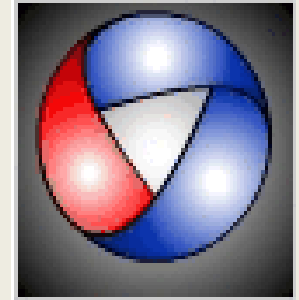




Universidad Nacional de Cuyo
Facultad de Ingeniería



Ensayos de caracterización para el diagnóstico de falla en componentes metálicos.

Dra. Ana María Furlani
Cátedra Ciencia de los Materiales y Laboratorio de
Metales - ITIEM

Diagnóstico de Falla

Se apoya en los tres elementos de un proceso de ingeniería: el diseño de ingeniería que se haya hecho del componente, los métodos y demás factores implicados en la fabricación y las condiciones en que se haya hecho la instalación y/o se haya utilizado el componente.



Herramientas de análisis usadas

- Examen visual

Lupa binocular Stemi DV4, Zeiss



Este equipo, que pertenece al Laboratorio de Metales del ITIEM, es una lupa binocular de diseño compacto y original que cuenta con el sistema de zoom patentada de la DV4 Stemi (doble lente Vario, el factor de zoom 4) que garantizan imágenes brillantes de alta resolución, tanto en la visión panorámica (8x) como en el detalle (32x).

Máquinas de Ensayos

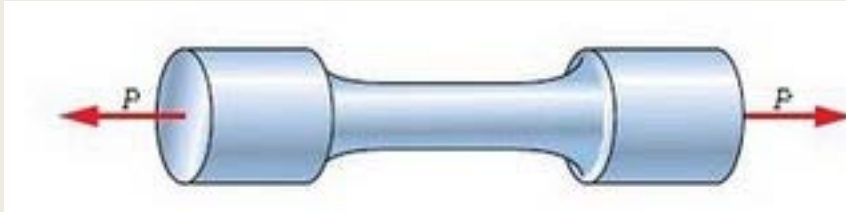


**Máquina Universal de
Ensayos-marca AMSLER**

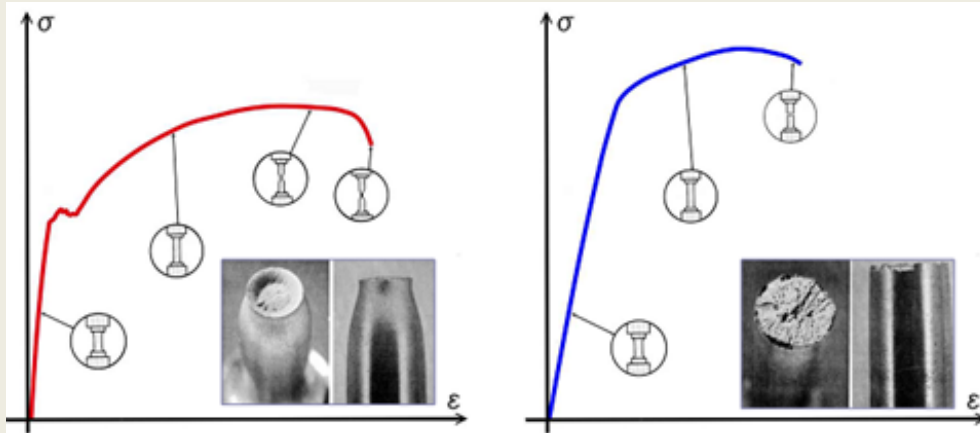


**Máquina Universal de
Ensayos-marca CIFIC**

Ensayos de Tracción



Ensayo de tracción en materiales dúctiles y frágiles



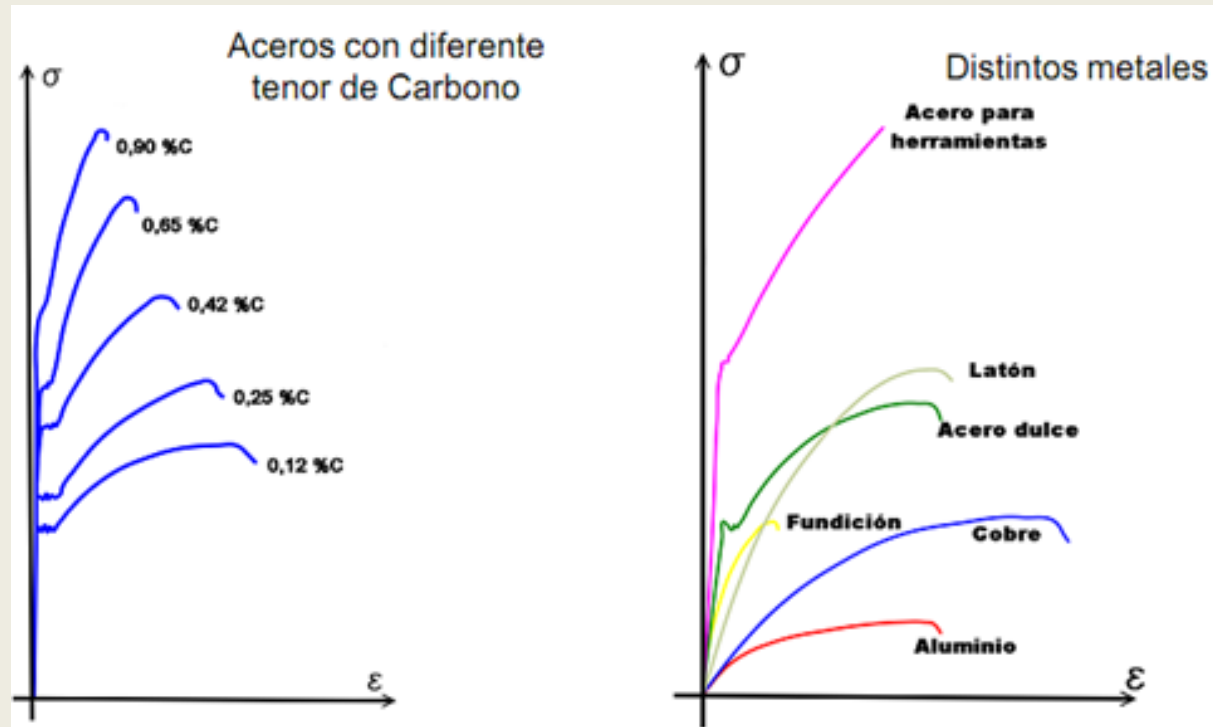
Probetas de Acero Inoxidable 316LS

Probeta de 9mm de diámetro en una prueba de Tensión. En este caso observamos una de las principales características de una fractura dúctil, la formación de un cuello de botella, además de que se presenta una reducción y una elongación en el área de la sección transversal lo que es causa de una deformación plástica.



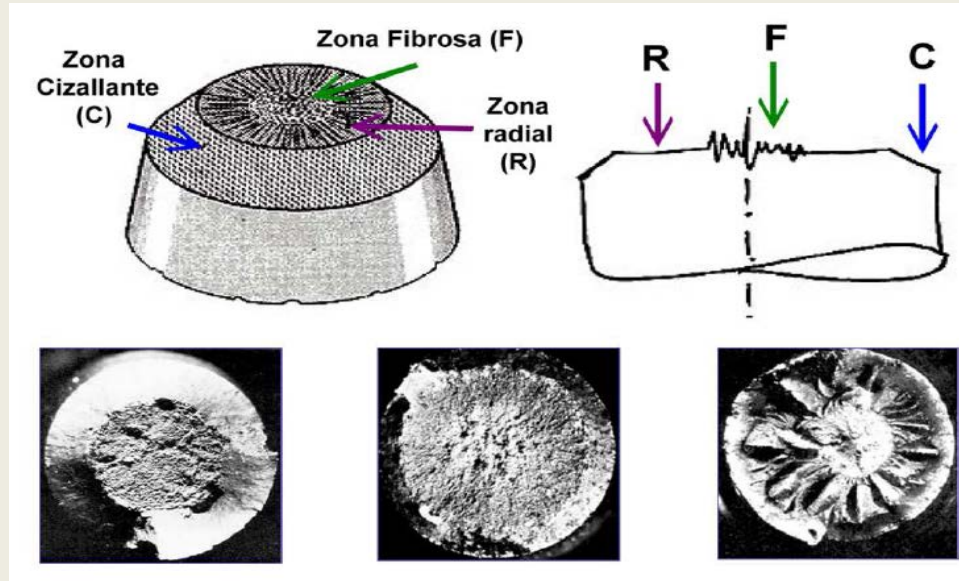
- **Ensayos de tracción**

Diagramas obtenidos para distintos metales



Fractografía

Como base para el estudio de superficies de fractura, se hace imprescindible el estudio de la rotura de cuerpos de prueba o probetas, tanto de tracción (cilíndrica y plana) como de tenacidad a fractura, de ensayo de impacto y otras posibles probetas. A continuación pueden observarse ejemplos de probetas que han sido sometidas a tracción.



