3

Metalurgia aplicada

Instituto Técnico
de la Estructura
en Acero



ITEA

ÍNDICE DEL TOMO 3

METALURGIA APLICADA

Lección 3.1: Características de las Aleaciones de Hierro y Carbono. 1

1 INTRODUCCIÓN 4
1.1 ¿Por qué es importante la metalurgia para el ingeniero civil y de la construcción metálica 4
1.2 Contenido de las lecciones del grupo 3 4
2 ESTRUCTURA Y COMPONENTES DEL ACERO 5
2.1 Introducción 5
2.2 Componentes del acero 5
2.3 La estructura cristalina 7
3 FASES DE HIERRO Y CARBONO 9
3.1 Influencia de la temperatura sobre la estructura cristalina 9
3.2 Solución de carbono en cristales cmc y ccc 9
3.3 Nomenclatura 10
3.4 El diagrama hierro y carbono 11
4 RITMO DE ENFRIAMIENTO 13
4.1 Índice de enfriamiento durante la transformación de austenita en ferrita y tamaño de grano 13
4.2 Aceros de enfriamiento lento 13
4.2.1 Influencia del carbono sobre la microestructura 13
4.2.2 La necesidad de controlar el tamaño de grano 15
4.2.3 Control del tamaño de grano mediante normalización 16
4.2.4 Cambios estructurales unidos a la laminación en caliente de aceros 16
4.3 Aceros de enfriamiento rápido 18
4.3.1 Formación de martensita y bainita 18

4.3.2 Martensita en estructuras soldadas 19
4.3.3 Bonificación 20
4.3.4 Control de la formación de martensita 21
5 INCLUSIONES 23
5.1 Azufre, fósforo y otras impurezas 23
5.2 Manganeso en aceros para estructuras 24
6 RESUMEN FINAL 26
7 BIBLIOGRAFÍA 26
8 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 26

Lección 3.2: Procesos de Fabricación y Conformado 27

1 TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN DEL ACERO 30
1.1 Introducción 30
1.2 Fabricación del acero 31
1.2.1 El método del convertidor básico de oxígeno de horno alto 31
1.2.2 El método del horno de arco eléctrico (figura 4) 33
1.3 Fabricación de acero en cuchara (afino) 34
1.3.1 Aspectos generales 34
1.3.2 Proceso de fabricación de acero en cuchara: desoxidación y afino (figura 5) 35
1.4 Colada y solidificación 36
1.4.1 Aspectos generales 36
1.4.2 Tecnologías de colada 36
1.4.2.1 Colada en lingotera (figura 6) 36
1.4.2.2 Colada contínua (figura 7) 37
2 TECNOLOGÍA DE CONFORMADO Y TRATAMIENTOS TÉRMICOS 39
2.1 Introducción 39
2.2 Laminado en caliente 39
2.2.1 Descripción de la operación de laminado 39
2.2.2 Laminación primaria 40
2.2.3 Laminación de acabado 41
2.2.4 Procesos de laminado en caliente 43

3 RESUMEN FINAL 47
4 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 47

Lección 3.3.1: Introducción a las Propiedades Físicas de los Aceros 49

1 INTRODUCCIÓN 52
1.1 Naturaleza de los metales 52
1.2 Propiedades sensibles e insensibles a la estructura 52
2 RESISTENCIA 53
2.1 Dislocaciones y deformación plástica 53
2.2 Diagrama tensión-deformación para probetas de tensión simple 54
2.3 Respuesta multiaxial 57
2.3.1 Coeficiente de Poisson 57
2.3.2 Estados de tensiones multiaxiales y su influencia sobre la fluencia 58
2.3.3 Endurecimiento por deformación en frío bajo tensiones multiaxiales 58
2.4 Influencia de la temperatura y del grado de deformación 58
2.4.1 Temperatura 59
2.4.2 Grado de deformación 59
2.5 Medios de incremento de la resistencia 60
2.6 Dureza 62
3 RESUMEN FINAL 63
4 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 63
APÉNDICE 65

Lección 3.3.2: Propiedades Mecánicas de los Aceros 69

1 TENACIDAD 72
1.1 Tipos de rotura 72
1.2 Influencia de la temperatura, la velocidad de carga, la multiaxialidad y la geometría 73
1.3 Ensayo de flexión por choque sobre probeta entallada 74

1.4 Tenacidad a la rotura 75
1.5 Adecuación al uso destinado 78
1.5.1 Ensayo de placa ancha 78
1.5.2 Conceptos de mecánica de rotura 79
2 COMBINACIÓN ÓPTIMA DE RESISTENCIA Y TENACIDAD 82
3 PROPIEDADES DE FATIGA 84
3.1 Fatiga de inicio controlado 84
3.1.1 Ensayo 84
3.1.2 Daño por fatiga 85
3.1.3 Influencia de diversos parámetros 85
3.1.4 Límite de fatiga en condiciones de servicio reales 86
3.1.5 Predicción del daño acumulativo 86
3.2 Fatiga de propagación controlada 86
4 RESUMEN FINAL 88
5 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 88
APÉNDICE 89

Lección 3.4: Calidades y Tipos de acero 93

1 INTRODUCCIÓN 96
2 DEFINICIÓN DE ACERO 97
3 CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE ACERO 98
3.1 Clasificación según la composición química 98
3.2 Clasificación según clases de calidad 98
4 NORMAS DE CALIDAD DESTINADAS A ACEROS PARA ESTRUCTURAS 99
4.1 Consideraciones generales 99
4.2 Puntos principales 99
4.2.1 Proceso de fabricación del acero 99
4.2.2 Estados de suministro 99
4.2.3 Composición química 100
4.2.4 Propiedades mecánicas 100
4.2.4.1 Propiedades de tracción 100
4.2.4.2 Propiedades de resiliencia (ensayo de choque) 100
4.2.4.3 Dirección de la toma de muestras 100

4.2.5 Propiedades tecnológicas 100
4.2.5.1 Soldabilidad 101
4.2.5.2 Conformabilidad 101
4.2.6 Acabado superficial 102
4.2.7 Inspección y ensayo 102
4.2.8 Marcado 102
5 TIPOS DE ACERO PARA ESTRUCTURAS 103
5.1 Productos laminados en caliente de aceros no aleados para aplicaciones estructurales generales conforme a EN 10 025 [4] . 103
5.1.1 Descripción general 103
5.1.2 Designación de los aceros 103
5.1.3 Tipos de acero 103
5.2 Productos laminados en caliente de aceros soldables de grano fino conforme a EN 10 113 [5] 104
5.2.1 Descripción general 104
5.2.2 Estados de entrega 104
5.2.3 Clasificación de calidades 104
5.2.4 Designación 105
5.2.5 Calidades y tipos de acero 105
5.3 Aceros para estructuras destinados a aplicaciones en plataformas petrolíferas 105
5.4 Tipos de acero con propiedades frente al desgarro laminar 107
5.4.1 Descripción general 107
5.4.2 Calidades con propiedades frente al desgarro laminar 107
5.5 Acero resistente a la corrosión atmosférica conforme a EN 10 155 [6] 108
5.5.1 Descripción general 108
5.5.2 Resistencia a la corrosión 108
5.5.3 Tipos de acero 109
5.5.4 Soldadura 110
5.6 Tipos de acero para galvanización por inmersión en caliente 110
6 RESUMEN FINAL 111
7 BIBLIOGRAFÍA 111
APÉNDICE 1: Calidades y tipos de acero 113
APÉNDICE 2: Definición y clasificación de los tipos de acero conforme a EN 10 020 117

APÉNDICE 3: Definiciones relativas al tratamiento termomecánico del acero 121
APÉNDICE 4: Comparación de la composición química (análisis sobre colada) de tipos de acero para estructuras, suponiendo un límite elástico de 355N/mm^2 125

Lección 3.5: Selección de la calidad del acero 129

1 INTRODUCCIÓN 132
2 EL FENÓMENO DE LA FRACTURA FRÁGIL 133
3 CONCEPTOS DE MECÁNICA DE ROTURA Y PROCEDIMIENTOS DE ENSAYO 135
4 METODOLOGÍA PARA LA SELECCIÓN DEL ACERO 138
4.1 El método francés 138
4.2 El método británico 139
4.3 El método belga 139
5 METODOLOGÍA ADOPTADA EN EUROCÓDIGO 3 141
6 ACTUAL CATEGORÍA DE LAS REGLAS DEL EUROCÓDIGO 3 143
7 COMPARACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES DERIVADAS DE DIVERSOS MÉTODOS 144
8 DEBATE 148
9 COMENTARIO DE LAS ACTUALES REGLAS DEL EUROCÓDIGO 3 149
10 RESUMEN FINAL 150
11 BIBLIOGRAFÍA 151
TABLAS 152

