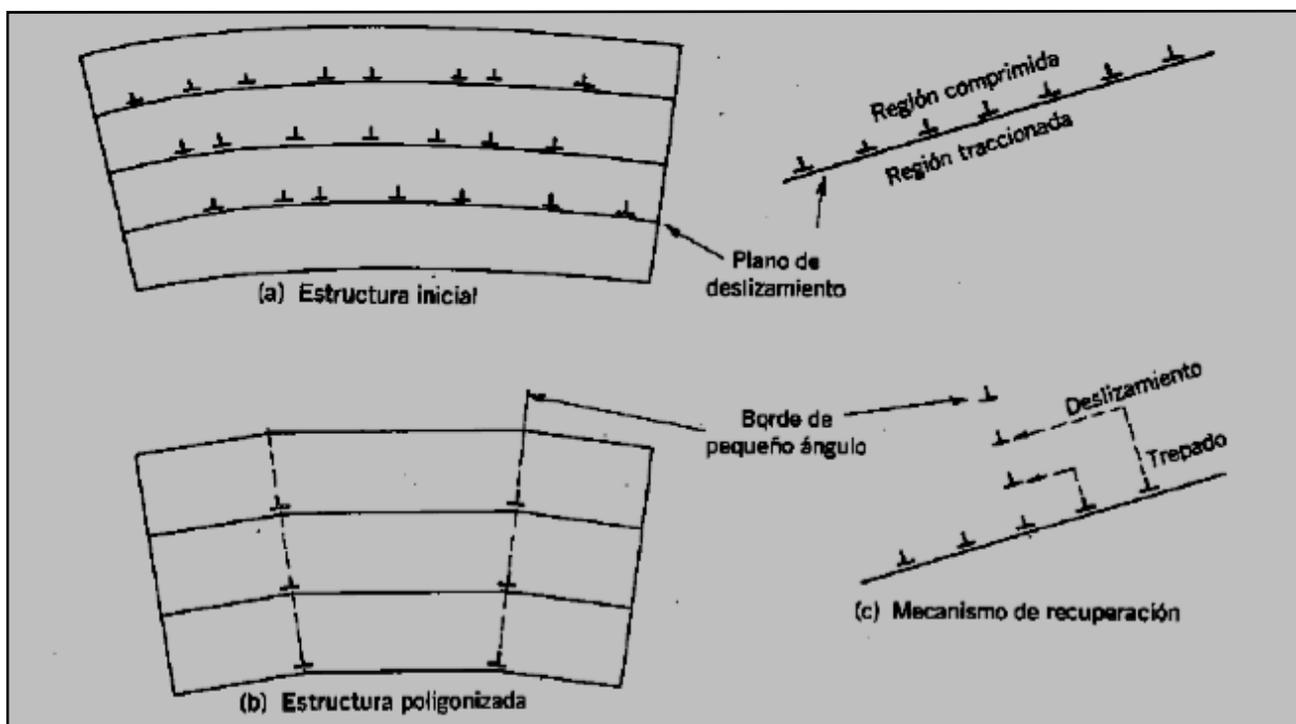


Figura 18. Recuperación y poligonización. Iurman (1986).

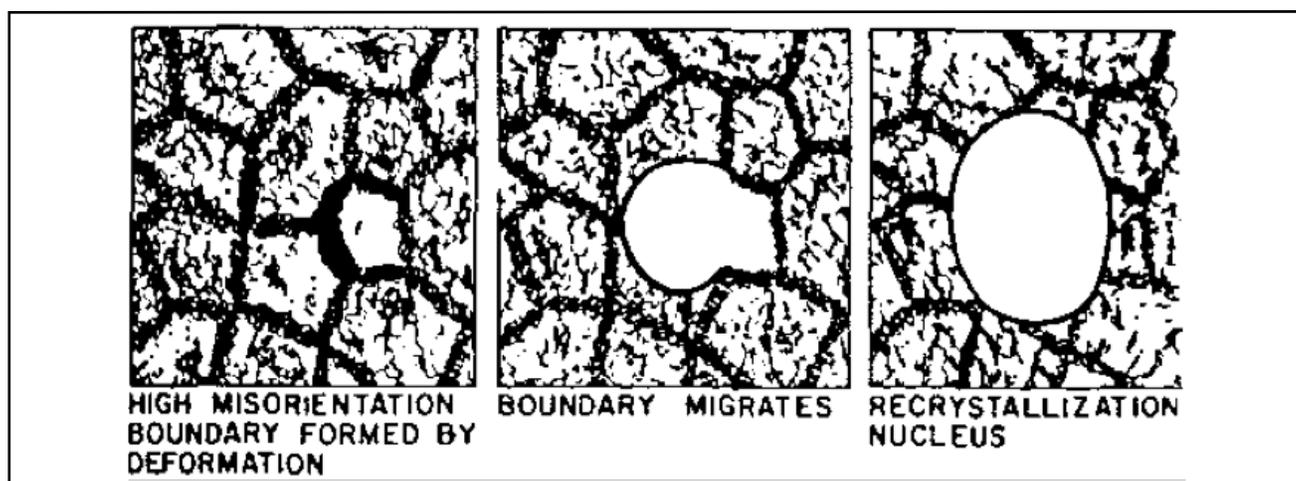


Figura 19. Mecanismo de recristalización. Jonas (1976). High misorientation boundary formed by deformation – Borde de gran diferencia de orientación formado por la deformación. Boundary migrates – El borde migra. Recrystallization nucleus – Núcleo de recristalización.

granos son nuevos. El mecanismo que opera durante la recristalización es el siguiente. Habíamos visto que durante la deformación plástica el interior de los granos se va fragmentando entre zonas de muy alta concentración de dislocaciones, que llamamos "marañas", y otras más "limpias" que dan lugar a los subgranos. Si alguna de estas zonas más limpias tiene un límite con la

adyacente plena de defectos y ese límite se puede desplazar sobre esta última, dará lugar a una región con mucha menos energía. Esta región se convierte en un embrión o núcleo del nuevo grano recristalizado (Jonas y otro, 1976). La diferencia con la recuperación es que ya no se aniquilan las dislocaciones una a una. El barrido es total y tiene como efecto producir una estructura com-

pletamente nueva (Figura 19). Se trata de un fenómeno de los que en Metalurgia Física se denominan térmicamente activados porque dependen de la temperatura y del tiempo.

Los parámetros que intervienen en la recristalización, y que es conveniente conocer para poder controlarlos, son:

- Cantidad de deformación en frío previa
- Composición química
- Temperatura
- Tiempo

#### Cantidad de deformación en frío previa.

La fuerza impulsora para que se produzca la recristalización es la energía interna proveniente de la deformación plástica sufrida por el metal. Cuanta más energía interna almacenada exista en el seno de los cristales deformados, más fácilmente se producirá la recristalización.

#### Composición química.

Los metales puros recristalizan a temperaturas más bajas que los aleados. Esto se debe a que la recristalización tiene lugar por desplazamiento de bordes de granos. Tanto los solutos como los compuestos precipitados tienen preferencia por alojarse en proximidades de los bordes de granos, dificultando así su movimiento.

#### Temperatura.

Al ser la recristalización un fenómeno térmicamente activado, a mayor temperatura será más fácil tanto la nucleación como el crecimiento de los nuevos granos.

#### Tiempo.

Todos los fenómenos que involucran difusión, como la recristalización, requieren un cierto tiempo para iniciar y para completarse. El tiempo necesario para iniciar su aparición se conoce como *tiempo de incubación*.

#### Temperatura de recristalización.

Puesto que existen tantos parámetros que intervienen en este fenómeno, resulta difícil definir una temperatura de recristalización. Se ha elegido la siguiente:

Se define como temperatura de recristalización a aquella en la cual un metal severamente deformado en frío recristaliza en una hora.