Fractura de fundición gris (frágil)

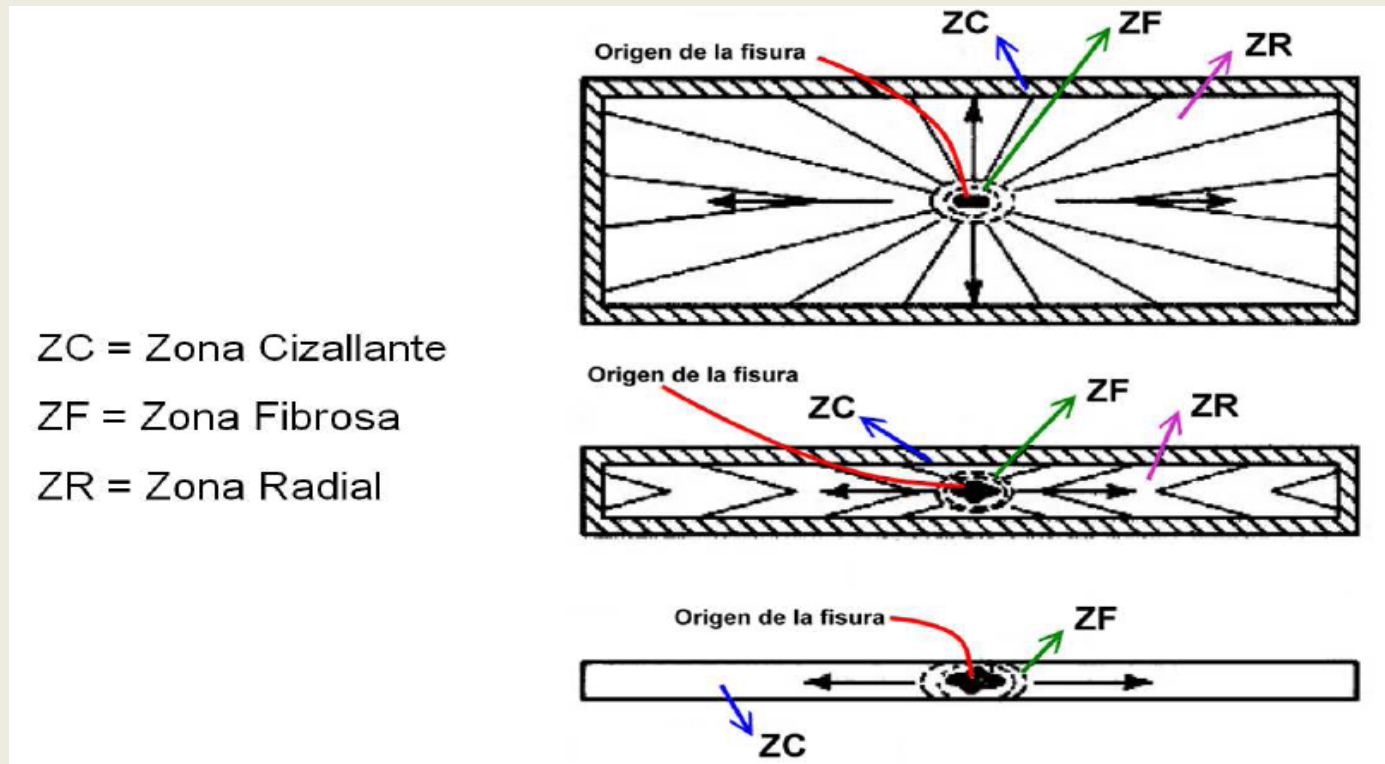
En la figura podemos distinguir tres regiones

Zona Fibrosa (ZF): El inicio de la fractura dúctil se da en esta zona, en ella ocurre la propagación estable de la fisura, esto es bajo cargas crecientes y se localiza la mayor triaxialidad de tensiones (tensiones las tres direcciones del espacio) en el centro de la probeta.

Zona Radial (ZR): Esta zona corresponde a la propagación inestable de la fisura. Las marcas radiales se inician en la periferia de la ZF o en un punto de nucleación de la fisura cuando no se forma ZF. Por lo tanto estas marcas divergen a partir de la región de nucleación de la fractura inestable (característica muy importante para la identificación del origen de una fractura frágil). Ellas pueden presentar un aspecto grosero, en general cuanto más grosero su aspecto, mayor es la tenacidad del material.

Zona Cizallante (ZC) (shear lips): Esta zona generalmente se encuentra inclinada a 45° con respecto al eje de tracción y se forma como consecuencia del alivio de la triaxialidad de tensiones próximas a la superficie libre de la probeta. Su tamaño depende de las propiedades mecánicas del material y del estado de tensiones.

Dependiendo de la ductilidad del material ensayado, de la temperatura y la velocidad de deformación, el tamaño y la proporción, el aspecto de estas tres zonas puede ser alterado.