Lección 3.6: Soldabilidad de los Aceros para Estructuras 177

1 INTRODUCCIÓN 180
1.1 Breve descripción del proceso de soldadura 180
1.2 Principales procesos de soldadura 180
1.3 Diseño y preparación de la unión soldada 181
1.4 Efectos del ciclo térmico de la soldadura sobre la microestructura 183
1.5 Tensiones residuales y distorsión de soldadura 184
1.6 Atenuación de tensiones residuales 185

2 SOLDABILIDAD DE LOS ACEROS PARA ESTRUCTURAS 186
2.1 Introducción 186
2.2 Fisuración por solidificación del metal de aportación 186
2.3 Fisuración de la zona afectada por el calor (HAZ) 187
2.3.1 Fisuración por licuación (fusión líquida, "quemado") 187
2.3.2 Fisuración inducida por hidrógeno 188
2.4 Desgarro laminar 191
2.5 Fisuración por recalentamiento 192
3 RESUMEN FINAL 194
4 BIBLIOGRAFÍA 194
DIAPOSITIVAS COMPLEMENTARIAS 195

ESDEP TOMO 3
METALURGIA APLICADA

Lección 3.1: Características de las Aleaciones de Hierro y Carbono

OBJETIVOS/CONTENIDO

Presentar aspectos importantes de la metalurgia del acero, necesarios para comprender sus propiedades físicas.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Ninguno.

LECCIONES AFINES

Lección 3.2:	Procesos de Fabricación y Conformado
Lección 3.3.1:	Introducción a las Propiedades Físicas de los Aceros
Lección 3.3.2:	Propiedades Mecánicas de los Aceros
Lección 3.4:	Calidades y Tipos de Acero
Lección 3.6:	Soldabilidad de los Aceros para Estructuras

RESUMEN

La lección comienza exponiendo la necesidad que tiene el ingeniero civil o de la construcción metálica de poseer un conocimiento básico de la metalurgia del acero. A continuación se describe la naturaleza cristalina de los hierros y aceros, junto con la influencia del tamaño del grano y de la composición sobre las propiedades. Se expone la capacidad que presenta el acero de tener más de una estructura cristalina (su alotropía) y las propiedades de las principales formas cristalinas de las aleaciones de hierro y carbono.

Se revisan la metalurgia y propiedades de los aceros de enfriamiento lento, incluyendo la influencia del tamaño del grano, la laminación, el posterior tratamiento térmico y la forma y distribución de las inclusiones. Los aceros de enfriamiento rápido se tratan aparte; a una breve descripción del temple y del revenido le sigue la exposición de la influencia de la soldadura sobre el historial térmico local. Se exponen brevemente la templabilidad, la soldabilidad y el control de la fisuración. Por último se subraya la importancia del manganeso como elemento de aleación.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ¿Por qué es importante la metalurgia para el ingeniero civil y de la construcción metálica?

Las propiedades físicas del acero, como son su resistencia, ductilidad y resistencia a la fractura frágil, dependen de su estructura cristalina, del tamaño del grano y de otras características metalúrgicas.

Estas propiedades de la microestructura dependen de la composición química y del historial de deformación térmica del acero. También los tratamientos térmicos derivados de la soldadura pueden tener una gran influencia sobre las propiedades físicas.

A la hora de escoger el acero para estructuras soldadas es importante poseer al menos un conocimiento básico de metalurgia, sobre todo cuando se proyectan estructuras grandes y complejas como puentes, estructuras de plataformas petrolíferas y edificios de varios pisos.

La selección de materiales y de procedimientos y materiales de soldadura exige a menudo la consulta a los "auténticos" metalúrgicos y especialistas en la materia. Para comunicarse con ellos el conocimiento básico de metalurgia resulta esencial.

Por último, este conocimiento básico de metalurgia permite al ingeniero civil y de la construcción metálica comprender mejor las propiedades físicas del acero y el rendimiento de las estructuras soldadas.

1.2 Contenido de las lecciones del grupo 3

La lección 3.1 se ocupa de las características de las aleaciones de hierro y carbono. Siempre que sea posible se establecen relaciones directas con las propiedades físicas y la soldabilidad del acero, temas que se tratan en las Lecciones 3.2 y 3.6 respectivamente.

La Lección 3.3 describe la fabricación del acero y su conformación en chapas y perfiles. Se presentan los diversos procedimientos de control de la composición química y los distintos tratamientos de deformación térmica. Se aplican la mayoría de los principios fundamentales descritos en la Lección 3.1.

Existen varios tipos y calidades de acero. El tipo se refiere a las propiedades de resistencia (límite elástico y resistencia a la rotura), mientras que la calidad se relaciona principalmente con la resistencia a la fractura frágil. En la Lección 3.4 se explican los tipos y calidades. Se presenta un sistema para la elección de la calidad adecuada, conforme al Eurocódigoo 3 (Anexo C) [1] y se ofrecen algunas directrices para la selección del tipo de acero.

2. ESTRUCTURA Y COMPONENTES DEL ACERO

2.1 Introducción

Para hacerse una idea de la estructura metalúrgica del acero, puede cortarse un fragmento de barra de acero para dejar al descubierto una sección longitudinal, amolando y puliendo la superficie expuesta para examinarla con el microscopio.

Con pocos aumentos se ven algunas partículas extendidas en el sentido de laminación de la barra. Ver diapositiva 1. Estas partículas son inclusiones. Se trata de sustancias no metálicas que han quedado dentro del metal durante su fabricación, generalmente por accidente, pero a veces porque así se ha proyectado. Su presencia no afecta a la resistencia pero tiene un efecto perjudicial sobre la ductilidad y la tenacidad. Algunos tipos de inclusiones pueden mejorar considerablemente la maquinabilidad de los aceros, por lo que pueden introducirse de forma deliberada.

Para descubrir la verdadera estructura del metal debe atacarse químicamente la superficie pulida. Cuando se hace esto puede verse una gran diversidad de microestructuras que refleja la composición y procesamiento del acero. Ver diapositivas 2, 3, 4 y 5.



Diapositiva 1



Diapositiva 2

Como se describe en las secciones posteriores de esta lección, la microestructura influye de forma significativa sobre las propiedades del acero.

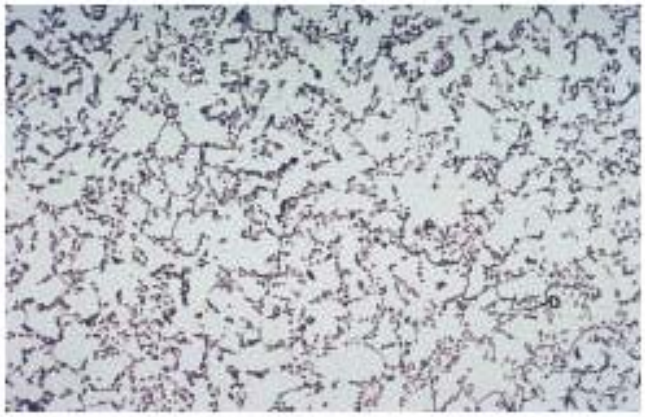
2.2 Componentes del acero

Los aceros y fundiciones son aleaciones de hierro (Fe) y carbono (C) junto con varios elementos más, algunos de los cuales son impurezas inevitables mientras que otros se añaden deliberadamente.

El carbono es el que ejerce una mayor influencia sobre la microestructura y las propiedades del material. Los aceros suelen tener un contenido en carbono inferior al 1% en peso. Los aceros para estructuras contienen menos de un