Cabe aclarar que de las dos variables mencionadas, temperatura y tiempo, la primera es mucho más importante que la segunda. En efecto, aumentar la temperatura en diez grados centígrados equivale a disminuir a la mitad el tiempo necesario para completar la recristalización, a igualdad de los otros parámetros.

En general, la temperatura de recristalización de los metales está en el orden de la mitad de su temperatura de fusión, expresadas ambas en grados absolutos. Esto hace que en los aceros esta temperatura esté ubicada alrededor de los 600 – 650 °C. Por esto se habla de un *tratamiento subcrítico*, o sea se produce sin cambio de fase de ferrita a austenita.

En la fabricación de aceros para conformado, esto da lugar a que, luego de la etapa de laminación en frío, se proceda a un recocido del material en atmósfera protectora para evitar su oxidación, en hornos llamados *de campana*, a temperaturas comprendidas entre 600 y 700 °C.

### **7. ORIENTACIONES PREFERIDAS O TEXTURAS CRISTALOGRAFICAS**

En el Punto 3 se ha indicado que los metales deforman plásticamente por deslizamiento de unos planos sobre otros. De aquí resulta inmediatamente que será más fácil que deslicen los planos que están más aleja-

dos entre sí. Suelen ser los más compactos en una estructura cristalina. Falta decir que, además, estos planos deslizan preferentemente según determinadas direcciones, también las más compactas. La existencia de planos y direcciones preferenciales de deslizamiento indica que la deformación plástica no es isotrópica, o sea no se produce del mismo modo en todas las direcciones del cuerpo. Para acomodar la deformación que se va produciendo, sin que se produzcan discontinuidades en la pieza, se demuestra que ciertos planos y direcciones cristalinas deben rotar y orientarse en algunas direcciones especiales, llamadas *orientaciones preferidas*.

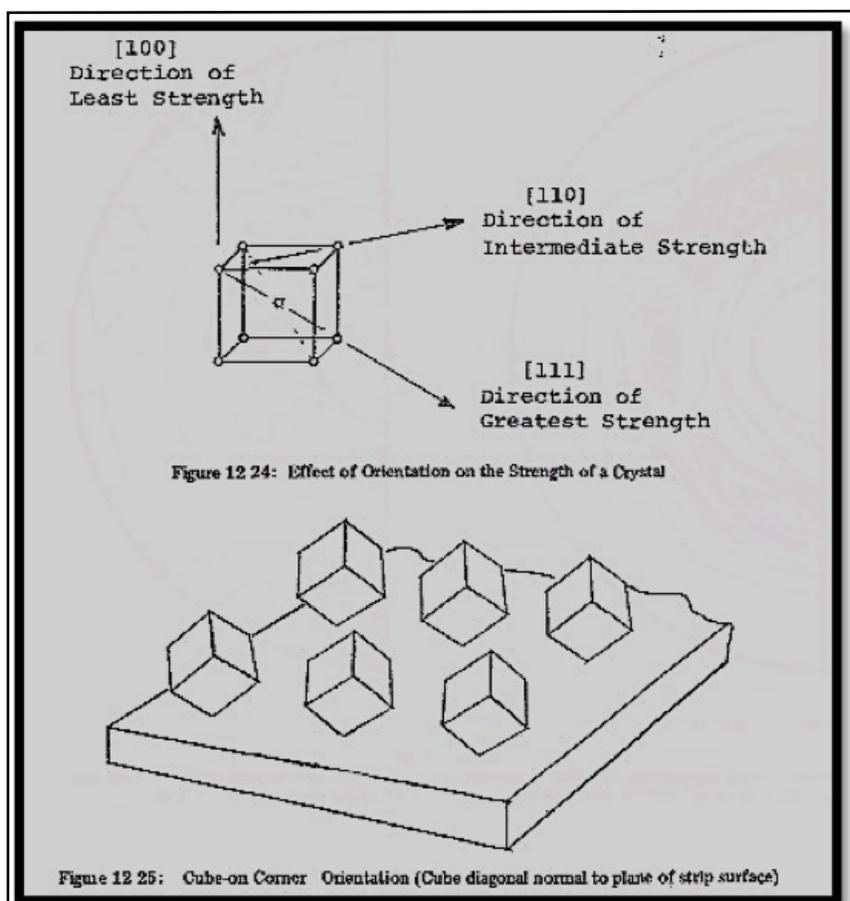
Se identifican las orientaciones preferidas, que dan lugar a lo que se conoce como *textura*, a aquellas direcciones en las cuales es posible encontrar una densidad de determinados planos y/o direcciones cristalográficas mayor a la que correspondería a una distribución al azar. Las orientaciones preferidas hacen que el metal se deforme más fácilmente en determinadas direcciones que en otras, o sea, que sus propiedades mecánicas no sean isotrópicas, como se postula en un primer análisis simplificado de la Mecánica del Continuo (Figura 20).

Es ahora el momento para explicar la aparición y la importancia del *factor de anisotropía R* o *parámetro de Lankford*, mencionado al principio de este trabajo y que constituyó un avance importante en el desarrollo de la producción y uso de los aceros para estampado.

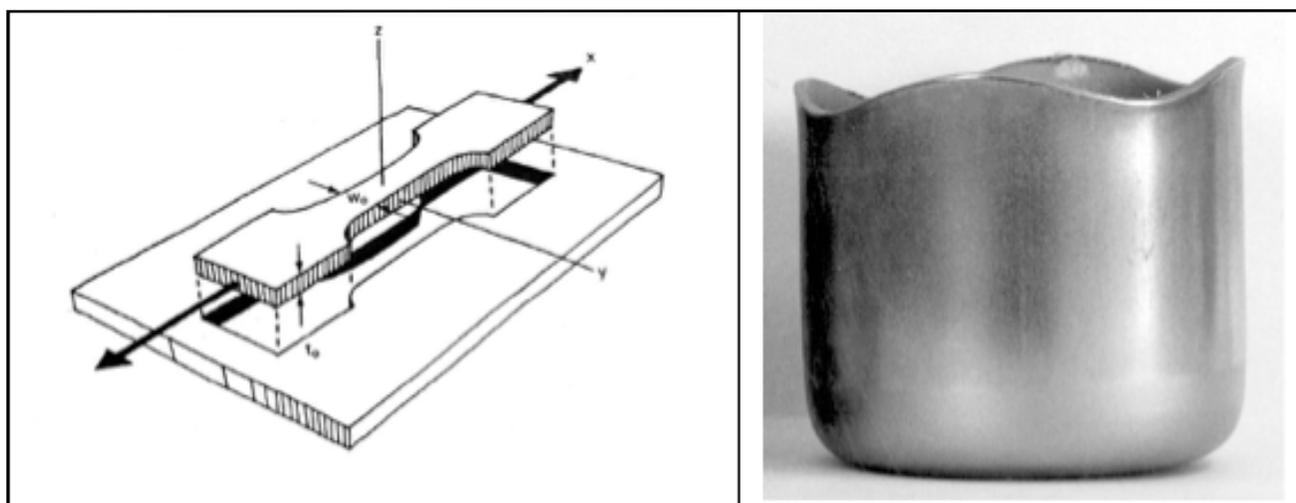
En un ensayo de tracción de una tira metálica, la tensión es uniaxial (hasta la estricción). Tomemos ésa como la dirección longitudinal. En las dos direcciones, transversal y según el espesor, los esfuerzos aplicados son nulos. A pesar de ello, en

esas dos direcciones sí habrá deformación. Y dado que en las direcciones transversal y en el espesor los estados de tensiones son iguales (cero), en un material isótropo las deformaciones también deberán ser iguales. Si no lo son, es porque el material *no es isótropo*. Es lo que se indica con el factor  $R$  (Hosford, 1993). Durante el ensayo (esto está normalizado), se miden las deformaciones en ancho y en espesor de la probeta y se relacionan entre sí:  $R = \text{deformación en ancho} / \text{deformación en espesor}$ . Cuanto mayor es el valor de  $R$ , más difícil será que el espesor de la chapa disminuya para una deformación en ancho dada. Es justamente lo que se necesita para que en el embutido profundo la pared del recipiente que se va formando no adelgace y rompa (Figura 21). Por eso, un buen acero para embutido profundo será aquél que tenga un alto valor de  $R$ . El acero de embutido extra profundo EDD tiene un valor de  $R = 1,7 - 2$ .