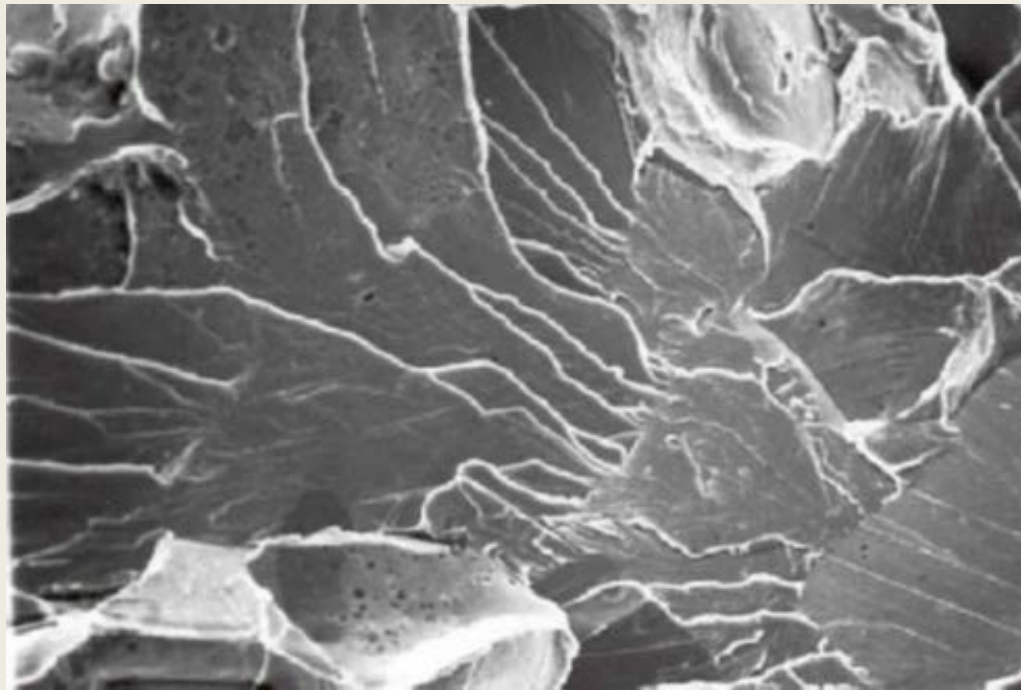
ZC = Zona Cizallante

ZF = Zona Fibrosa

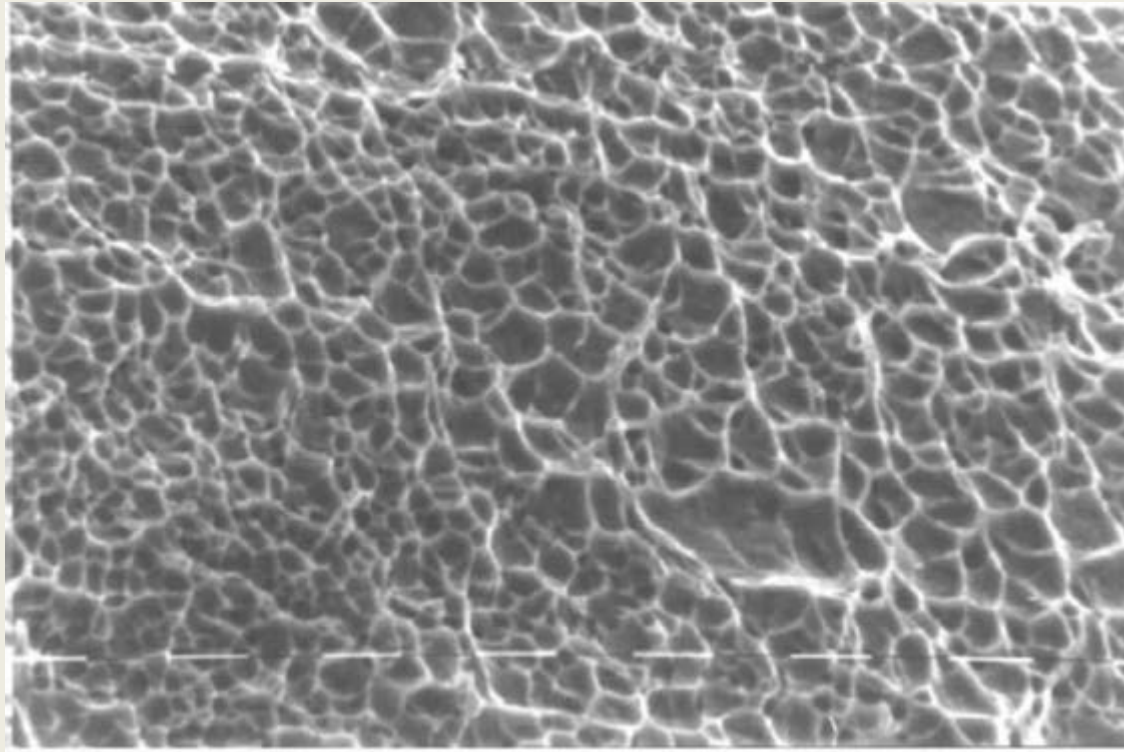
ZR = Zona Radial

Fractura de probetas de sección rectangular

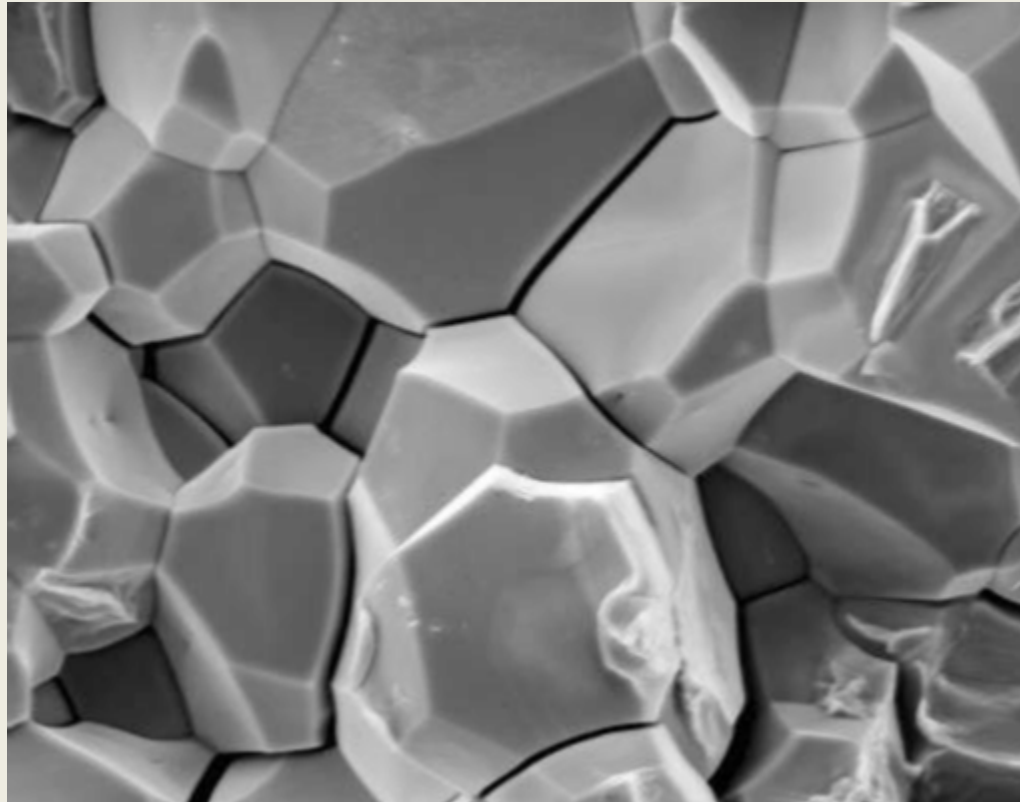
Fractura por clivaje. Se pueden observar los característicos “ríos de clivaje” (river patterns). Un conjunto de ríos dentro de un grano cristalino corresponde a escalones entre planos de clivaje pertenecientes a una misma familia cristalográfica. Los ríos convergen según el sentido de propagación en cada grano cristalino. Escala : 10 μm .



Fractura dúctil de un acero de bajo carbono. Se notan las cavidades (dimples) que son la resultante de la coalescencia de microcavidades iniciadas alrededor de inclusiones, partículas o discontinuidades que originan una concentración de tensiones y un aumento local de la deformación plástica. Escala : 10 μm .



La fragilización intergranular de un metal puede ocurrir como resultado de un conjunto de procesos que afectan directamente el límite de grano y que convierte a estas zonas en la zona más débil de toda la estructura cristalina. Fractura intergranular de una muestra de titanio traccionado en una solución de yodo en metanol. Se notan claramente los distintos granos descohesionados.

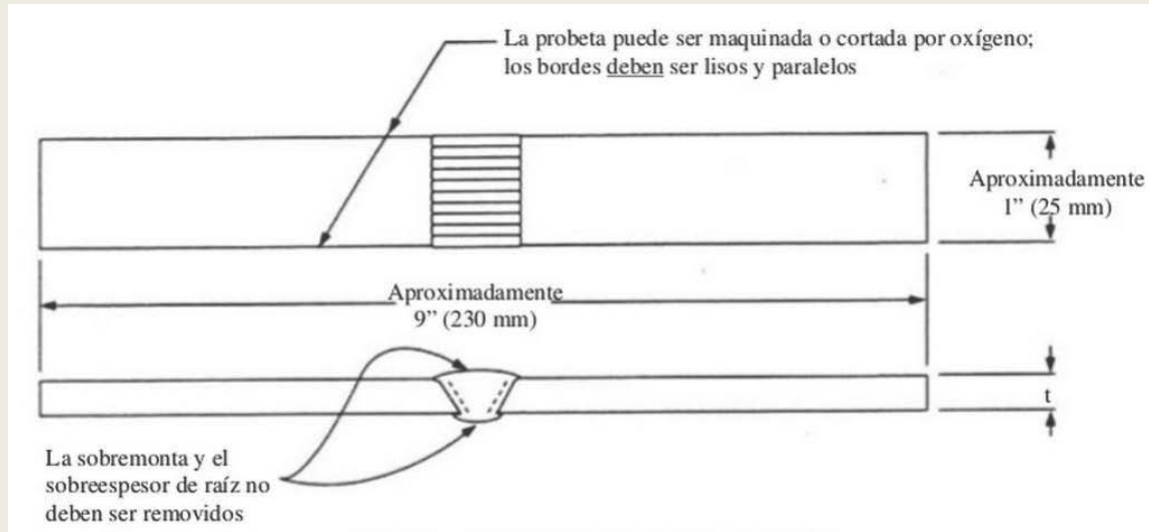


- **Aplicación en ensayos para calificación de procedimientos de soldadura**

Outside Diameter of Pipe		Number of Specimens					
in.	mm	Tensile Strength	Nick Break	Root Bend	Face Bend	Side Bend	Total
Wall Thickness ≤ 0.500 in. (12.7 mm)							
<2.375	<60.3	0 ^b	2	2	0	0	4 ^a
2.375 to 4.500	60.3 to 114.3	0 ^b	2	2	0	0	4
>4.500 to 12.750	>114.3 to 323.9	2	2	2	2	0	8
>12.750	>323.9	4	4	4	4	0	16
Wall Thickness > 0.500 in. (12.7 mm)							
≤4.500	≤114.3	0 ^b	2	0	0	2	4
>4.500 to 12.750	>114.3 to 323.9	2	2	0	0	4	8
>12.750	>323.9	4	4	0	0	8	16

^a One nick break and one root bend specimen are taken from each of two test welds, or for pipe less than or equal to 1.315 in. (33.4 mm) in diameter, one full-section tensile strength specimen is taken.

^b For materials with SMYS's greater than the material specified as API 5L Grade X42, a minimum of one tensile test is required.



Dimensiones de espécimen de tracción

Fuente: (API 1104, Welding of Pipelines and Related Facilities, 2010, Pág. 12)

Rotura en el cordón de soldadura



Rotura fuera del cordón de soldadura



Ensayo de tracción (determinación de la resistencia máxima o UTS)

La probeta debe ser sometida a tracción y la resistencia se obtendrá como resultado de dividir la máxima carga obtenida antes de la falla por la mínima sección transversal de la probeta medida antes del ensayo.

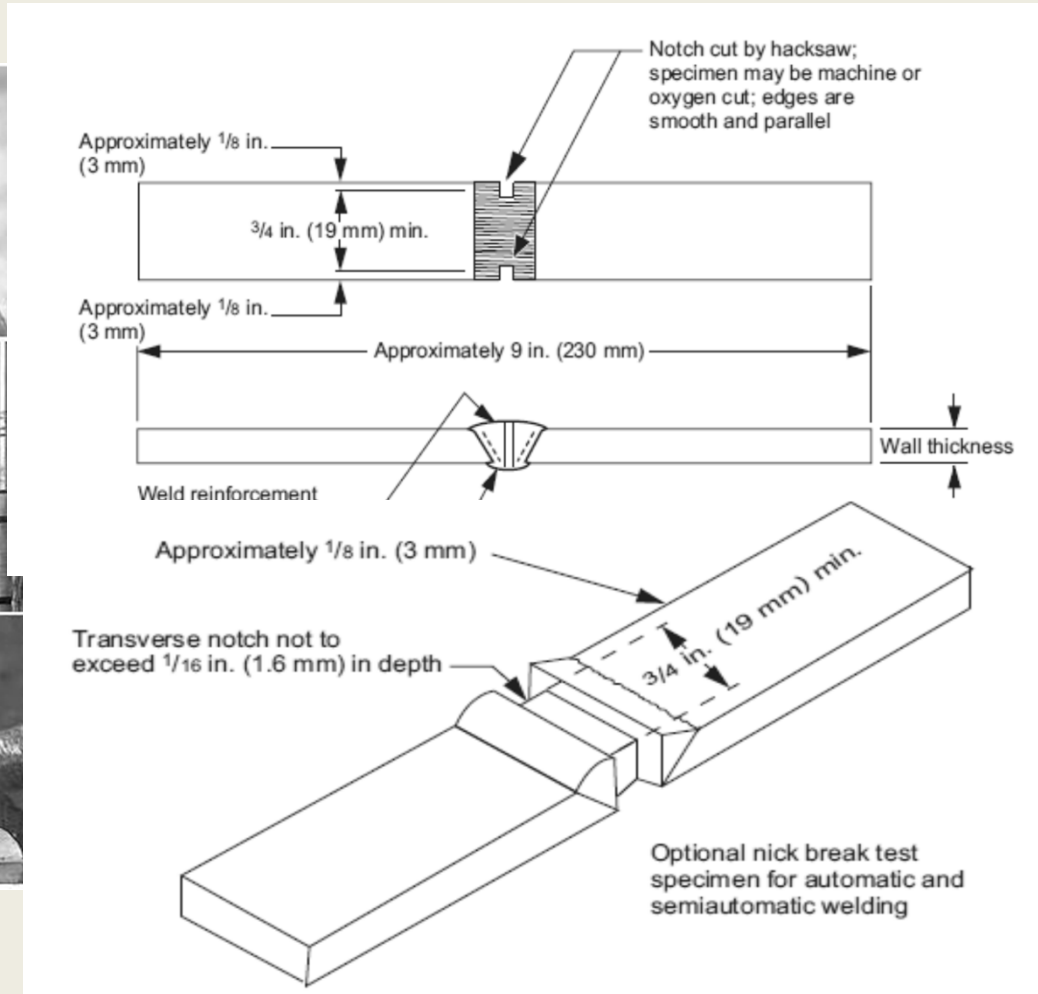
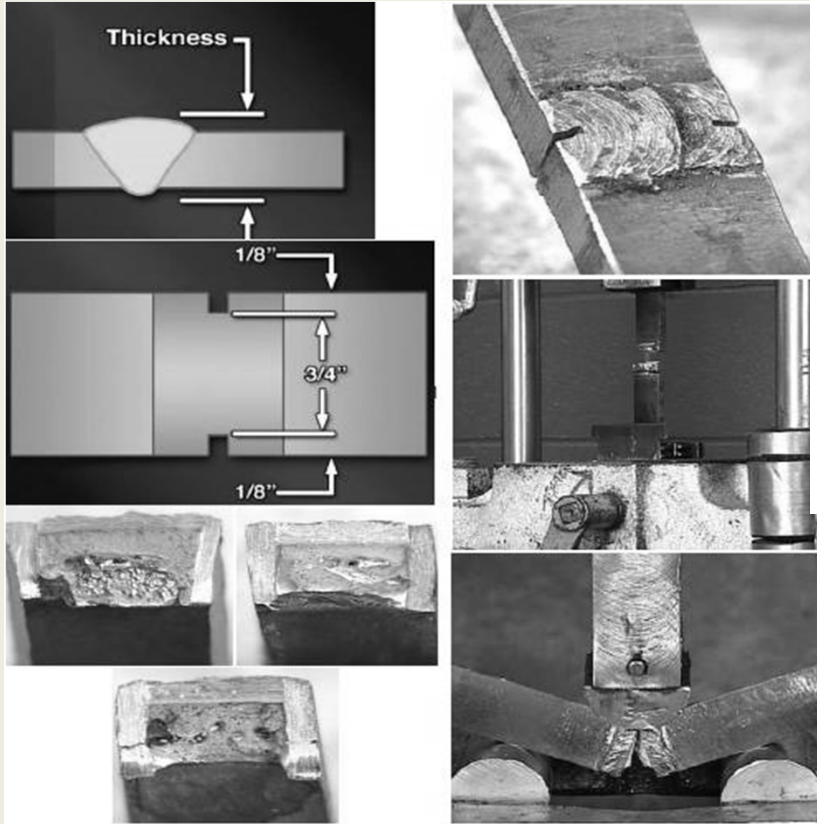
Criterios de aceptación del ensayo:

Se toma SMTS (Specified Minimum Tensile Strength) correspondiente al material del tubo como valor de comparación para aplicar el criterio de aceptación.

- a) Si la rotura se produce fuera de la soldadura (zona fundida o ZAT) se acepta un valor igual o mayor al 95% de SMTS.
- b) Si rompe en la zona de fusión o ZAT debe ser por lo menos igual a SMTS y cumplir con **criterios de aceptación de Nick Break** para ser aceptable.
- c) Si la rotura en la soldadura con un valor más bajo que SMTS se requiere un nuevo ensayo de la soldadura.

Cualquier probeta que falle debido a una preparación deficiente debe ser reemplazada y nuevamente ensayada.

Probetas para ensayo de Nick Break



Ensayos para calificación de procedimientos de soldaduras a tope

Ensayo de Nick Break

La probeta puede ser sometida a tracción, flexión o rotura por impacto para provocar la rotura en la zona entallada.

Criterio de aceptación del ensayo:

- a) Las superficies expuestas deben mostrar completa penetración y fusión.
- b) La mayor inclusión de gas no debe exceder 1,6 mm y todas las inclusiones de gas sumadas no deben exceder el 2 % del área expuesta.
- c) Las inclusiones de escoria pueden ser como máximo 0,8 mm de profundidad, y 3 mm o la mitad del espesor de pared en longitud, la que sea menor.
- d) La separación entre inclusiones de escoria debe ser al menos 13 mm medidos como se indica en la figura.
- e) Fisheyes como se define en AWS 3.0 no es causa de rechazo. (Pequeño poro o inclusión rodeado de un área brillante de forma redondeada atribuida a la presencia de H)

ENSAYOS DE PLEGADO DE CARA Y DE RAIZ

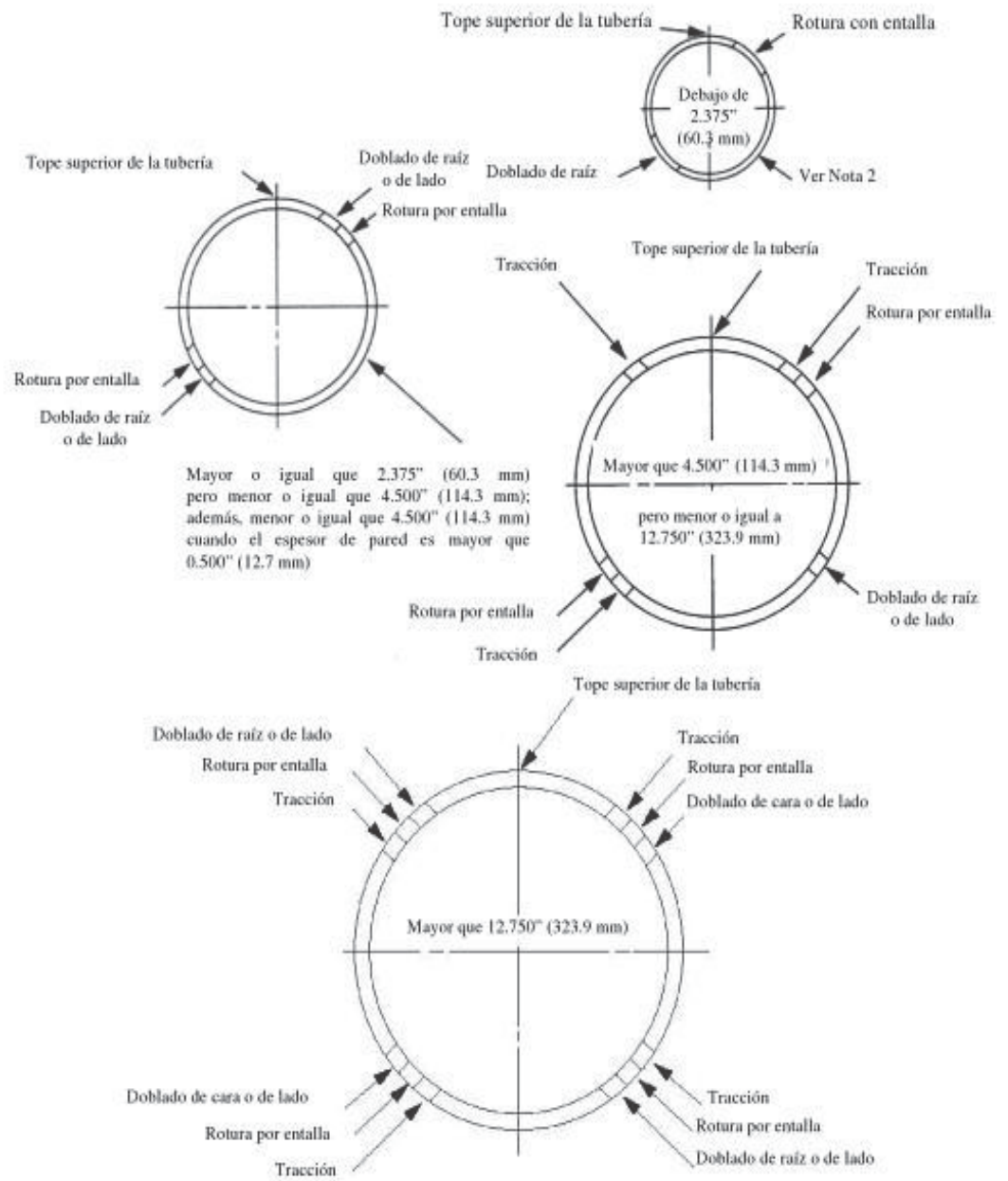


Ensayo de doblado



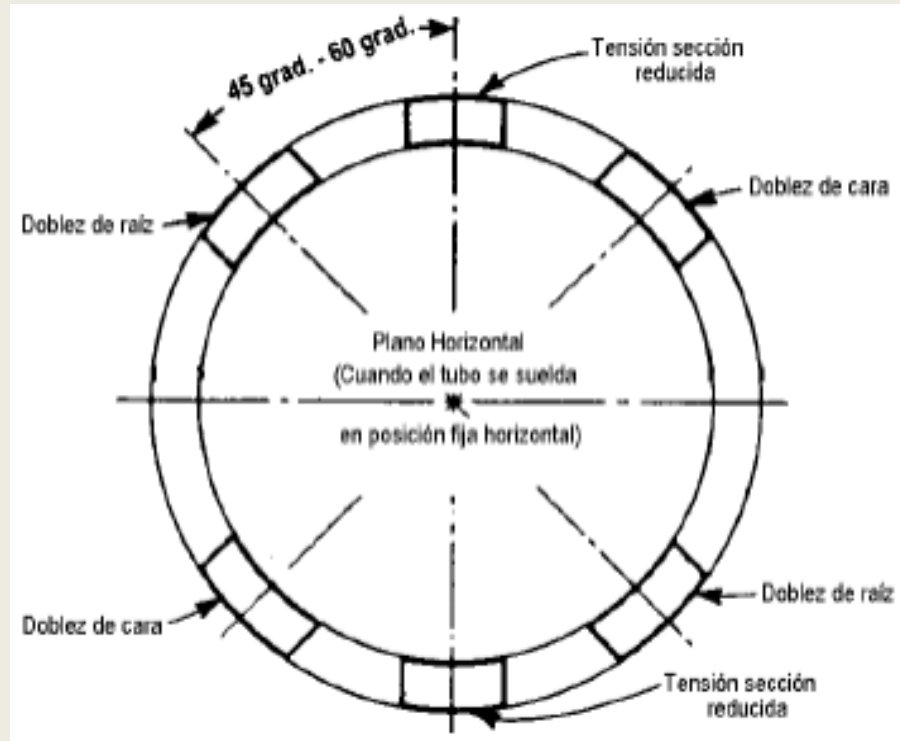
En el ensayo de plegado, la longitud de fisura debe ser inferior a los 3mm para considerarse satisfactorio.