Diapositiva 3



Diapositiva 4



Diapositiva 5

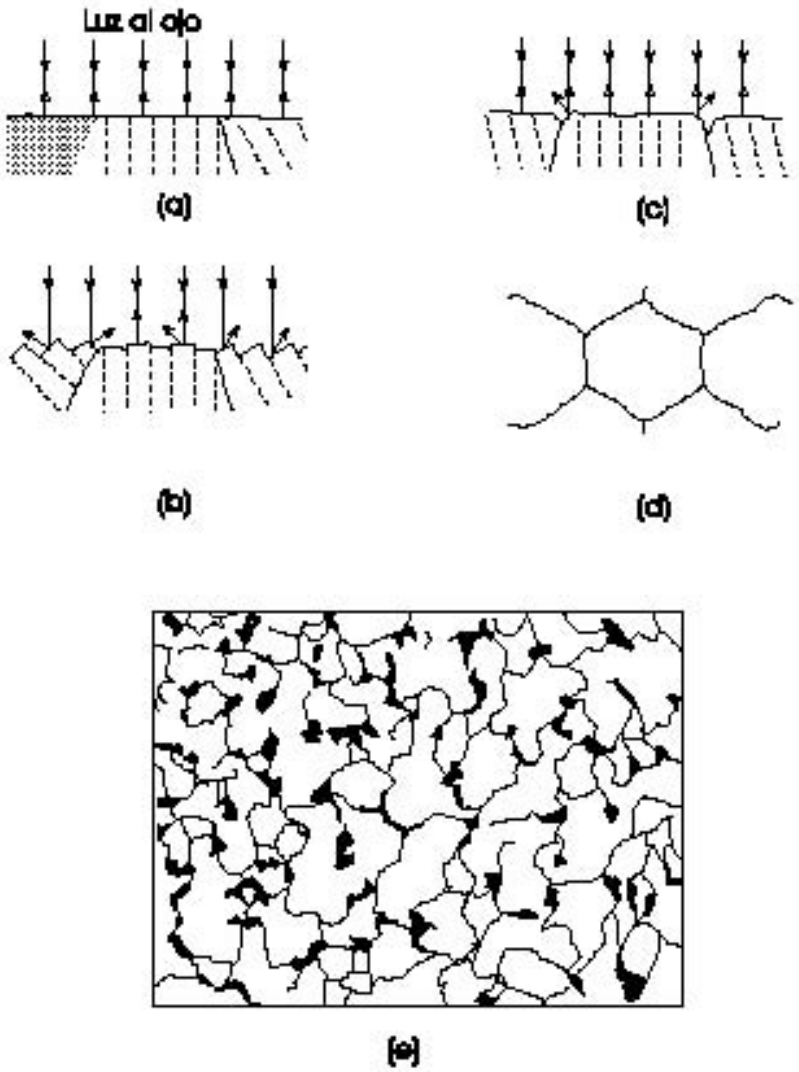


Figura 1 Apariencia de superficies policristalinas

0,25% de carbono: el otro elemento principal de la aleación es el manganeso, que se añade en cantidades de hasta alrededor del 1,5%. Otros elementos de la aleación son cromo (Cr), níquel (Ni), molibdeno (Mo) etc. Elementos tales como el azufre (S), fósforo (P), nitrógeno (N) e hidrógeno (H) suelen tener un efecto perjudicial sobre las propiedades físicas, por lo que durante la fabricación del acero se toman medidas para reducir su contenido. Las fundiciones contienen por lo general alrededor de un 4% de carbono. Este alto contenido en carbono hace que su microestructura y propiedades mecánicas sean muy diferentes de las de los aceros.

Cada una de las microestructuras representadas en las dispositivas 2, 3, 4 y 5 es un ensamblaje de componentes menores. Por ejemplo, el acero de 0,2% C de la dispositiva 2 es fundamentalmente un compuesto de granos pequeños, poliédricos, en este caso con un tamaño < 20 µm. Un análisis más profundo de uno de estos granos lo muestra como un cristal individual. Sin embargo, a diferencia de los cristales de cuar-

zo, silicona o sulfato de cobre, los cristales de hierro (Fe) son blandos y dúctiles. Más adelante se expone la estructura interna de estos cristales.

El acero de la diapositiva 2 es un ejemplo de sustancia policristalina que se ha hecho visible mediante el pulido y el ataque según se ilustra en la figura 1.

(a) La superficie está pulida pero no ha sido atacada.

(b) La superficie está pulida y atacada. Las distintas reflexiones de la luz indican la diferente orientación de los cristales (estructura policristalina).

(c) Algunos reactivos para ataque sólo afectan a los contornos de los granos. Se utilizan cuando es necesario analizar el grano, por ejemplo para hacer una estimación de su tamaño.

(d) Aspecto de los contornos del grano atacados de la figura 1c.

(e) Aspecto de un acero con un 0,15% de carbono (ampliación 100x). Las zonas oscuras son perlita. Los contornos del grano aparecen claramente indicados. Las zonas oscuras indican la presencia de carbono.

El ajuste del historial de laminación y tratamiento térmico sufrido por el acero durante su fabricación permite modificar el tamaño del grano. Es una técnica útil, pues el tamaño del grano influye sobre las propiedades. En particular, el límite elástico viene determinado por el tamaño del grano, de acuerdo con la llamada ecuación de Petch:

$$\sigma_y = \sigma_o + kd^{-1/2}$$

donde

σ_y es el límite elástico

σ_o es en efecto el límite elástico de un cristal aislado muy grande: para el acero dulce es ≈ 50 N/mm^2

d es el tamaño del grano en mm

k es una constante del material, que para el acero dulce es de alrededor de 20 N/mm$^{-3/2}$

Así, si el tamaño del grano es 0.01 mm, $\sigma_y \approx 250$ N/mm^2.

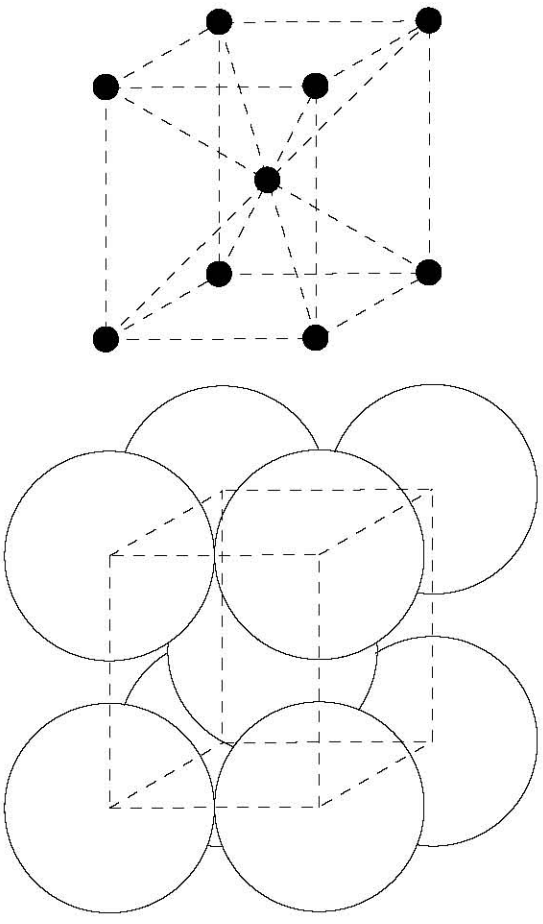
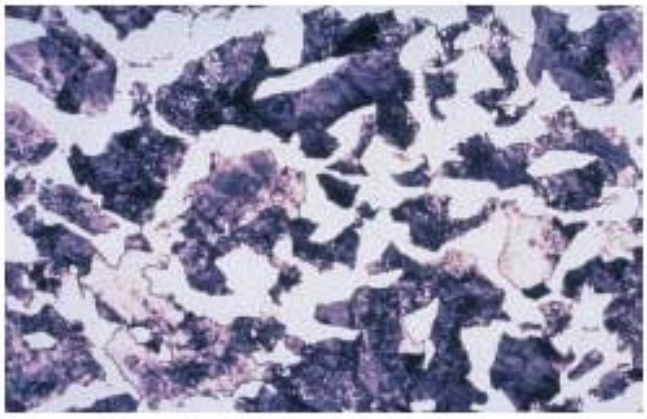


Figura 2 Cristal cúbico de malla centrada: celda unitaria

2.3 La estructura cristalina

La estructura interna de los granos cristalinos está compuesta de átomos de hierro dispuestos conforme a un patrón regular tridimensional. Este patrón se representa en la figura 2. Se trata de la estructura cristalina cúbica de mallas centradas; los átomos se encuentran en las esquinas y en el centro del cubo. La malla es



Diapositiva 6

de solo 0,28 mm en sus aristas. Un grano típico se compone de alrededor de 10^{15} repeticiones de esta malla.

Esta estructura cristalina del acero a temperatura ambiente es uno de los factores principales que determinan la metalurgia y las propiedades de los aceros.

Los aceros contienen carbono, parte del cual, en cantidad muy pequeña, está contenido dentro de los cristales de hierro. Los átomos de carbono son muy pequeños y pueden adaptarse, con cierta distorsión, entre los espacios mayores existentes entre los átomos de hierro. Esta disposición conforma lo que se conoce como una solución sólida intersticial: el carbono se sitúa en los intersticios del cristal de hierro.

En los aceros de las dispositivas 2, 3 y 4, la mayor parte del carbono residual ha formado un compuesto químico con el hierro, Fe_3C, cementita. La cementita es también cristalina, pero dura y frágil. Con 0,1 %C, solo hay una pequeña cantidad de Fe_3C en el acero. Las propiedades de este acero son similares a las del hierro puro[1])[2]. Es dúctil, pero no especialmente resistente; se utiliza en muchas aplicaciones en las que la capacidad de conformado por flexión o plegado es la exigencia principal.