Lo anterior da una pista para fabricar chapas de acero aptas para el embutido profundo. En estas chapas, la aparición de una determinada textura está influenciada por la deformación del metal y por su composición química. Las etapas del proceso de fabricación de chapas de



**Figura 20.** Efecto de la dirección cristalográfica sobre la resistencia de un cristal y ejemplo de una orientación preferida en una chapa metálica. Zurlani (1988). Direction of Least strength – Dirección de resistencia mínima. Direction of Intermediate Strength – Dirección de resistencia intermedia. Direction of Greatest Strength – Dirección de resistencia máxima. Effect of Orientation on the Strength of a Crystal – Efecto de la orientación sobre la resistencia de un cristal. Cube on Corner orientation (Cube diagonal normal to plane of strip surface) – Orientación cubo de canto (Diagonal del cubo normal al plano de la superficie de la chapa).



**Figura 21.** Probeta usada en la determinación del parámetro de anisotropía  $R$  (izquierda); Copa embutida en el ensayo Swift (Laboratorio de Metalurgia UNS). Izquierda, (Hosford 1993).

acero comprenden básicamente:

### Fusión y colada – laminación en caliente – laminación en frío – recocido

Se ha encontrado que si en el recocido de la chapa laminada en frío, el nitrato de aluminio, un compuesto formado por el nitrógeno presente en el acero en su estado líquido y por el aluminio que se le agrega para mejorar sus propiedades mecánicas, precipita durante el recocido del metal deformado antes o por lo menos en forma simultánea con la recrystalización, el acero resultante tendrá una textura favorable. Todo el proceso de fabricación de la chapa, entonces, desde este punto de vista, debe estar orientado a este fin. Se empieza por desoxidar el acero fundido con suficiente cantidad de aluminio, que debe mantenerse en solución sólida durante todo el proceso hasta precipitar en la etapa de recocido. Ha sido éste un logro importante de la Metalurgia Física en la fabricación de chapas de acero con buena conformabilidad. Los procesos de fabricación más modernos han incorporado otros parámetros,

como se analizará más adelante.

### ■ 8. ASPECTOS MODERNOS DE LA FABRICACIÓN Y USO DE LAS CHAPAS DE ACERO PARA CONFORMADO

En los últimos cuarenta años han surgido aspectos nuevos en el campo de los aceros para conformado.

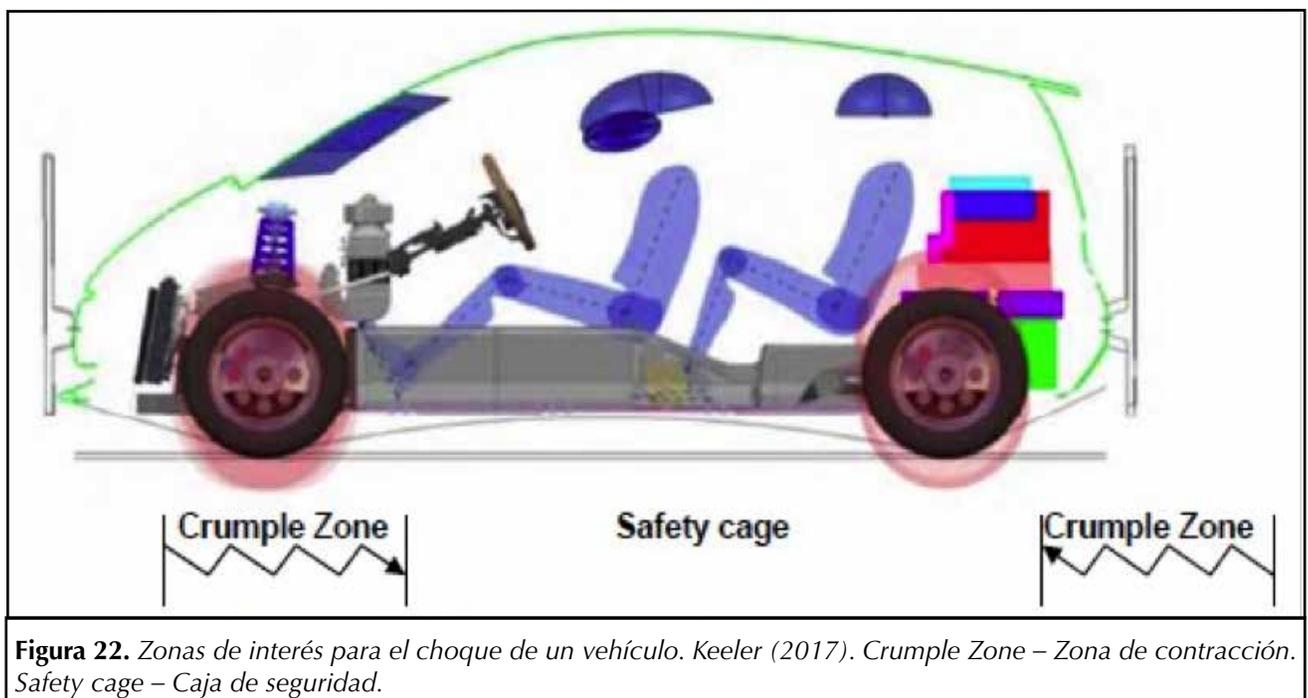
En primer lugar, la economía de producción ha impuesto un cambio en el proceso de fabricación de estas chapas. El más significativo ha sido el recocido continuo. El tratamiento en hornos de campana, como se ha descrito anteriormente, es un proceso muy lento, de poca productividad. Se necesitan varios días para recocer las grandes bobinas laminadas en frío, que pueden pesar hasta diez toneladas. En el recocido continuo, en cambio, la chapa pasa por el proceso a velocidades del orden de los metros por segundo.

En el Punto referente a la recrystalización, se ha visto que el fenómeno depende de la temperatura y del tiempo. Para hacerlo tan rápido, fue necesario aumentar la tempe-

ratura, por encima de la crítica de transformación de la ferrita. Ya no hay tiempo entonces, entre otras cosas, de hacer precipitar al nitrato de aluminio para obtener una buena textura. Además, si ese nitrato precipita después del recocido, induce un envejecimiento por deformación (*strain aging*) y fluencia discontinua, con todo lo que esto conlleva y que ha sido analizado.

De ahí que al principio los aceros de recocido continuo se consideraran como de segunda calidad. Investigaciones en el campo de la Metalurgia Física lograron mejorar este aspecto, y los conocimientos adquiridos fueron incorporados en las plantas siderúrgicas a través de instalaciones de alta complejidad tecnológica y por consiguiente muy costosas, que sólo se justifican para fabricar aceros de calidad en grandes volúmenes.

En segundo lugar, la crisis energética, las regulaciones referentes a las emisiones gaseosas de los vehículos y las concernientes a la seguridad de los pasajeros, han cambiado la concepción del diseño de los ve-



**Figura 22.** Zonas de interés para el choque de un vehículo. Keeler (2017). Crumple Zone – Zona de contracción. Safety cage – Caja de seguridad.

hículos, Figura 22 (Demeri, 2013). El acento ya no está puesto sólo en la conformabilidad de la chapa. Ahora se exige resistencia mecánica para disminuir el peso y tenacidad para absorber impactos como los que se producen en un choque (Keeler, 2017).