Para la calificación de soldador Localización de probetas para los ensayos destrutivos en soldadura a tope



Notas:

1. Como opción de la compañía, las ubicaciones pueden ser rotadas, siempre que estén espaciadas igualmente alrededor de la tubería; no obstante, las probetas **no deben** incluir la soldadura longitudinal.
2. Una probeta de tracción de sección completa puede ser usada para tubería con un diámetro exterior menor o igual a 1.315 pulg. (33.4 mm).



Ensayos requeridos por la sección IX del Código ASME para la calificación de procedimiento de soldadura de tuberías.

Técnicas de ensayo en uniones de polietileno-Calificación fusionistas

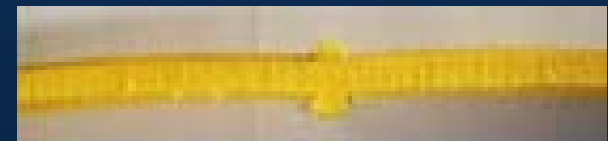
EXAMEN VISUAL

- Simetría del cordón
- Alineación de partes soldadas
- Ancho del cordón de soldadura
- Limpieza
- Defectos superficiales
- Material fundido fuera del accesorio



DOBLADO

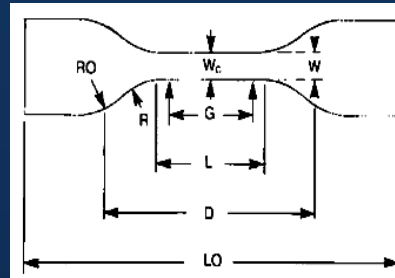
- Procedimiento manual sencillo.
- Objetivo



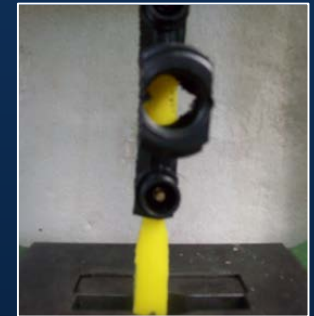
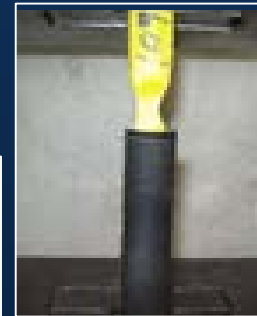
Revisión de técnicas de ensayo de uniones

TRACCIÓN

- Tres Variantes



- Probetas durante el ensayo



Criterios de evaluación de resultados

EXAMEN VISUAL

- Cordón uniforme
- Alineación correcta
- Limpieza
- Ausencia defectos superficiales
- Ausencia de material fundido fuera accesorios

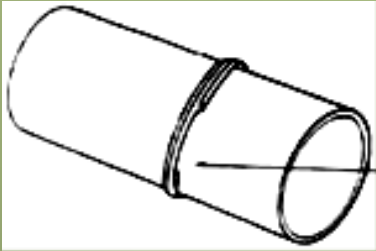
ENSAYO DE DOBLADO

- No debe haber separación ni defectos en la zona de fusión.

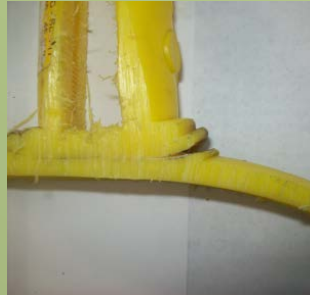


Criterios de evaluación de resultados

CAUSALES DE FALLA



Deficiencia del cordón por frentado incorrecto



Fusión incompleta debida a un incorrecto posicionamiento del accesorio o aplicación irregular de la fuerza de apriete



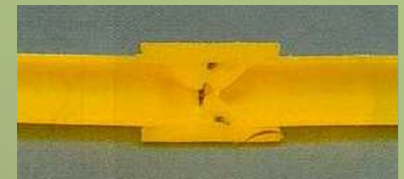
Exceso de temperatura de fusión



Alineación incorrecta



Deficiencia del cordón exterior por presión excesiva durante el ciclo de calentamiento

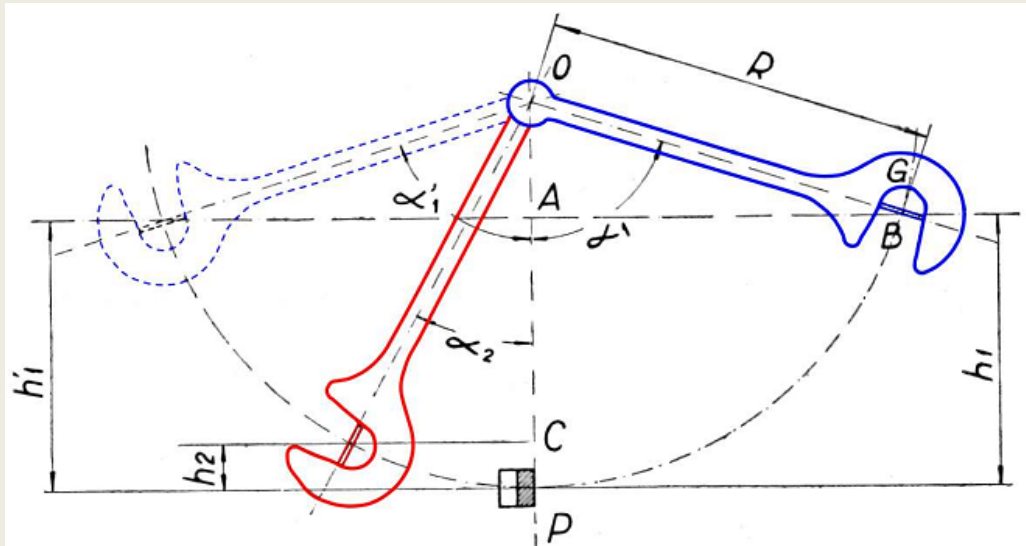


No se usó el calibrador de profundidad

Ensayo de Impacto



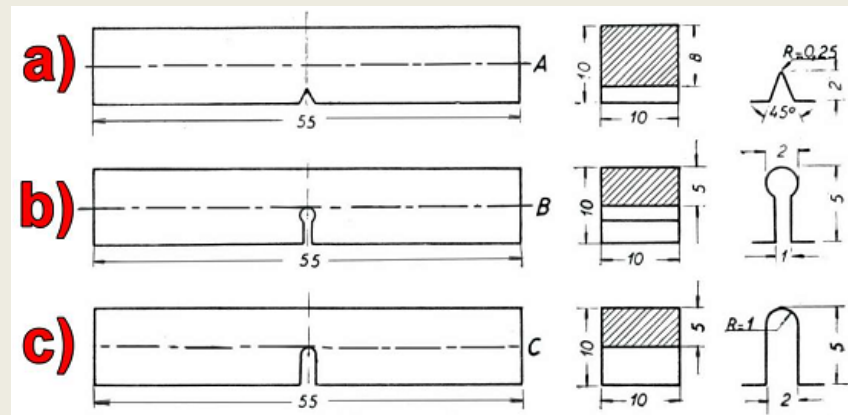
Principio de funcionamiento de un péndulo de ensayo de impacto



La resistencia al impacto es igual al trabajo gastado por unidad de sección útil

$$K = \frac{A_0}{S} \quad \left[\frac{\text{kgm}}{\text{cm}^2} \right] \quad \text{ó} \quad \left[\frac{\text{Joule}}{\text{cm}^2} \right]$$