En el caso de un acero de mayor contenido en carbono, digamos 0,4%, según se representa en la diapositiva 5, puede observarse con pocos aumentos que está compuesto por regiones claras y oscuras, aproximadamente al 50:50. Las regiones claras son cristales de hierro con un contenido muy pequeño de carbono disuelto, como en el acero de bajo contenido en carbono. Las regiones oscuras requieren un examen más profundo. La diapositiva 6 muestra una de esas regiones con un aumento mayor. Se aprecia su composición de capas alternas de dos sustancias, hierro y Fe_3C. La separación de las láminas a menudo se aproxima a la longitud de onda de la luz y, como consecuencia de ello, la estructura atacada puede actuar como un enrejado de difracción, ofreciendo unos efectos ópticos semejantes a una irisación nacarada. Por eso esta mezcla de hierro y cementita ha recibido el nombre de "perlita". El origen de la perlita y su efecto sobre las propiedades del acero se revelan al analizar lo que ocurre durante el calentamiento y enfriamiento del acero.

1 "Hierro puro": σ_y = 40-200 Nmm^{-2}, σ_t = 180-285 Nmm^{-2}, A = 30-60 %

3. FASES DE HIERRO Y CARBONO

3.1 Influencia de la temperatura sobre la estructura cristalina

La estructura cristalina cambia con el aumento de temperatura. Con el hierro puro este cambio se produce a los 910ºC. Los cristales cúbicos de mallas centradas (cmc) de la figura 2 se convierten en cristales cúbicos de caras centradas (ccc), según se ilustran en la figura 3. En los cristales ccc, los átomos de hierro están en las esquinas del cubo y en el centro de cada cara del cubo. La posición de mallas centradas está vacía.

Un cierto número de átomos ocupan un volumen ligeramente menor cuando se disponen como cristales ccc que cuando lo hacen como cristales cmc. Así pues, el cambio de estructura cristalina va acompañado de un cambio de volumen, cambio que se ilustra en la figura 4. Cuando se calienta una pieza de hierro puro tiene lugar una dilatación normal hasta que se alcanza una temperatura de 910ºC. A esta temperatura se produce una contracción gradual de cerca de un 1/2% del volumen, asociada a la transformación de la estructura cristalina cmc a la ccc. La dilatación térmica continúa al proseguir el calentamiento hasta que, a 1400ºC, la estructura ccc retorna a la forma cmc y se produce una dilatación gradual que recupera el volumen perdido a 910ºC. El calentamiento más allá de 1400ºC produce una dilatación térmica hasta que tiene lugar la fusión a 1540ºC. La curva es reversible enfriando lentamente.

La propiedad por la cual los metales pueden tener diferentes estructuras metálicas, en función de la temperatura, se denomina alotropía.

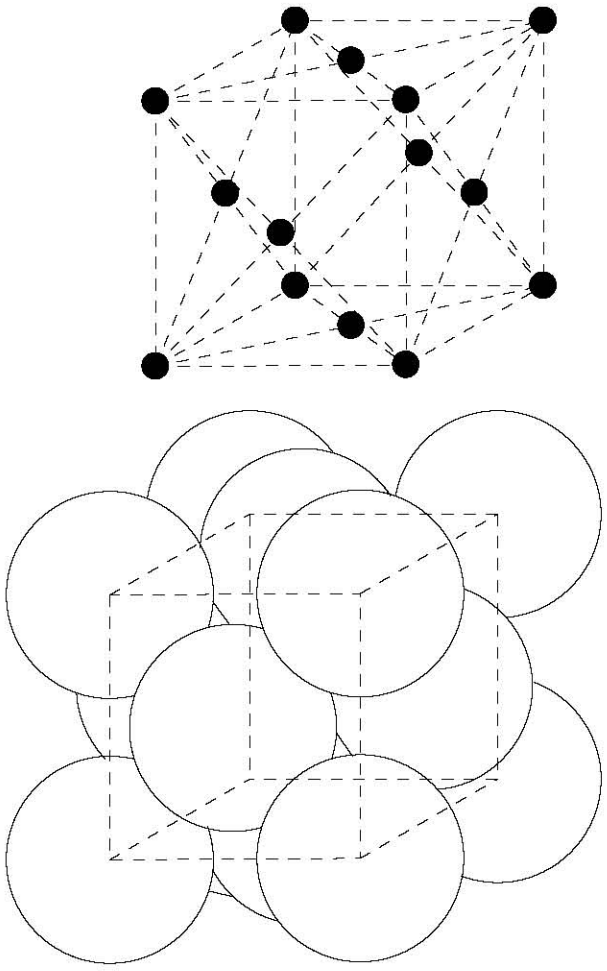


Figura 3 Cristal cúbico de caras centradas: celda unitaria

3.2 Solución de carbono en cristales cmc y ccc

Cuando los átomos de dos materiales A y B tienen más o menos el mismo tamaño pueden formarse estructuras cristalinas allí donde cierto número de átomos A son sustituidos por átomos B. Esta solución se denomina de sustitución, ya

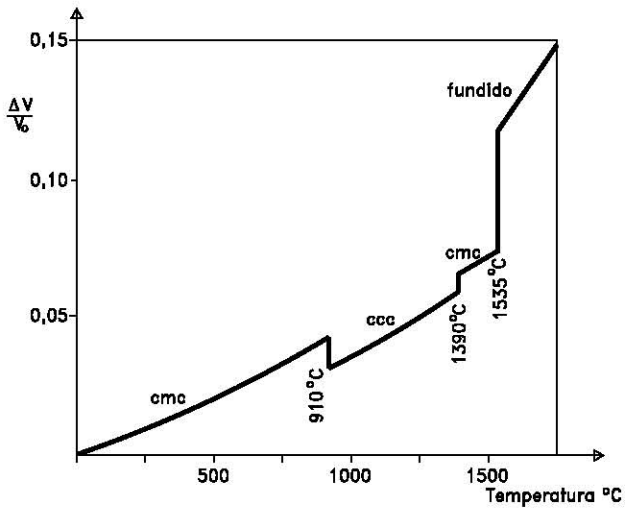


Figura 4 Cambios de volúmen al calentar hierro puro

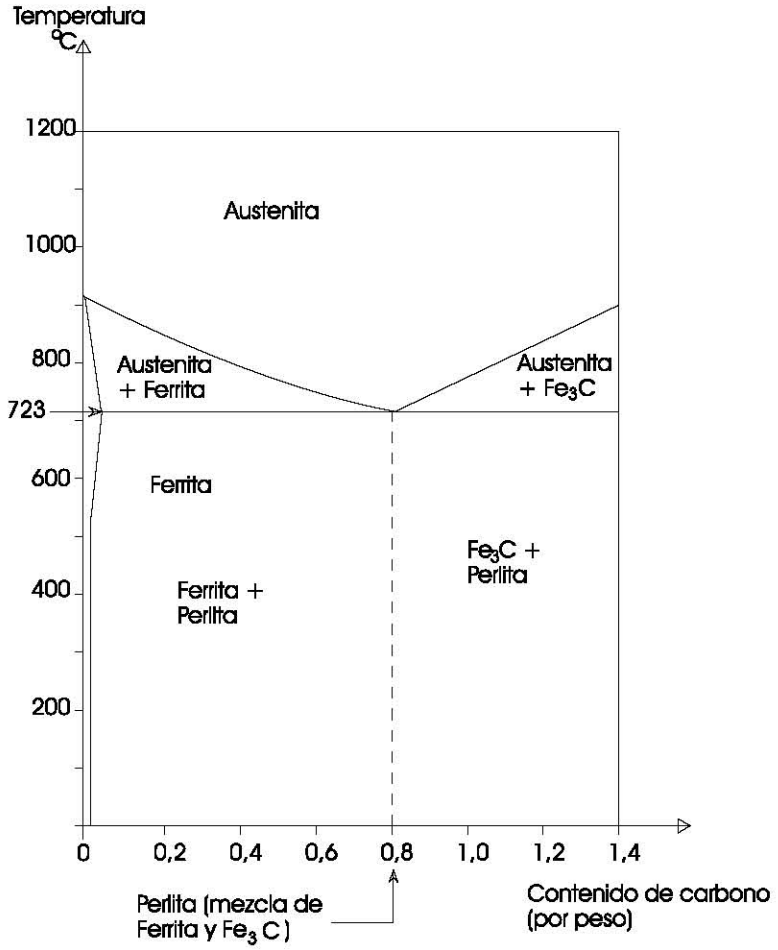


Figura 5 Parte del diagrama de fase hierro - carbono

que un átomo sustituye al otro. Un ejemplo es el níquel en acero.

Cuando los átomos de dos materiales tienen distinto tamaño, el menor de ellos quizá pueda colocarse entre los átomos mayores. Esta es la solución intersticial. El ejemplo más familiar es el de la solución de carbono en hierro. De esta manera, los cristales ccc de temperatura elevada pueden contener hasta un 2% de solución sólida de carbono a 1130ºC, mientras que en los cristales cmc de baja temperatura, la máxima cantidad de carbono que puede mantenerse en solución es de 0,02% a 723ºC, y de alrededor de un 0,002% a temperatura ambiente.