### ■ 9. AVANCES DE LA METALURGIA FÍSICA QUE CONDUJERON AL DESARROLLO DE LOS ACEROS MODERNOS PARA ESTAMPADO

Se pasará reseña a los conceptos fundamentales que posibilitaron el desarrollo de diferentes tipos de aceros de alta resistencia y condiciones mejoradas de ductilidad y tenacidad. Se recuerda que lamentablemente los metales en general pierden ductilidad cuanto más alta es su resistencia mecánica.

#### a) Transformaciones de fase fuera de equilibrio en los aceros.

El conocimiento de las fases de equilibrio presentes en los aceros es muy familiar para quienes se interesan en la fabricación y/o uso de

los aceros (Chiaverini, 1985). El gran desarrollo de los últimos tiempos en el campo de los aceros para conformado fue, por el contrario, aplicar los conocimientos de las transformaciones y fases en condiciones de no-equilibrio que permiten obtener mejores piezas finales. Se revisarán brevemente en lo que sigue.

#### b) Curvas de precipitación de fases en el enfriamiento de la austenita.

Antes de analizar lo que ocurre cuando se enfría la austenita en condiciones de no equilibrio, es conveniente distinguir dos tipos de transformaciones conocidas en metalurgia:

- Transformaciones de fase con difusión atómica
- Transformaciones sin difusión

Las primeras son térmicamente activadas, y por lo tanto dependen de la temperatura y del tiempo, mientras que las segundas son función de la temperatura, pero se pro-

ducen en forma instantánea.

En las primeras, las transformaciones de una fase en otra se producen con una cierta inercia.

Es lo mismo que si enfriamos rápidamente un recipiente con agua por debajo de cero grados centígrados. El hielo tarda en aparecer. Hay una *inercia a la transformación*. De la misma forma, manteniendo el acero, inicialmente en fase austenita, a la temperatura a la que se enfría, con el tiempo empieza a producirse la transformación de la austenita, que va desapareciendo. El tiempo que tarda en comenzar la transformación depende de la temperatura y puede graficarse en un diagrama temperatura-tiempo. También puede graficarse para cada temperatura, el tiempo que transcurre hasta que finaliza la transformación y no queda más austenita (todo es hielo, no queda más agua en el símil del comportamiento del agua que usamos para facilitar la comprensión del fenómeno). Las curvas obtenidas se conocen como *Curvas de precipitación* o, por su forma, *Curvas C*.

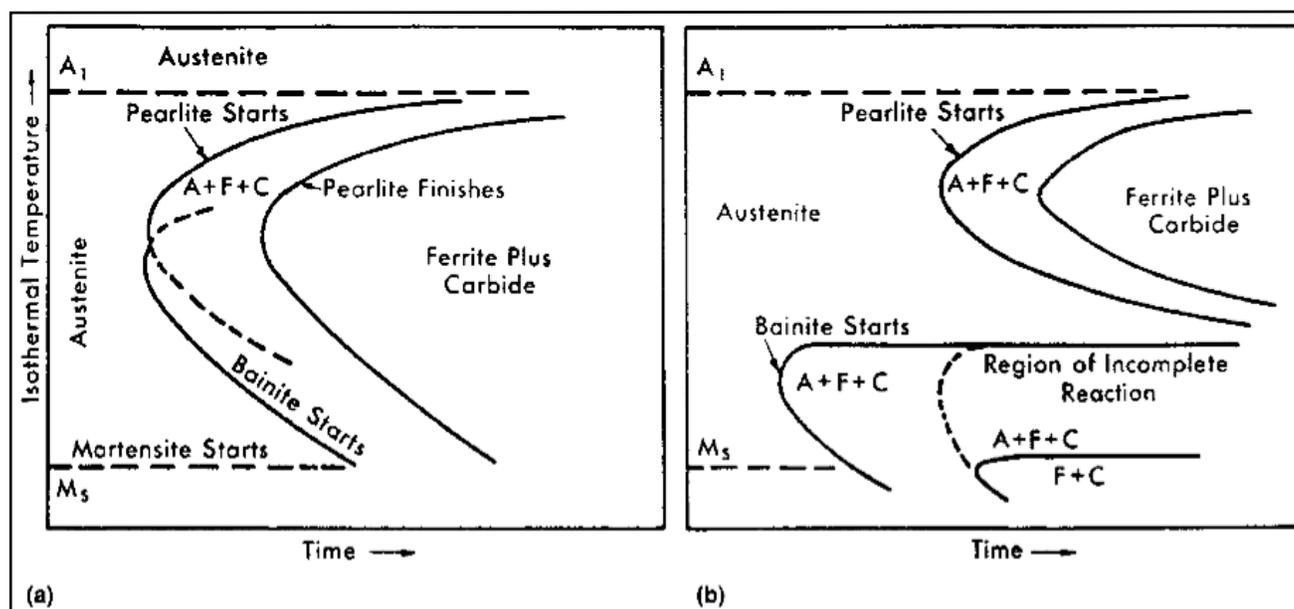


Figura 23. Curvas de transformación de la austenita. Krauss (2005). Isothermal temperature – Temperatura isotérmica. Time – Tiempo. Start – Comienzo. Finishes – Termina. Region of Incomplete Reaction – Región de reacción incompleta.

Entre ambas curvas coexisten la fase inicial y las fases finales. Estas curvas son características de todas las transformaciones de fase térmicamente activadas. Figura 23.

Las formación de las nuevas fases en estas transformaciones tienen dos etapas: *Nucleación y crecimiento* (Valencia Giraldo, 1998), y esas dos etapas son las responsables de esa forma C de la curva de transformación.

El fenómeno es complejo, pero a modo de resumen, se puede decir que a medida que las transformaciones se producen a menores temperaturas, dan lugar a estructuras más finas y más resistentes. Además, según las condiciones del tratamiento, la austenita se puede transformar en lo que se conoce como *perlita* (Ver Glosario) *estructura laminar de ferrita y carburo de hierro* o en una estructura diferente de agujas de carburo de hierro, la *bainita* (Ver Glosario). Los elementos aleantes en los aceros desplazan de diferente modo hacia tiempos más prolongados tanto las transformaciones perlíticas como las bainíticas. Es por lo tanto posible,

mediante una adecuada selección de la composición química del acero, obtener un tipo de estructura u otro. Es lo que se muestra en la parte derecha de la Figura 23.