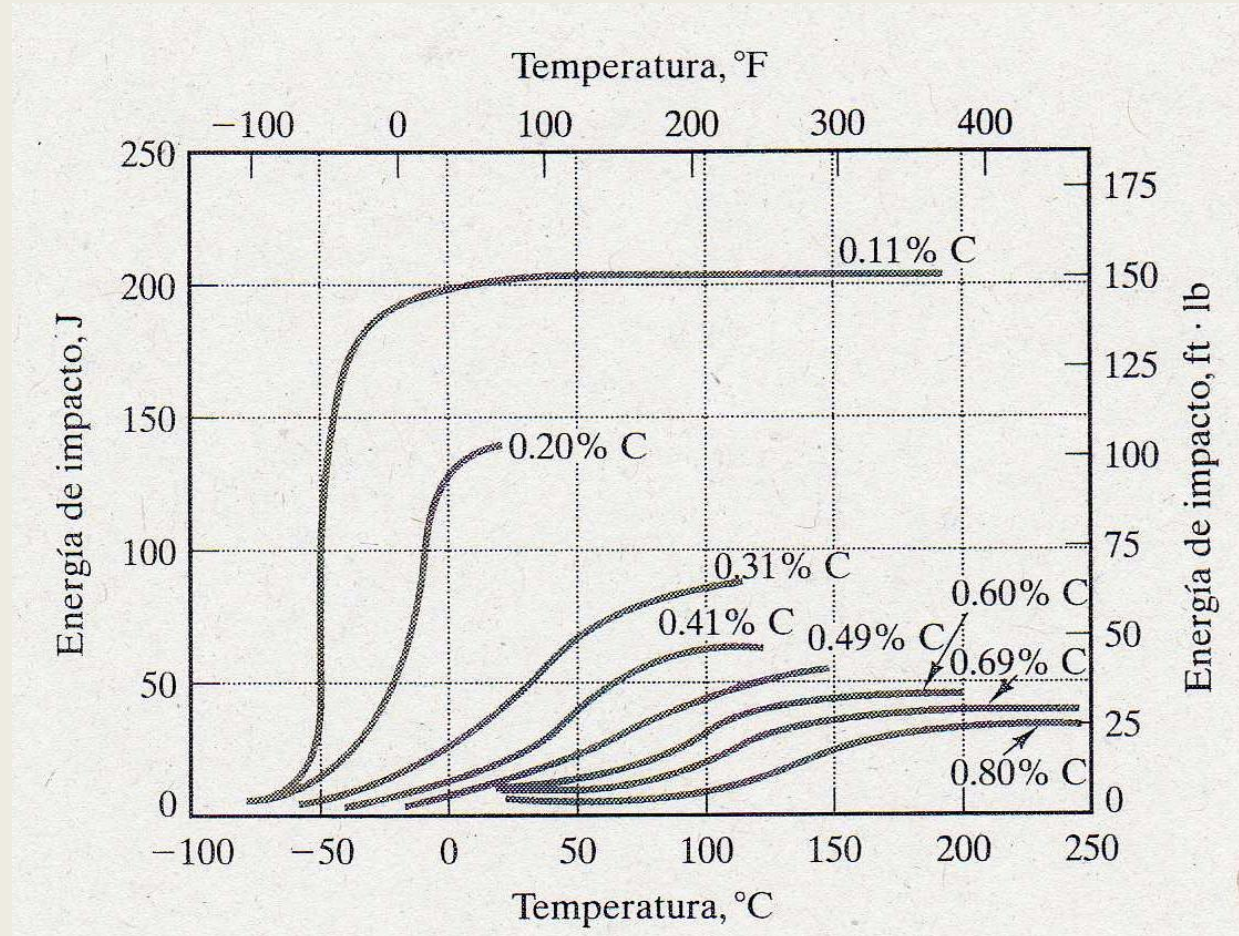
Tipos de probetas



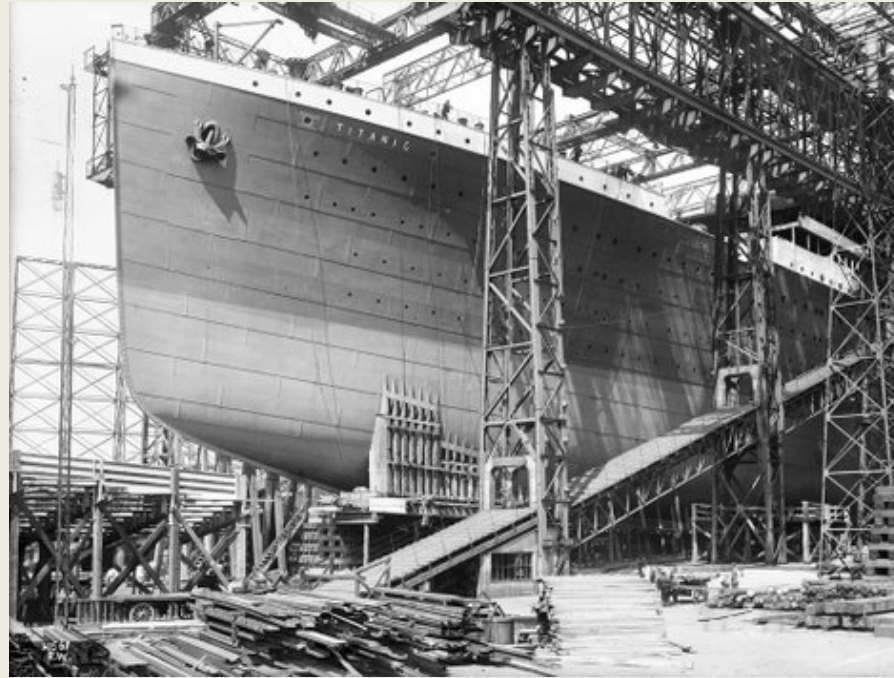
Datos del ensayo de impacto Charpy para algunas aleaciones

Aleación	Energía de impacto [J (ft·lb)]
1. Acero al carbono 1040	180 (133)
2. Acero de baja aleación 8630	55 (41)
3. c. Acero inoxidable 410	34 (25)
4. Acero de herramientas L2	26 (19)
5. Superaleación férrea (410)	34 (25)
6. a. Fundición dúctil, temple	9 (7)
7. b. Aluminio 2048, plancha	10.3 (7.6)
8. a. Magnesio AZ31B	4.3 (3.2)
b. Magnesio de moldeo AM100A	0.8 (0.6)
9. a. Ti-5Al-2.5Sn	23 (17)
10. Bronce al aluminio, 9% (aleación de cobre)	48 (35)
11. Monel 400 (aleación de níquel)	298 (220)
13. Aleación de soldadura 50:50 (aleación de plomo)	21.6 (15.9)
14. Nb-1Zr (metal refractario)	174 (128)

Variación de la T^a de transición dúctil-frágil con la composición del acero



El análisis de fallos del Titanic



La temperatura de transición entre dúctil y frágil era muchas más alta que la que se encontraban en los actuales aceros (Ensayo de impacto Charpy)

METALOGRAFÍA

Esmerilado



Papeles para esmerilado manual



Paños de pulido

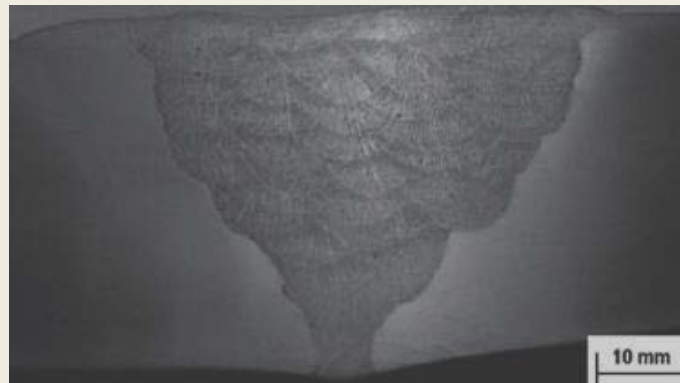


microscopio metalográfico

ENSAYOS DE MACROESTRUCTURA

El ensayo de macroestructura consiste en preparar un espécimen el cual es cortado transversalmente al cordón de soldadura, después se realiza un pulido superficial y se aplica un ácido (ácido nítrico al 5%), con el objetivo de dar un contraste entre la soldadura y el material base, con esto se puede determinar sin utilizar instrumentos de aumento visual, la penetración del cordón de soldadura, el estado de las capas del cordón de soldadura, el tamaño de la zona afectada por el calor, y la presencia y distribución de discontinuidades.