Así, por ejemplo, un acero que contenga un 0,5% de carbono puede disolverlo todo en los cristales ccc de elevada temperatura, pero al enfriarse no puede mantener todo el carbono en solución en los cristales cmc. El excedente de carbono reacciona con el hierro dando lugar a cementita (Fe_3C), que es dura y frágil en comparación al hierro puro.

La cantidad de cementita y la distribución de sus partículas en la microestructura es importante para las propiedades físicas del acero.

La distribución de la cementita depende en gran medida de la velocidad de enfriamiento. La distribución puede explicarse haciendo referencia al diagrama hierro y carbono. Ver la sección 3.4.

3.3 Nomenclatura

En metalurgia se emplea la siguiente nomenclatura:

Ferrita o α-Fe	La forma cmc del hierro en la que puede disolverse hasta 0,02%C en peso.
Cementita	Fe_3C (que contiene cerca de 6,67%C).
Perlita	La mezcla laminar de ferrita y cementita descrita anteriormente. El contenido global en carbono de la mezcla es de 0,8% en peso.
Austenita o γ-Fe	La forma ccc del hierro que existe a elevadas temperaturas y que puede contener hasta aproximadamente 2%C en peso.
Acero	Aleaciones con un contenido en carbono inferior al 2% en peso.

Fundición	Aleaciones con un contenido en carbono superior al 2% en peso.

El acero que se utiliza en estructuras tales como puentes, edificios y barcos, suele contener entre un 0,1% y un 0,25% de carbono en peso.

3.4 El diagrama hierro y carbono

El diagrama hierro y carbono es básicamente un mapa. La parte más importante se muestra en la figura 5. En la figura 6 se representan más detalles.

Cualquier punto del campo del gráfico representa un acero con un contenido concreto en carbono a una temperatura concreta.

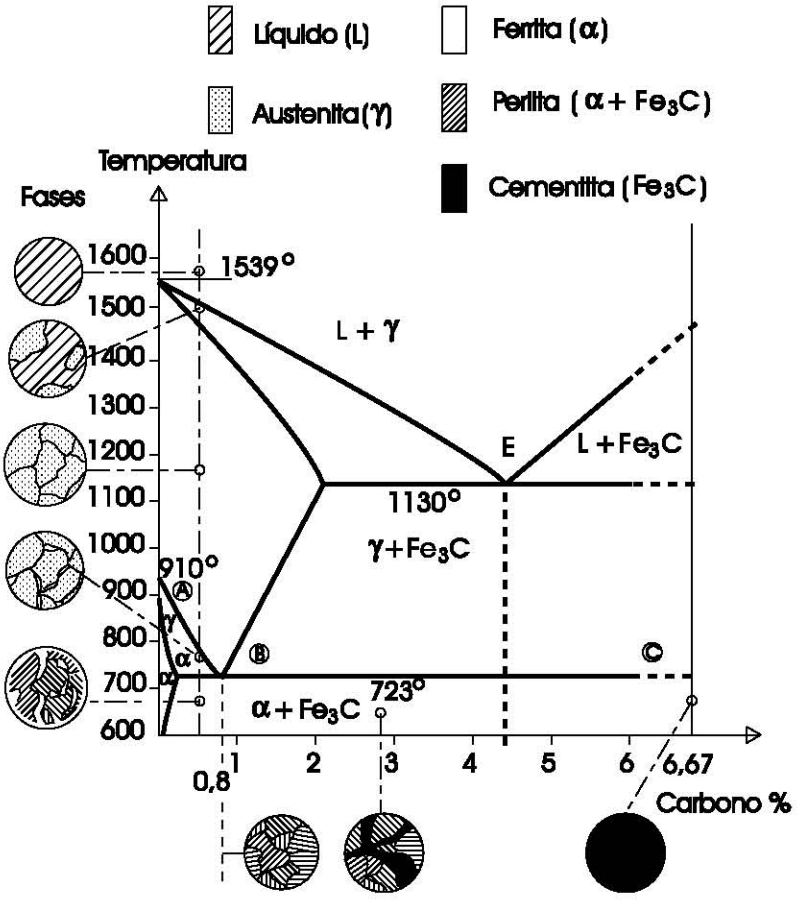


Figura 6 Diagrama de la fase hierro-carbono

El gráfico está dividido en zonas que muestran las estructuras que son estables con composiciones y a temperaturas concretas.

El gráfico puede utilizarse para observar qué ocurre cuando un acero de 0,5%C se enfría a partir de 1000ºC (figura 6).

A 1000ºC la estructura es austenita, es decir, cristales ccc policristalinos con la totalidad del carbono disuelto en ellos. Durante el enfriamiento no se produce ningún cambio hasta que no se alcanza una temperatura cercana a 800ºC. A esta temperatura se cruza el límite desde el campo etiquetado Austenita (γ) al etiquetado Ferrita + Austenita ($\alpha + \gamma$), es decir, que a partir del hierro ccc comienzan a formarse algunos cristales de hierro cmc, con un contenido muy pequeño en carbono. Puesto que la ferrita contiene tan poco carbono, el carbono restante debe concentrarse en la austenita residual. El contenido en carbono de la austenita y las proporciones relativas de ferrita y austenita en la microestructura, se ajustan por sí mismas para mantener el contenido de carbono global original.

Estas cantidades se pueden calcular observando la parte ampliada del diagrama hierro y carbono que muestra la figura 7. Imaginemos que el acero se ha enfriado a 750ºC. La combinación de contenido global de carbono y temperatura está representada por el punto X.

Todos los componentes de la estructura están a la misma temperatura. A través de X se puede trazar una línea de temperatura constante que corta los límites del campo de austenita y ferrita en F y A. Estas intersecciones dan los contenidos en carbono de la ferrita y la austenita respectivamente, a una temperatura concreta.

Si imaginamos ahora la línea FA como una viga rígida giratoria en

torno a un punto de apoyo en X, el "peso" de la austenita que cuelga en A debe compensar el "peso" de ferrita que cuelga en F. Es la llamada regla de la palanca:

Peso de ferrita $\times$ FX = Peso de austenita $\times$ AX

La proporción de ferrita respecto de la austenita en la microestructura viene dada por:

$$\frac{\text{Ferrita \%}}{\text{Austenita \%}} = \frac{AX}{FX}$$

Así, conforme el acero se va enfriando aumenta la proporción de ferrita y el contenido en carbono de la austenita residual, hasta que el enfriamiento alcanza los 723ºC. A esta temperatura el contenido en carbono de la austenita es de 0,8%, y ya no admite más. El enfriamiento justo por debajo de esta temperatura hace que la austenita se descomponga en la mezcla laminar de ferrita y Fe_3C anteriormente identificada como perlita.

Las proporciones de ferrita y perlita en la microestructura, digamos a 722ºC, son virtualmente las mismas que las de ferrita y austenita inmediatamente antes de la descomposición a 723ºC. Así, haciendo referencia a la figura 7 y empleando la regla de la palanca:

Peso de ferrita $\times$ F´X´ = Peso de perlita $\times$ F´P

En este caso, tendría que haber aproximadamente el doble de perlita que de ferrita.

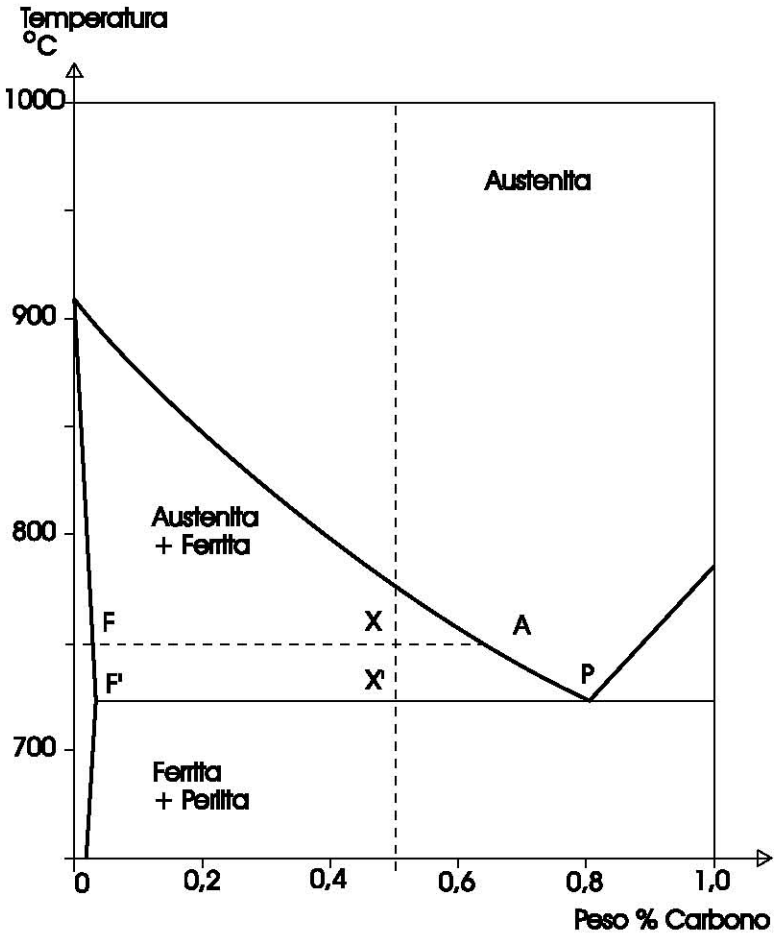


Figura 7 Ilustración de la regla de palanca

Con otros aceros que contienen menos de 0,8%C la explicación es idéntica, salvo en lo que respecta a las proporciones de perlita en la microestructura por debajo de 723ºC. Varía más o menos de forma lineal con el contenido en carbono, entre cero con 0,02%C y 100% con 0,8%. Un acero dulce típico con un contenido de 0,2%C contendría alrededor de un 25% de perlita.