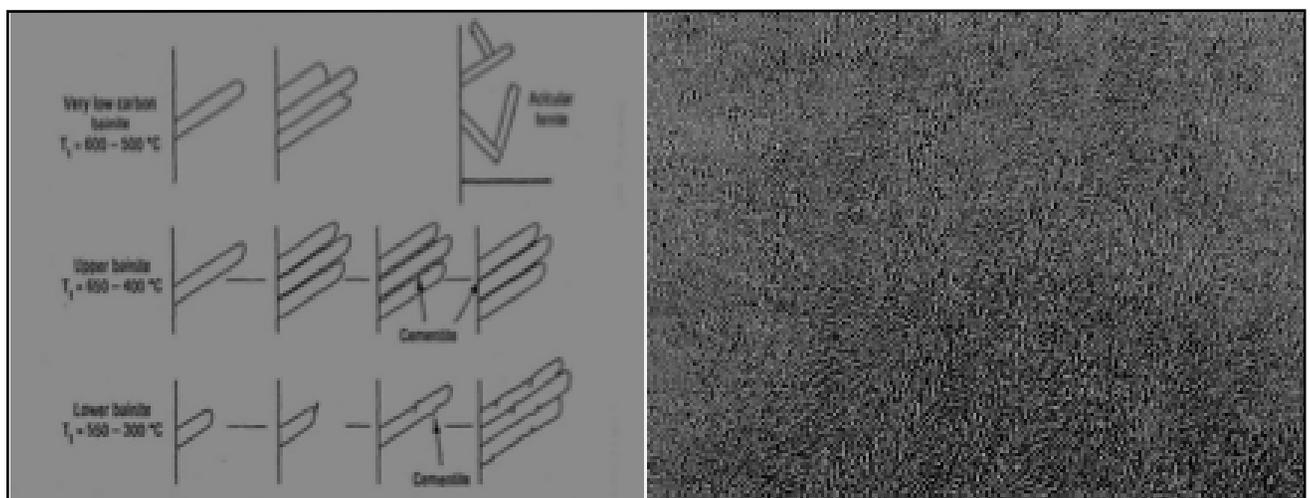
La *bainita* es más resistente que la *perlita* y una de sus variedades, la *bainita inferior*, es más tenaz. La *perlita* está formada por láminas paralelas de *ferrita* (blanda) y *cementita* (carburo de hierro, duro y frágil). Las láminas de carburo frenan la posible deformación de la ferrita. La *bainita*, sobre todo la inferior, tiene en su estructura agujas muy finas de carburo, entre las cuales la ferrita puede eventualmente moverse. Es, entonces, si bien más dura, más tenaz (Figura 24) (Mc Gannon, 1964).

La otra transformación, esta vez sin difusión, que se puede producir al enfriar la austenita, es la *martensítica*. En la Figura 23 esta transformación está indicada por las líneas horizontales  $M_s$ , que indican el comienzo del proceso. La *martensita* es un constituyente duro y muy frágil en que se transforma la austenita mediante un enfriamiento muy rápido. Es lo que se conoce como *tem-*

*ple*. Su dureza depende del contenido de carbono del acero. El temple puede ser total, o sea con 100% de *martensita*, o parcial, en cuyo caso la microestructura del acero contiene *ferrita*, *perlita* o *bainita*, y *martensita*. Las propiedades mecánicas en este último caso, dependerán de las proporciones relativas de las fases presentes y de su distribución en la microestructura. Se hace uso de esta circunstancia para obtener aceros con diferentes grados de resistencia mecánica y ductilidad.

### c) Recocido intercrítico.

Cuando se calienta el acero a temperaturas comprendidas entre las comúnmente llamadas  $A_1$  y  $A_3$ , ( $A_1$ : depende de la composición del acero; va desde  $912^\circ\text{C}$  a  $723^\circ\text{C}$ ;  $A_3$ :  $723^\circ\text{C}$ ) se habla de *recocido intercrítico* (Figura 25). En cualquiera de esas temperaturas se tienen coexistiendo dos fases, austenita y ferrita. Si se enfría rápidamente el acero desde alguna de esas temperaturas, la ferrita no se modificará, y sí lo hará la austenita. Esto quiere decir que se puede tener, en el acero resultante:



**Figura 24.** Esquemas de tipos de bainitas (izquierda); Estructura metalográfica de una bainita inferior (derecha). (Thomas y otro, 1996, Izquierda – Mc Gannon, 1964, Derecha). Very low carbon bainite – Bainita de muy bajo carbono. Acicular ferrite – Ferrita acicular, en forma de agujas muy pequeñas. Upper bainite – Bainita superior. Las láminas de carburo (cementite) están ubicadas entre las agujas de ferrita. Lower bainite – Bainita inferior. Las láminas de carburo están ubicadas en el interior de las agujas de ferrita.

- Proporciones variables de ferrita
- Productos diferentes de la transformación de la austenita

Lo anterior constituye la base del uso del *recocido intercrítico* y la posibilidad de obtener aceros de muy diferentes propiedades mecánicas, como se analizará. Desde el punto de vista de la Metalurgia Física, los conceptos vertidos hasta aquí eran conocidos. Fue necesario un enorme esfuerzo tecnológico para hacerlos una realidad productiva.

### ■ 10. TRATAMIENTOS TERMO-MECÁNICOS

En el Punto 6, al analizar los fenómenos de ablandamiento de los metales, específicamente la recuperación y la recrystalización, hemos visto que se trata de procesos térmicamente activados, o sea que dependen de la temperatura y del tiempo. En el caso específico de la recrystalización, indicamos que aumentar en 10 °C la temperatura implica disminuir a la mitad el tiempo necesario para completar el proceso. Esto quiere decir que, a temperaturas elevadas, la recrystalización se producirá prácticamente en forma inmediatamente posterior a la deformación. La consecuencia de este hecho es que el metal es deformado, pero *no endurece*. Es lo que se muestra en la Figura 26 (Rodríguez-Ibabe, 2006).

Se ve en la Figura que, con deformaciones menores, la tensión crece, hasta llegar a un máximo. La estructura resultante en esas condiciones sería de recrystalización parcial. Hasta ese momento, la cantidad de deformación acumulada no era suficiente para inducir la recrystalización. Después del punto máximo, la tensión sigue disminuyendo con mayores deformaciones, hasta llegar a un equilibrio entre endurecimien-

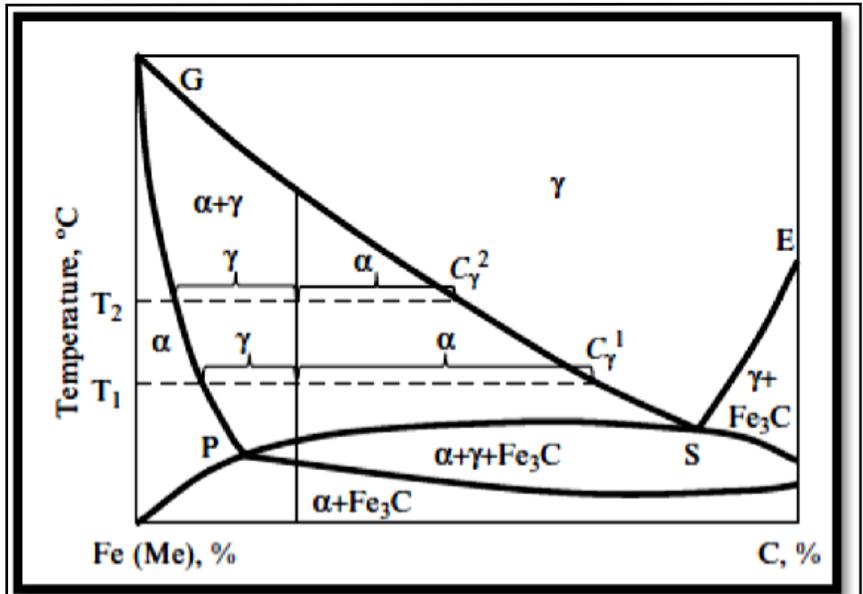


Figura 25. Condiciones de recocido intercrítico en un diagrama pseudo-binario Fe(Mn)-C. Fonstein (2015).