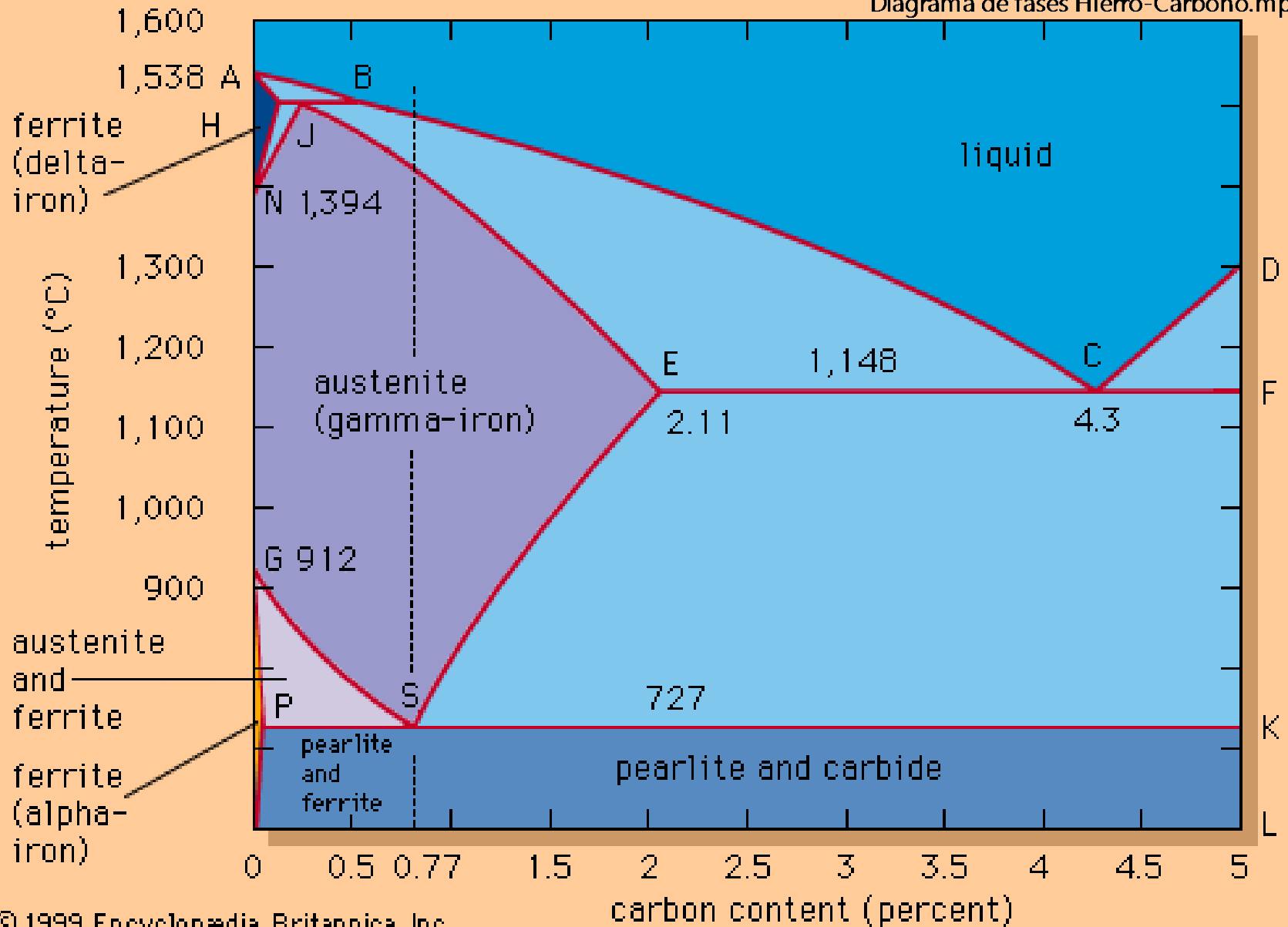
Macrografía de junta soldada



ACEROS AL CARBONO

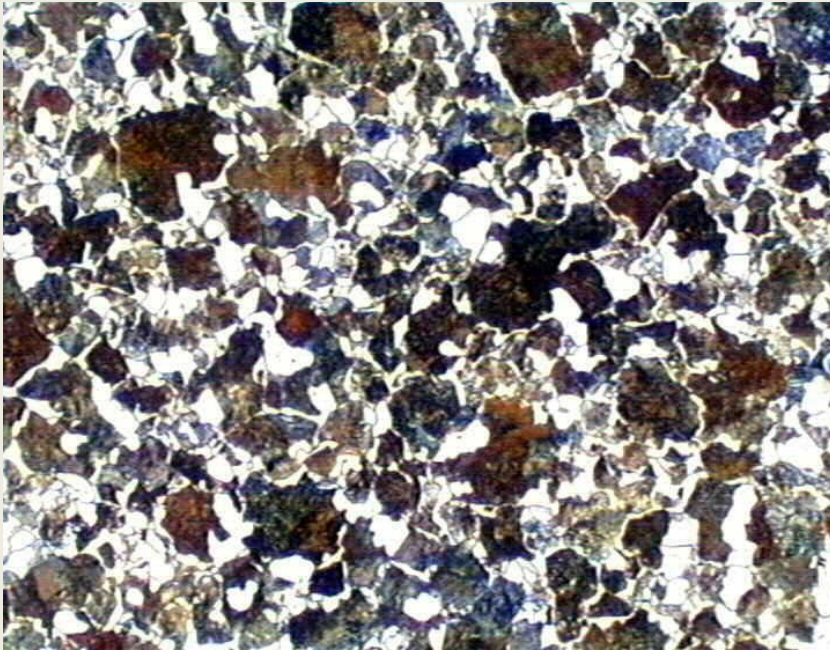


Diagrama de fases Hierro-Carbono.mp4

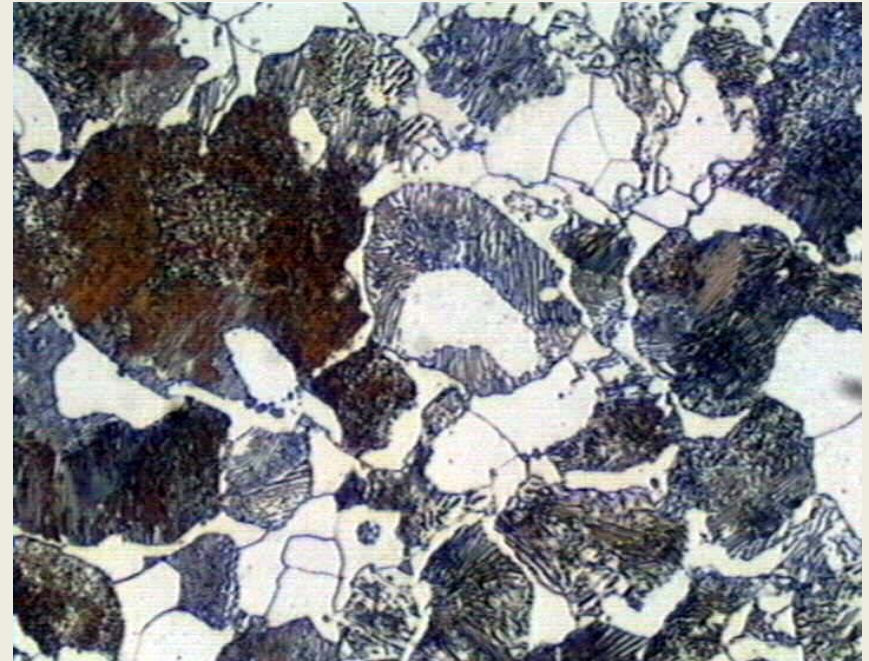


ACERO DE UN 0,35 % C

Laminado en caliente y enfriado desde 870°C en el horno (recocido)



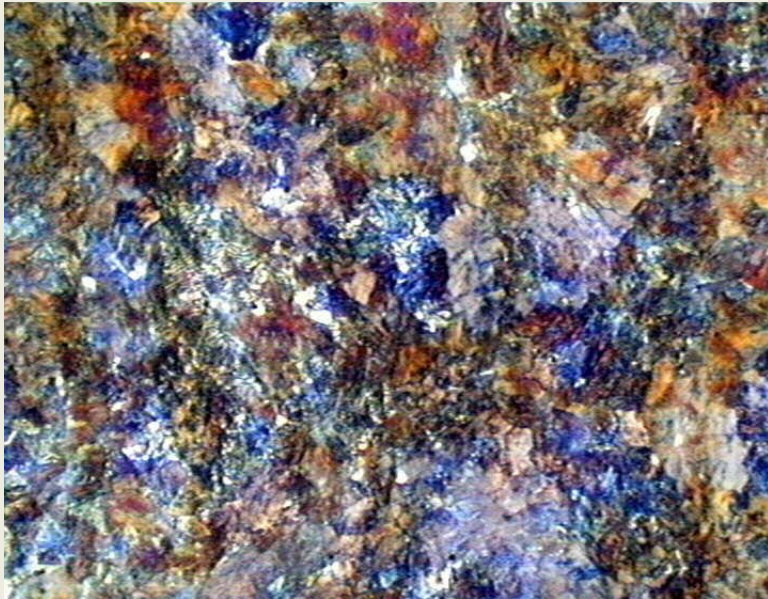
La *austenita* aún no transformada se va concentrando en carbono al seguir bajando la temperatura hasta llegar a alcanzar, por este proceso, la composición eutectoide del 0,8%C. Al seguir enfriando, se alcanza la temperatura de la transformación eutectoide y precipitan de esta *austenita*, simultáneamente, fase alfa (ferrita) y Fe_3C (cementita) en forma del eutectoide perlita. x100



A mayores aumentos se resuelve su estructura laminar. Por lo tanto, la microestructura está, pues, formada por colonias de *perlita* (o *zonas oscuras*) distribuidas en una matriz ferrítica (blanca). x400

ACERO DE UN 0,8 % C

Laminado en caliente, calentado a 800°C durante 1 hora y enfriado en el aire.



El enfriamiento al aire es considerablemente más rápido que en el horno, por eso la estructura final eutectoide (*perlita*) es notablemente más fina . x100



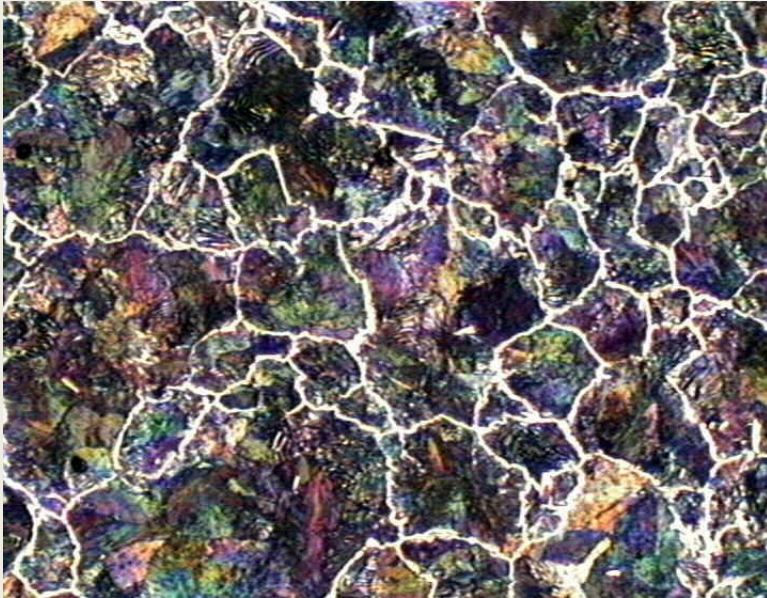
Las láminas alternas de *ferrita* y de *cementita* son más estrechas, están más próximas; tanto que sólo se resuelven a grandes aumentos las correspondientes a ciertas colonias favorablemente orientadas. x400