En los aceros que contienen un porcentaje de carbono superior al 0,8%, al enfriarse a partir de temperaturas elevadas la estructura es enteramente austenítica. El primer cambio que se produce es la formación de partículas de Fe_3C a partir de la austenita. Este cambio reduce el contenido en carbono de la austenita residual. Con el enfriamiento ulterior, el contenido en carbono de la austenita sigue la línea del límite entre el campo γ y el campo $\gamma + Fe_3C$. Una vez más, al alcanzar los 723ºC el contenido en carbono de la austenita es del 0,8%. Al proseguir el enfriamiento, se descompone como antes en perlita. Por lo tanto, la microestructura final consiste en unas pocas partículas de Fe_3C intercaladas en una masa de perlita. Ver figura 6.

4. RITMO DE ENFRIAMIENTO

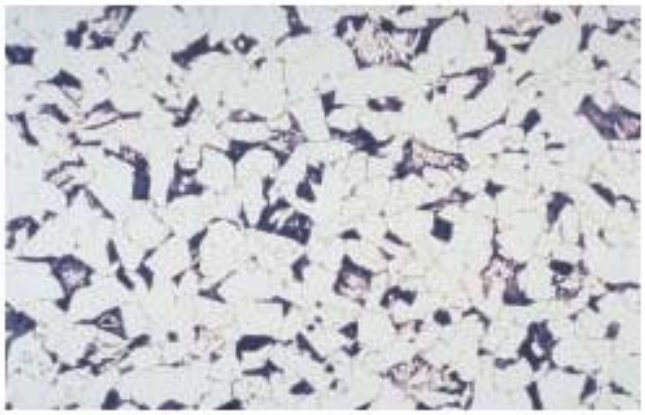
4.1 Indice de enfriamiento durante la transformación de austenita en ferrita y tamaño de grano

Durante el enfriamiento de la austenita comienzan a crecer desde muchos puntos los nuevos cristales cmc de ferrita. El número de puntos de arranque determina el número de granos de ferrita, y por tanto el tamaño de grano. El tamaño de grano es importante, pues de él dependen las propiedades físicas. Los granos pequeños resultan favorables. El número de puntos de arranque puede aumentarse añadiendo elementos como aluminio y niobio. Otro factor importante es el ritmo de enfriamiento. Si es lento, los nuevos granos de ferrita se desarrollan únicamente a partir de unos pocos puntos muy favorables. Con ritmos de enfriamiento elevados el número de puntos de arranque será mucho mayor, y el tamaño de los granos menor. Las diapositivas 7, 8 y 9 muestran aceros con diversos tamaños del grano, producidos a diferentes temperaturas de laminación de acabado.

Otro factor importante lo constituye el hecho de que cuando un acero de grano fino se calienta a una temperatura superior a unos 1000°C, algunos de los granos de austenita crecen mientras los granos contiguos desaparecen. Este crecimiento del grano tiene lugar durante la soldadura en la llamada zona afectada por el calor (HAZ, "heat affected zone"). Se trata de una zona de 3-5 mm de anchura situada en la chapa adyacente al metal fundido. Los cambios microestructurales acaecidos en la zona afectada por el calor suelen dar lugar a un deterioro de las propiedades físicas del acero.



Diapositiva 7



Diapositiva 8

4.2 Aceros de enfriamiento lento

4.2.1 Influencia del carbono sobre la microestructura

El diagrama de constitución hierro y carbono de las figuras 5 y 6 muestra que, en los aceros para estructuras (entre 0,1% y 0,25% de carbono), la formación de ferrita comienza a unos 850°C y finaliza a 723°C. Se recordará que la ferrita apenas puede contener carbono. Por consiguiente, la fase austenítica se transforma



Diapositiva 9

en ferrita y cementita (Fe_3C).

Cuando el ritmo de enfriamiento es lento, los átomos de carbono tienen tiempo de migrar separando "capas" en la microestructura y formando la estructura denominada perlita, según se mostró antes en las diapositivas 2, 3, 4 y 5. La ferrita de esta mezcla es blanda y dúctil. El componente cementita es duro y frágil. La mezcla (perlita) posee propiedades entre estos dos extremos.

Las propiedades de resistencia a la tracción de un acero que contiene ferrita y perlita tienen un valor más o menos conforme a las proporciones de estos componentes en la microestructura, como se ve en la figura 8.

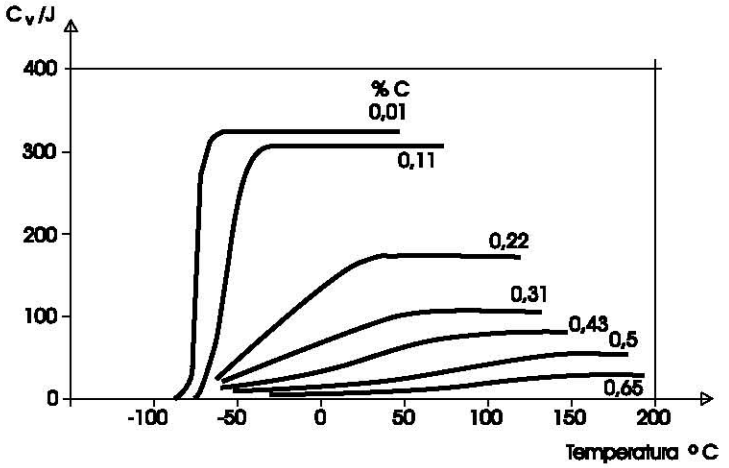


Figura 9 Efecto del contenido de carbono en la transición de dúctil a frágil en los aceros normalizados (Rinebolt & Harris, 1951)

La figura 9 muestra el efecto sorprendente que el contenido en carbono tiene sobre la tenacidad. El aumento del contenido en perlita disminuye la tenacidad de la capa superior e incrementa la temperatura de transición de dúctil a frágil.

Las figuras 8 y 9 muestran una de las dificultades a la hora de elegir el contenido en carbono. El aumento de éste es beneficioso porque mejora el límite elástico y la resistencia a la rotura por tracción, pero es perjudicial en la medida que reduce la ductilidad y tenacidad. Asimismo, un contenido elevado en carbono puede causar problemas en la soldadura. Ver sección 4.3.

En la Norma Europea 10025, Tabla 3, [3] se da la composición química de productos planos y largos. En la figura 10 se presenta un extracto. Por ejemplo, la designación S235 JR indica que el límite elástico es 235 N/mm^2 como mínimo. Se ha de hacer hincapié en que los valores relativos a la composición reflejados en la tabla son máximos. Muchos fabricantes de aceros consiguen niveles mucho