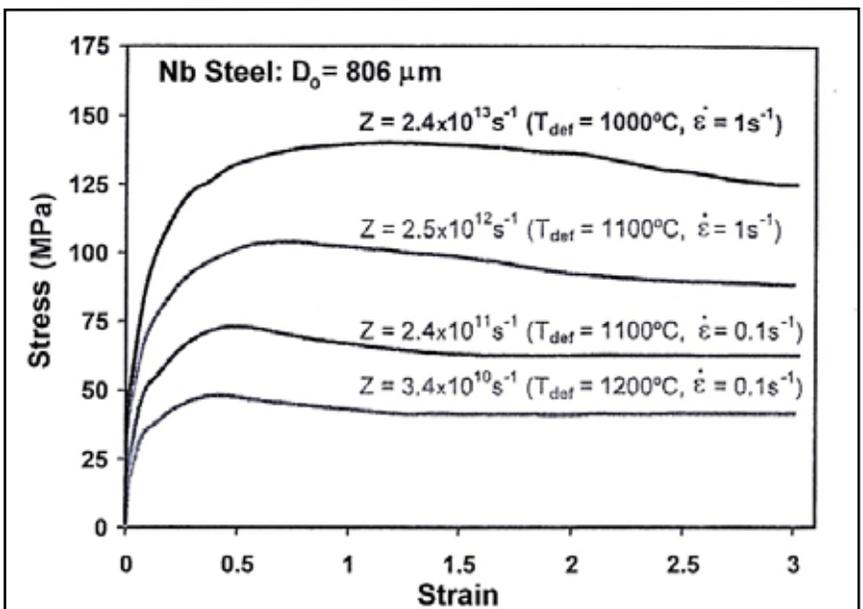


Figura 26. Curvas tensión-deformación de un acero al niobio en función del parámetro de Zener. Rodríguez-Ibabe (2006). Stress – Tensión. Strain – Deformación.

to y ablandamiento, y la estructura resultante a partir de allí será la de una ferrita (en el caso de los aceros) totalmente recrystalizada.

En el gráfico se puede ver que el comportamiento mecánico del acero es función de la temperatura y de la velocidad de deformación  $\epsilon$ . Estas

dos variables se agrupan en el factor Z, conocido como *parámetro de Zener-Hollomon*:

$$\sigma = f(Z) = f(\dot{\epsilon} e^{-\Delta H / RT})$$

Este comportamiento ha dado lugar a lo que se conoce como *laminaación controlada*. Las variables que

se controlan y que permiten obtener la estructura (y por lo tanto las propiedades) deseada en este tipo de laminación son:

- Temperatura del proceso
- Cantidad de deformación
- Velocidad de deformación
- Composición química del acero

Existen muchas variantes de procesos de laminación controlada. Básicamente, podríamos resumirlas como sigue. El acero se lamina en caliente, a temperaturas en que la austenita es estable. De este modo, se pueden tener deformaciones importantes partiendo del planchón de colada continua. La deformación, acompañada por la recrystalización, modifica la estructura de colada del material, inhomogénea y frágil. Los granos grandes, direccionados, propios de la solidificación del metal,

son reemplazados por otros más pequeños, aproximadamente equiaxiales, típicos de un metal trabajado en caliente. Cuando no están en juego propiedades especiales, se elige un proceso de laminación a temperaturas relativamente elevadas, y así se economiza energía porque el material es blando y fácilmente deformable. Al terminar de laminar en caliente, la chapa es enfriada y bobinada, para seguir el proceso laminando en frío.

Cuando se requiere mayor resistencia mecánica, el proceso de laminación en caliente se modifica como se explica a continuación. Se ha visto anteriormente (en el Punto 4a) que uno de los mecanismos de endurecimiento de los metales puros y que se puede aplicar también a las aleaciones metálicas, es la disminución del tamaño de grano. Que tiene la ventaja de no afectar la ductilidad. En los procesos anteriores, la solución era laminar con

el menor gasto posible (o sea a temperaturas elevadas) y luego someter el material a un tratamiento térmico llamado de *normalizado* para afinar el grano de ferrita. Los procesos modernos permiten obtener un acero con grano fino directamente en la fase de elaboración, mediante la laminación controlada. Por este motivo, por la combinación que representan, son procesos conocidos como *tratamientos termomecánicos*.

El principio básico de estos nuevos tratamientos se desprende de la Figura 27 (Zuliani, 1988). Si no se llega a la deformación suficiente como para que el acero recrystalice, sólo tendrá lugar la recuperación y los granos de austenita se irán alargando durante la laminación. Cabe destacar que la laminación en plantas siderúrgicas, tanto en frío como en caliente, se produce en "cajas" de laminación sucesivas. En cada una el metal sufre una cierta deformación a una velocidad de defor-

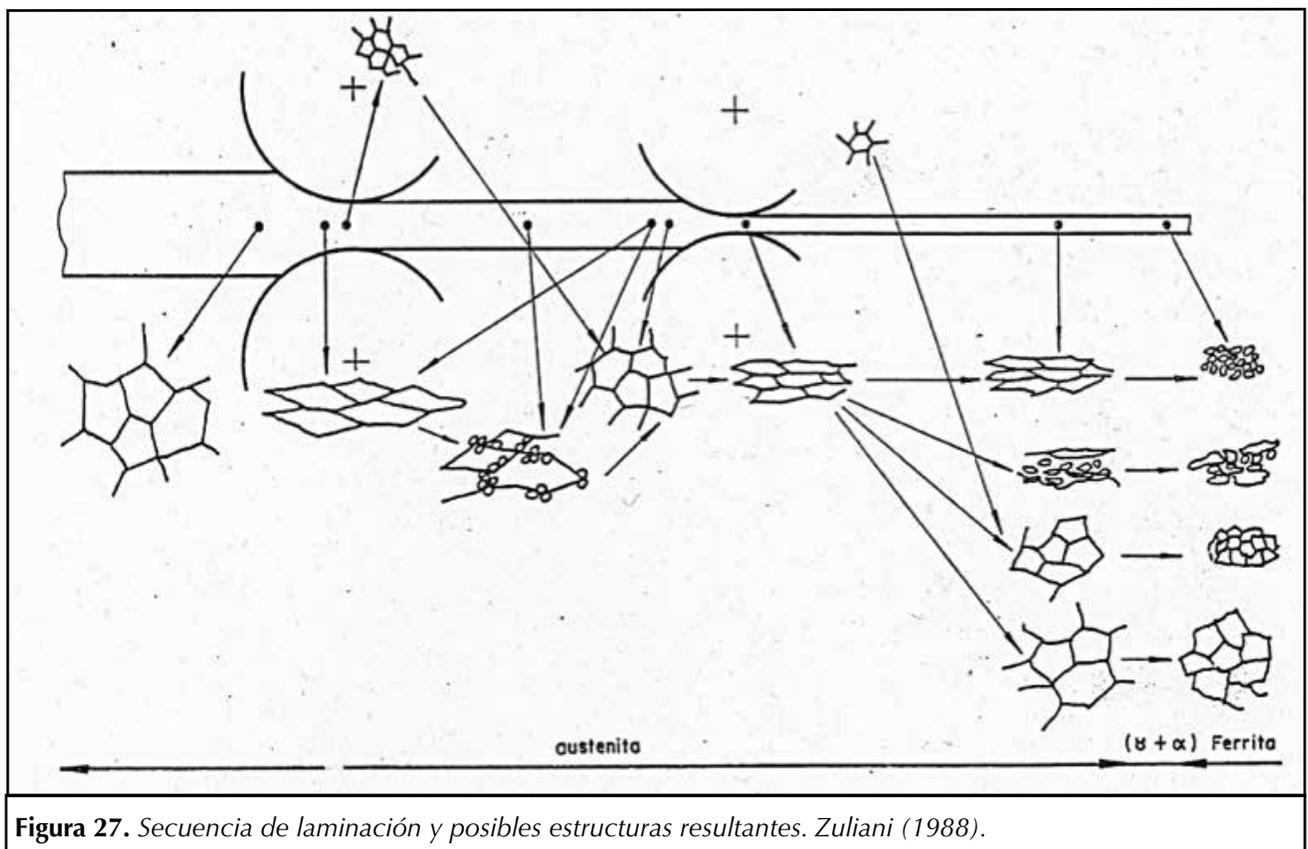


Figura 27. Secuencia de laminación y posibles estructuras resultantes. Zuliani (1988).