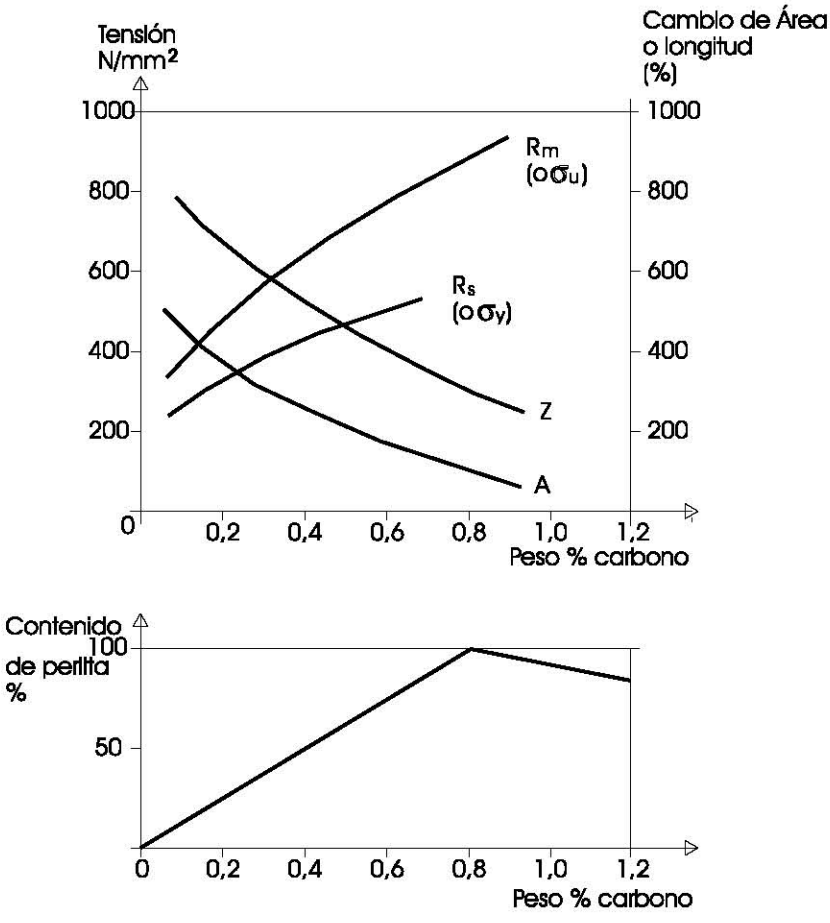


Figura 8 Efectos del contenido de carbono en el contenido de perlita y propiedades del ensayo de tracción de aceros normalizados

Denominación Según EN 10027-1	C en % max. para espesor nominal del producto en mm < 16	> 16 ≤ 40	> 40	Mn x max.	Si x max.	P x max.	S x max.	N x max.
S185	-	-	-	-	-	-	-	-
S235JR	0,21	0,25	-	1,5	-	0,055	0,055	0,011
S235JRG1	0,21	0,25	-	1,5	-	0,055	0,055	0,009
S235JBG2	0,19	0,19	0,23	1,5	-	0,055	0,055	0,011
S235JO	0,19	0,19	0,23	1,5	-	0,050	0,050	0,011
S235J2G3	0,19	0,19	0,19	1,5	-	0,045	0,045	-
S235J2G4	0,19	0,19	0,19	1,5	-	0,045	0,045	-
S275JR	0,24	0,24	0,25	1,6	-	0,055	0,055	0,011
S275JO	0,21	0,21	0,21	1,6	-	0,050	0,050	0,011
S275J2G3	0,21	0,21	0,21	1,6	-	0,045	0,045	-
S275J2G4	0,21	0,21	0,21	1,6	-	0,045	0,045	-
S355JR	0,27	0,27	0,27	1,70	0,60	0,055	0,055	0,011
S355JO	0,23	0,23	0,24	1,70	0,60	0,050	0,050	0,011
S355J293	0,23	0,23	0,24	1,70	0,60	0,045	0,045	-
S355J294	0,23	0,23	0,24	1,70	0,60	0,045	0,045	-
S355K293	0,23	0,23	0,24	1,70	0,60	0,045	0,045	-
S355K294	0,23	0,23	0,24	1,70	0,60	0,045	0,045	-

Figura 10 Extracto de la Tabla 3 de EN 10025

menores, obteniendo una mejor ductilidad, resistencia a la fractura frágil y soldabilidad.

El menor contenido en carbono que puede conseguirse fácilmente a gran escala es de alrededor de 0,04%. Este contenido es el característico de las chapas finas o aceros en banda, destinados a una conformación por deformación extensiva en frío, como en la embutición.

Los contenidos en carbono superiores al 0,25% se emplean en el campo más amplio de los aceros industriales generales. Se trata de aceros utilizados en estado bonificado (ver más adelante) para una multiplicidad de aplicaciones de ingeniería mecánica. Los pernos de gran resistencia destinados a algunas aplicaciones estructurales serían también de este tipo.

4.2.2 La necesidad de controlar el tamaño de grano

Las propiedades mecánicas del acero se ven afectadas por el tamaño de grano. Las diapositivas 8 y 9 representan las microestructuras de dos muestras del mismo lote de acero dulce, que han sido tratadas para obtener diferentes tamaños de grano mediante los métodos esbozados en la sección 4.2.3. La reducción del tamaño de grano mejora el límite elástico, pero tiene también un profundo efecto sobre la temperatura de transición dúctil/frágil. Ver figura 11. Así, una misma carga de la microestructura proporciona diversos beneficios; algo desacostumbrado en metalurgia, donde los ajustes realizados para mejorar una propiedad a menudo significan el empeoramiento de otra, por lo que se hace necesario un compromiso. Un ejemplo de este compromiso se refiere al contenido en carbono, ya tratado anteriormente.

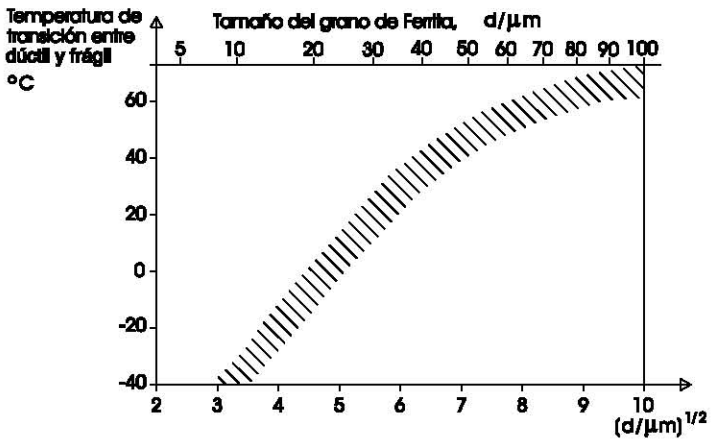


Figura 11 Efecto del tamaño de grano de ferrita en la temperatura de transición dúctil/frágil del acero dulce (0,11%) (Petch, 1959)

4.2.3 Control del tamaño de grano mediante normalización

En la sección 4.2.1 se describen las transformaciones que pueden producirse cuando los aceros se enfrían lentamente. Los átomos de carbono del acero deben cambiar de posición para formar ferrita y perlita a partir de la austenita. Los procesos de difusión que transportan los átomos dentro del sólido tienen lugar a velocidades que dependen exponencialmente de la temperatura. También el ritmo de enfriamiento influye sobre estas transformaciones.

Si se incrementa el ritmo de enfriamiento las transformaciones se producen más rápidamente. Además, los procesos de difusión no pueden mantener el ritmo de la temperatura en descenso. Así, un acero enfriado muy lentamente en el horno se mantiene próximo a las exigencias del diagrama de constitución. Sin embargo, el mismo acero retirado del horno y enfriado al aire puede sobreenfriarse antes de completar su secuencia de transformaciones. Este enfriamiento más rápido tiene dos efectos: en primer lugar tiende a aumentar ligeramente la proporción de perlita en la microestructura; y en segundo lugar, produce ferrita de un tamaño del grano más fino y perlita con laminillas también más finas. Ambos cambios microestructurales ofrecen un límite elástico más elevado y una ductilidad y tenacidad mejores.

Los aceros enfriados en el horno se conocen como aceros completamente recocidos. Los aceros enfriados al aire se conocen como aceros normalizados.

El tamaño de grano puede verse también afectado por la temperatura a la que se enfría el acero en la fase austenítica. Los granos de austenita se hacen más gruesos con el tiempo, y el ritmo de este proceso aumenta exponencialmente con la temperatura. El hecho de que los granos se hagan más gruesos es importante, porque la transformación en ferrita y perlita durante el enfriamiento comienza en los contornos del grano de la austenita. Si las nuevas estructuras empiezan a crecer a partir de puntos muy separados en una austenita de grano grueso, el tamaño de grano de la ferrita resultante será él mismo más grueso. Así, los aceros no deberían sobrecalentarse al efectuarse la austenitización antes de normalizar.

La temperatura a la que se calienta el acero antes de enfriarlo al aire se conoce habitualmente como temperatura de normalización. Las exigencias expuestas en el último párrafo significan que la temperatura debiera ser lo más baja posible mientras la estructura es una fase austenítica única. En el diagrama de constitución de la figura 5 se observa que la temperatura de normalización disminuye a medida que el contenido en carbono aumenta de cero a 0,8%. Tendría que situarse en la banda rayada de la figura 12.