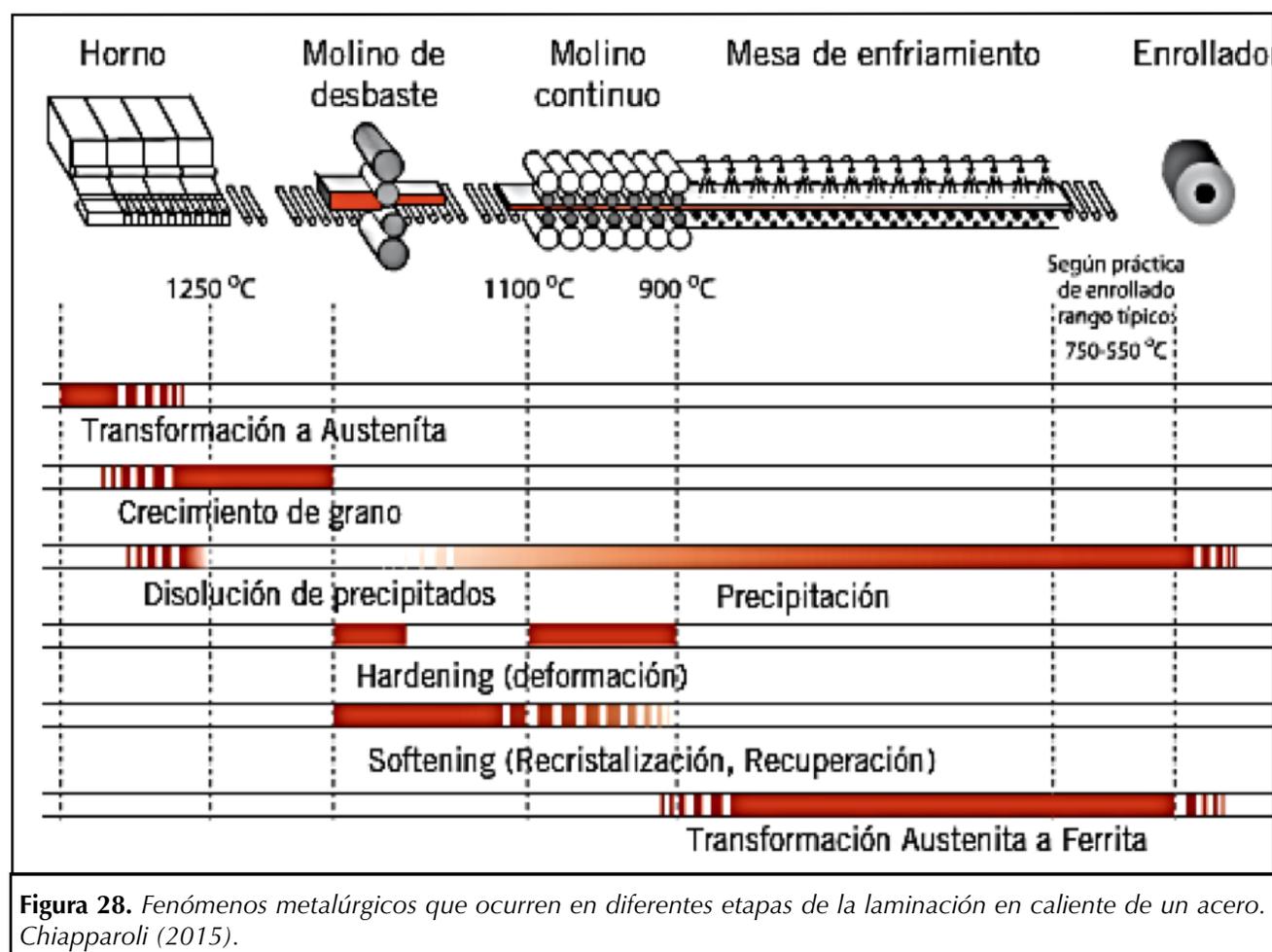
mación dada. En una secuencia de laminación se pueden dar entonces las situaciones que se describen en la Figura 27. Según la deformación que tiene lugar en cada una de las cajas de laminación, dada una estructura micrográfica de entrada, puede haber diferentes microestructuras de salida. Hay que recordar, además que la composición química influye mucho en la posibilidad de que a una temperatura determinada se produzca o no recristalización. Si se frena ésta, el grano de austenita se irá alargando de caja en caja. El niobio ha resultado muy efectivo en este aspecto, así como otros elementos aleantes, aunque en menor grado.

El objetivo de impedir la recristalización es el de llegar a la etapa de enfriamiento con un grano austenítico alargado. Al enfriar esa austenita

se transforma en ferrita. Los granos de ferrita se nuclearán en los bordes de grano de la austenita. Si hay una gran superficie de bordes, habrá muchos sitios de nucleación y, en definitiva, muchos granos de tamaño pequeño. El acero resultante será más resistente, pero no por ello menos dúctil y tenaz. Todo lo contrario.

La secuencia descrita hasta aquí requiere de todo un control en el proceso de fabricación del acero. Se empieza por la composición química. Cuando se recalienta el planchón para empezar a laminarlo, hay que hacerlo a temperaturas suficientemente altas para que los elementos aleantes estén en solución sólida. Esto a veces puede requerir una temperatura demasiado elevada, con lo cual el tamaño de grano de la austenita inicial es demasiado grande y no será fácil achicarlo me-

dante deformación y recocido. Hay que elegir los pasos de laminación controlando la cantidad y velocidad de deformación, que también influyen en la temperatura a la cual se deforma el acero en cada caja. Por otra parte, si el acero recupera pero no recrystaliza, tampoco se ablanda. Y puede ocurrir que las últimas cajas de laminación hayan sido diseñadas para trabajar con un acero que les llegaba recrystalizado y por lo tanto, blando. Con lo cual, no todos los trenes de laminación instalados podían hacer frente a estos nuevos requerimientos. Indicamos estos problemas para que se tenga una idea cabal del esfuerzo tecnológico que hubo que poner en juego para desarrollar los aceros modernos. Unos de los primeros productos que se fabricaron aplicando estos conocimientos fueron los aceros microaleados, o HSLA como mencionados



**Figura 28.** Fenómenos metalúrgicos que ocurren en diferentes etapas de la laminación en caliente de un acero. Chiapparoli (2015).

anteriormente. En la Figura 28 se indican los procesos metalúrgicos que tienen lugar en una laminación en caliente (Chiapparoli, 2015).

## ■ 11. CONCLUSIONES

En este artículo se han reseñado los avances en el conocimiento del comportamiento de los metales que han ido acompañando la producción de chapas de acero que respondieran a los requerimientos de sus usuarios.

Fue un camino muy largo, muy fructífero, donde todos aprendieron de todos. Y, sobre todas las cosas, aprendieron a respetarse y a valorarse mutuamente. Se ha dado la conjunción del *saber por qué* (“*know why*”) con el *saber cómo* (“*know how*”).

Valió la pena. Los resultados están a la vista.

## ■ REFERENCIAS.

- Apraiz Barreiro J. (1974) Tratamientos Térmicos de los Aceros. 8ª Edición, Ed. Dossat Plaza, Madrid.
- Askeland D.R., Phule P.P. (2004) Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Cuarta edición, An International Thomson Publishing Company, 409.
- Bramfitt B.L. (1997) Effect of Composition, Processing and Structures on Properties of Irons and Steels. ASM Metals Handbook 20.
- Callister Jr. W.D. (1994) Materials Science and Engineering. Ed. John Wiley & Sons, 3º ed.
- Chalmers B. (1962) Physical Metallurgy, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Chiapparoli W. (2015) Laminación de productos planos. IAS.
- Chiaverini V. (1985) Aceros y fundiciones de hierro. Instituto Latinoamericano del Fierro y del Acero, ILAFA, Santiago de Chile.
- Cottrell A.H. (1956) Dislocations and plastic flow in crystals, Oxford Press.
- Courtney Th.H. (1990) Mechanical Behavior of Materials, McGraw-Hill.
- Cusminsky G., Hey A., Mazza J. (1974) Consideraciones generales sobre chapa de hierro, Calidad de Productos Laminados de Acero en América Latina, ILAFA, Santiago de Chile, 159-203.
- Demeri M.Y. (2013) Advanced High-Strength Steels. Science, Technology and Application, ASM International.
- Dieter G.E. (1986) Mechanical Metallurgy, Third Edition, McGraw-Hill.
- Duckworth W.E., Baird J.D. (1969) Mild Steels. Journal of the Iron and Steel Institute 207, Part 6, 854-871.
- Fonstein N. (2015) Advanced High Strength Sheet Steels. Physical Metallurgy, Design, Processing, and Properties. Springer.
- Ginzburg V.B. (1989) Steel-Rolling Technology. Theory and Practice, Marcel Dekker, Inc.
- Guy A.G. (1960) Elements of Physical Metallurgy, Second Edition, Addison-Wesley Publishing Co. Inc.
- Hall E.O. (1951). Proceedings Physical Society, B64, 747-753.
- Hosford W.F., Caddell R.M. (1993) Cap. 13, Plastic Anisotropy. Metal Forming – Mechanics and Metallurgy, Second Edition, Prentice Hall.
- Iurman L. (1986) Trabajado mecánico de los metales. Instituto Latinoamericano del Fierro y del Acero - ILAFA, Santiago de Chile.
- Jonas J.J., McQueen H.J. (1976) Recovery and Recrystallization during High Temperature Deformation, Mise en forme des métaux et alliages. B. Baudelet, Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique.
- Keeler S., Kimchi M., Mconey P.J. (2017) Advanced High-Strength Steels – Application Guidelines 6-0, WorldAutoSteel.
- Krauss G. (2005) Steels. Processing, Structure and Performance. ASM International.
- Lankford W.T. et al. (1950) Transactions ASM 42, 1197.
- Lucaioli A.O., Iurman L., Ziegler D., Mazini N.E., Blanco J.M. (2000) Conformado con gradiente térmico de una chapa de acero mediante matriz Swift de punzón plano. Información Tecnológica 11 Nº 1, 83-90.
- Mc Gannon H.E. Editor (1964) The Making, Shaping and Treating of Steel. Principles of Heat Treatment of Steel, Eighth Edition, United States Steel, 1027-1049.
- Pero-Sanz Elorz J.A. (2000) Ciencia e Ingeniería de Materiales. Estructura, Transformaciones, Propiedades y Selección. 4ª Edición, Dossat.
- Petch N.J. (1953) Fractures. JISI 173, 25-28.

Reed-Hill R., Abbaschian R. (1994) Physical Metallurgy Principles, Third Edition, Part 2, PWS Publishing Company.

Rigaut G. (1996) Structural steels. The Book of Steel, Second Edition, G. Béranger, G. Henry, G. Sanz, TEC DOC, 914-934.

Rodríguez-Ibabe J.M. (2006) Curso sobre Tratamientos Termomecánicos y Microaleación, CEIT.

Sachs G. (1954) Fundamentals of the Working of Metals. Pergamon Press.

Thomas B., Guttman M. (1996) Phase transformations and microstructures, Chap. 6. The Book of Steel, Second Edition, G. Béranger, G. Henry, G. Sanz, TEC DOC, 90-157.

Valencia Giraldo A. (1998) Transformaciones de fase en metalurgia. Editorial Universidad de Antioquia.

Zackay V.F. (1969) Some Anticipated Developments in Physical Metallurgical Research. Journal of the Iron and Steel Institute 207 Part 6, 894-901.

Zuliani J.I. (1988) Metalurgia de los procesos de laminación (Aceros

al carbono y microaleados). Instituto Argentino de Siderurgia.

## ■ GLOSARIO

**Hierro y acero.** En Metalurgia se distingue el hierro del acero por lo siguiente: Los aceros son aleaciones de hierro que se pueden deformar en estado sólido produciendo así piezas tales como perfiles, chapas, etc. Las fundiciones de hierro, en cambio, se usan fundamentalmente para elaborar piezas coladas. Cabe aclarar que, si bien se trata de aceros, en lenguaje popular se conocen como hierros también algunos aceros blandos tales como las varillas de construcción usadas en hormigón armado.

**Conformado en frío.** Se conocen así los procesos de deformación de metales que se llevan a cabo por debajo de la temperatura en la cual actúan ciertos mecanismos de ablandamiento.

**Tenacidad.** Es la capacidad de los metales de soportar sin romperse esfuerzos dinámicos tales como golpes.

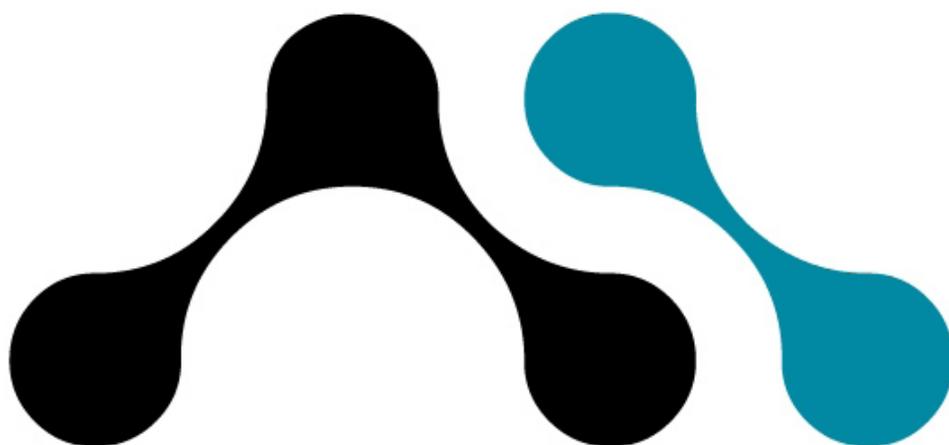
**Aceros microaleados.** Son aceros de desarrollo reciente en los cuales se mejoran sus características mecánicas mediante el agregado de muy

pequeñas cantidades de elementos de aleación.

**Perlita.** Es un constituyente de la microestructura de los aceros que se presenta al enfriar los aceros que han sido calentados a temperaturas por encima de setecientos grados. Se presenta en general en forma de láminas alternadas de hierro (blando) y carburo de hierro (duro y frágil).

**Bainita.** Es un constituyente de la microestructura de los aceros que aparece al enfriar los aceros en condiciones especiales. La estructura es más fina que en la perlita, más dura pero con características distintivas que en algunos casos la hacen más tenaz. Por lo señalado, es objeto de muchos desarrollos modernos.

**Fase.** Es una porción de materia físicamente homogénea dentro de sí misma y limitada por una superficie, de modo que sea mecánicamente separable de cualquier otra porción. Puede estar formada por una misma sustancia. Ejemplos: Agua y cubos de hielo en su seno son así dos fases. O puede formarse con más de una sustancia. Ejemplo: Café y azúcar son una fase en sí mismos cuando están separados. Al agregar azúcar al café se forma la nueva fase que es el café azucarado.



FUNDACION ARGENTINA DE  
**NANOTECNOLOGIA**

(5411) 4518-1715/4518-1716 - 25 de Mayo 1021. C.P. 1650.  
San Martín. Provincia de Buenos Aires. Argentina - [www.fan.org.ar](http://www.fan.org.ar) - [info@fan.org.ar](mailto:info@fan.org.ar)