4.2.4 Cambios estructurales unidos a la laminación en caliente de aceros

Los perfiles de aceros para estructuras se producen mediante lingotes de laminación en

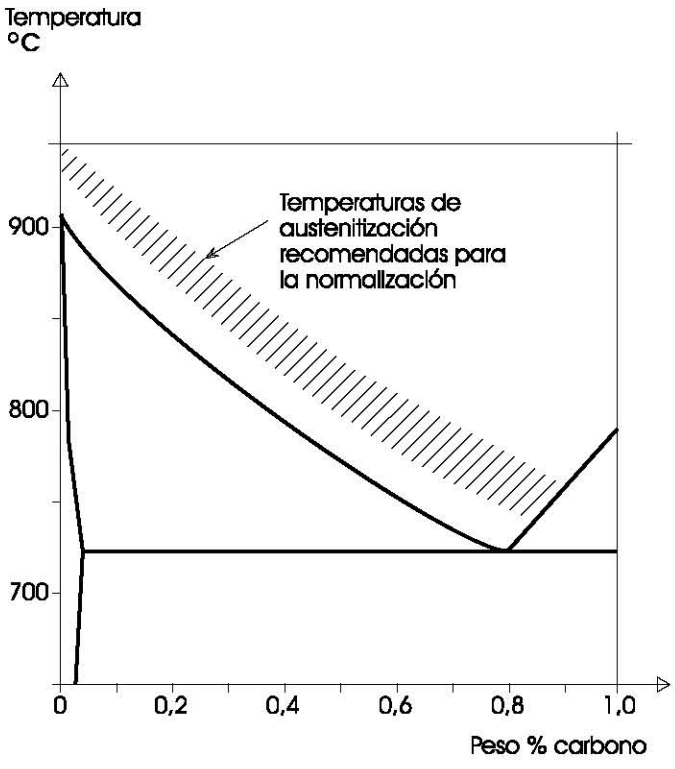
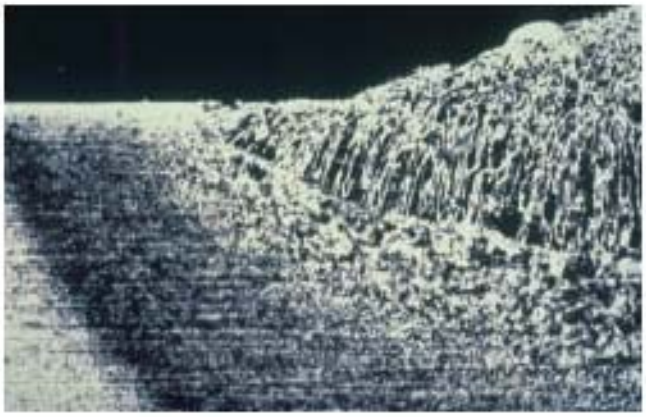


Figura 12 Extracto del diagrama de la fase hierro-carbono



Diapositiva 10

caliente o hilera de material colada de forma continua, dándoseles la forma requerida. Los procesos de laminación tienen un efecto importante sobre el desarrollo de la microestructura de los materiales.

Las etapas tempranas de la laminación se llevan a cabo a temperaturas enteramente dentro de la fase austenítica, en la que el acero está blando y se deforma con facilidad. La deformación sufrida por el material rompe la estructura de grano grueso recién fundida, pero a estas temperaturas elevadas los átomos del material se pueden difundir rápidamente, lo que permite a los granos deformados recristalizarse y reformar la estructura policristalina equiaxial de la austenita.

Una deformación intensa a bajas temperaturas en la fase austenítica da lugar a granos recristalizados más finos. Si la laminación se concluye a una temperatura justo por encima de la región ferrita + austenita del diagrama de equilibrio, y se deja enfriar el perfil al aire, se obtiene una microestructura normalizada corriente con una ferrita de grano moderadamente fino. Las modernas técnicas de control de la laminación buscan este resultado, o incluso una laminación a temperaturas todavía más bajas para dar lugar a granos aun más finos.

Cuando la temperatura cae de manera que la laminación se concluye en la fase ferrita + austenita, la mezcla de ferrita y austenita se alarga en el sentido de la laminación y se desarrolla una estructura a modo de capas. Si entonces se enfría al aire el perfil, la austenita residual se descompone en ferrita y perlita de grano fino, presentándose esta última en el material a modo de bandas con forma de cigarro alargado, como en la diapositiva 10. Los aceros para estructuras no se ven perjudicados por microestructuras de este tipo.

Cuando la temperatura de laminación de acabado sigue cayendo, hasta por debajo de 723°C, el diagrama de equilibrio muestra que la estructura sería una mezcla de ferrita y perlita. La laminación en esta fase se suele restringir a los aceros de bajo contenido en carbono, menos de 0,15%C, ya que la presencia de perlita dificulta la laminación.

Cuando la temperatura es superior a unos 650°C, los granos de ferrita vuelven a cristalizarse al deformarse, como ocurría con la austenita. Las varillas de carburo (Fe_3C) de la perlita se rompen y dan origen a cintas de pequeñas partículas de carburo que se extienden en el sentido de la laminación. Ver diapositiva 11. La ferrita procedente de la perlita se hace indistinguible del resto.

Cuando la laminación se lleva a cabo a temperatura ambiente la perlita se descompone de igual manera, pero la ferrita no puede volver a cristalizarse. Endurece por acritud, es decir, que aumentan el límite elástico y la resistencia a la rotura por tracción del acero, mientras que la ductilidad disminuye. Ver figura 13.



Diapositiva 11

Conforme continúa la laminación en frío aumenta la fuerza necesaria para proseguir la deformación, debido al límite elástico en aumento. Además, el acero se hace menos dúctil y puede empezar a resquebrajarse. La cantidad de laminación en frío que puede realizarse es por tanto mucho menor que la que se puede conseguir cuando el acero está caliente.

Por supuesto, no es necesario aplicar un trabajo en frío durante la laminación. Cualquier modo de deformación del material opera un endurecimiento por acritud. Por ejemplo, el cable de acero de alta resistencia se hace mediante estirado en frío, dando lugar a grandes deformaciones. Otro ejemplo: un tipo de barra de refuerzo se hace torciendo la sección cuadrada para producir una sección helicoidal. La deformación en frío que de esta forma se produce no es grande, pero causa un notable endurecimiento por acritud.

Para recuperar la ductilidad y al mismo tiempo reducir el estado de endurecimiento por acritud del material, es necesario reformar la

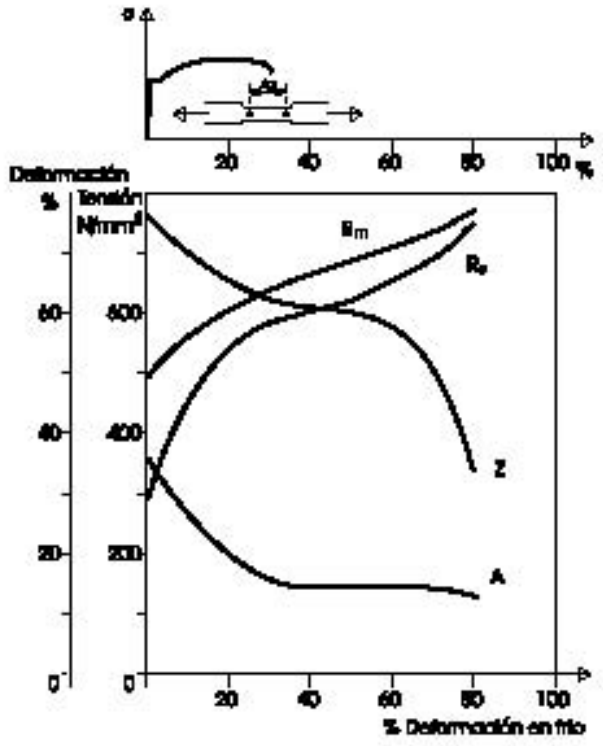


Figura 13 Efectos del trabajo en frío en las propiedades de tracción del acero (0,13-0,18 % C, 0,6-0,9 % Mn) y en la curva deformación/tensión



Diapositiva 12

estructura policristalina isotrópica de la ferrita. El recalentamiento a temperaturas de entre unos 650°C y 723°C permite la recristalización de la ferrita. Este tratamiento no afecta a las partículas de carburo.

Así pues, existe otra técnica para controlar el tamaño de grano del acero. Cuanto mayor es el grado de deformación antes del tratamiento de recristalización y menor la temperatura del mismo, más fino es el tamaño final de grano. Dado que este tipo de tratamiento no conlleva la formación y descomposición de austenita, se conoce como recocido por debajo del punto crítico. La microestructura resultante posee una ductilidad y características de embutición buenas. Las chapas finas de bajo contenido en carbono (<0,1%C) suelen suministrarse en este estado. Algunos productos, como los paneles de la carrocería de vehículos a motor, se forman a partir de este tipo de aceros por prensado en frío.

Si el material se calienta a la fase austenítica, el enfriamiento subsiguiente reforma la microestructura normalizada.

4.3 Aceros de enfriamiento rápido

4.3.1 Formación de martensita y bainita

La normalización hace que los aceros se subenfríen por debajo de las exigencias del diagrama de constitución antes de que la austenita