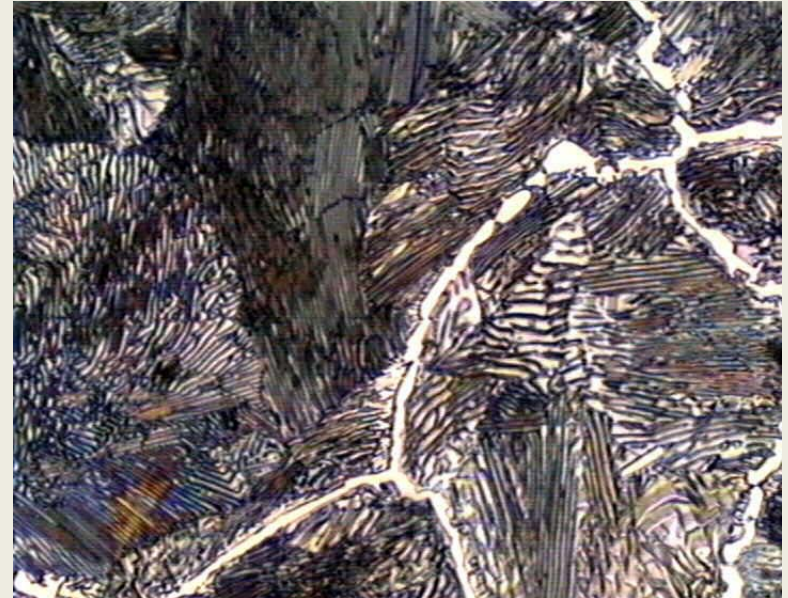
Transformación eutectoide.mp4

ACERO DE UN 1,3 % C

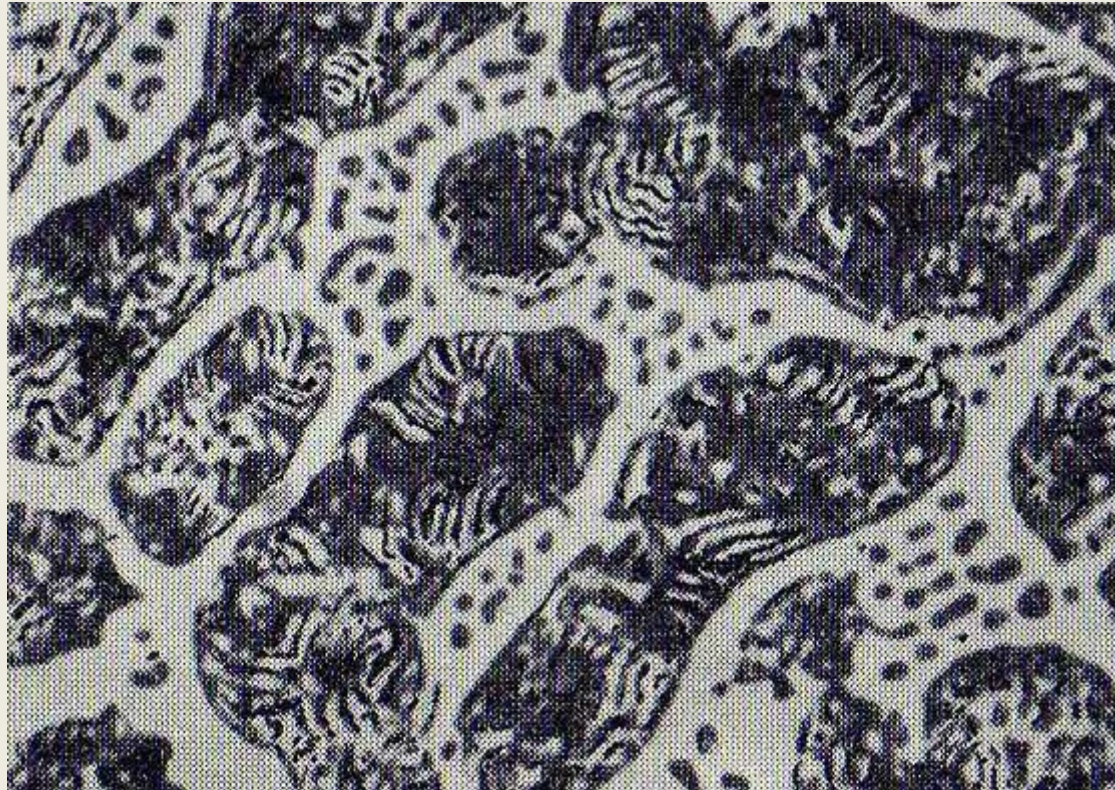
Laminado en caliente, Enfriado en el horno desde 970°C.



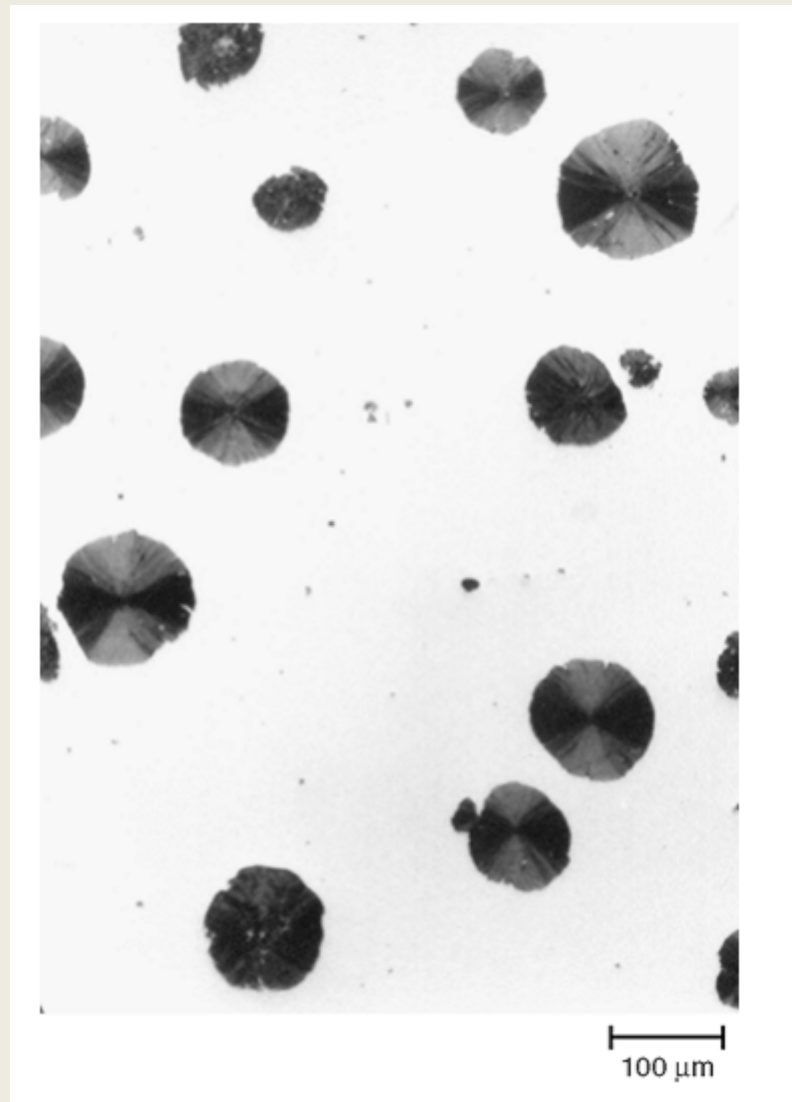
enfriado lentamente desde 970°C (*austenita homogénea*) se separa cementita Fe_3C cuando la aleación entra en el campo bifásico *austenita+cementita*. En esta cementita secundaria -que se precipita en los límites de granos austeníticos- se separa el exceso de carbono de la austenita, ya que la solubilidad del carbono en la fase gamma disminuye con la temperatura para concentraciones superiores a 0,8 % de C. . x100



Esta trama de cementita que dibuja los contornos de los granos de la austenita originaria, se puede apreciar ya a relativamente pocos aumentos, y aparece muy clara a mayores aumentos rodeando las colonias perlíticas cuya estructura está perfectamente resuelta. x400



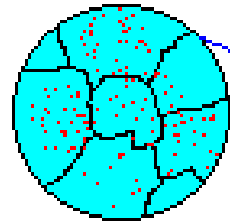
Eutectoide y compuesto intermetálico con pequeñas zonas del mismo eutectoide. Fundición blanca hipoeutéctica. Austenita transformada(en perlita) y ledeburita transformada. Ataque con nital. Aumento 400×.



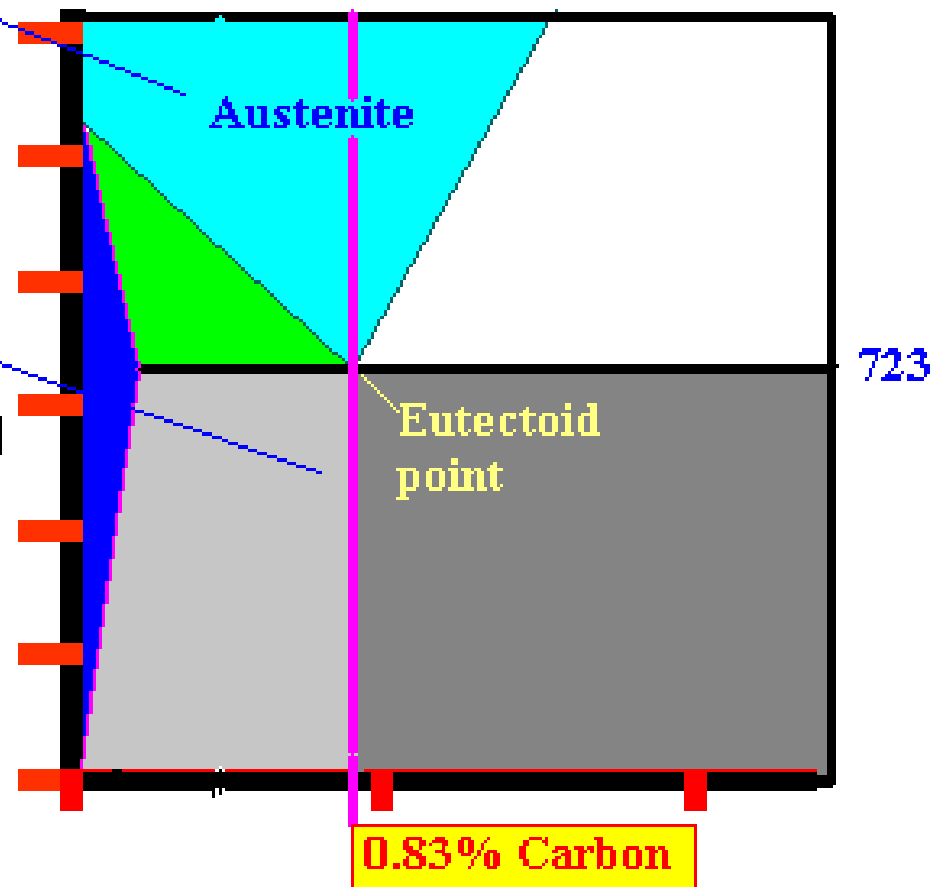
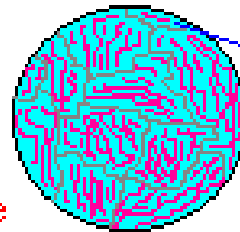
As-cast ductile iron. Nodular graphite size is 100 μm . As-polished. 100 \times

Changes that occur in a 0.83 % Carbon alloy as it is cooled from 1000 degrees

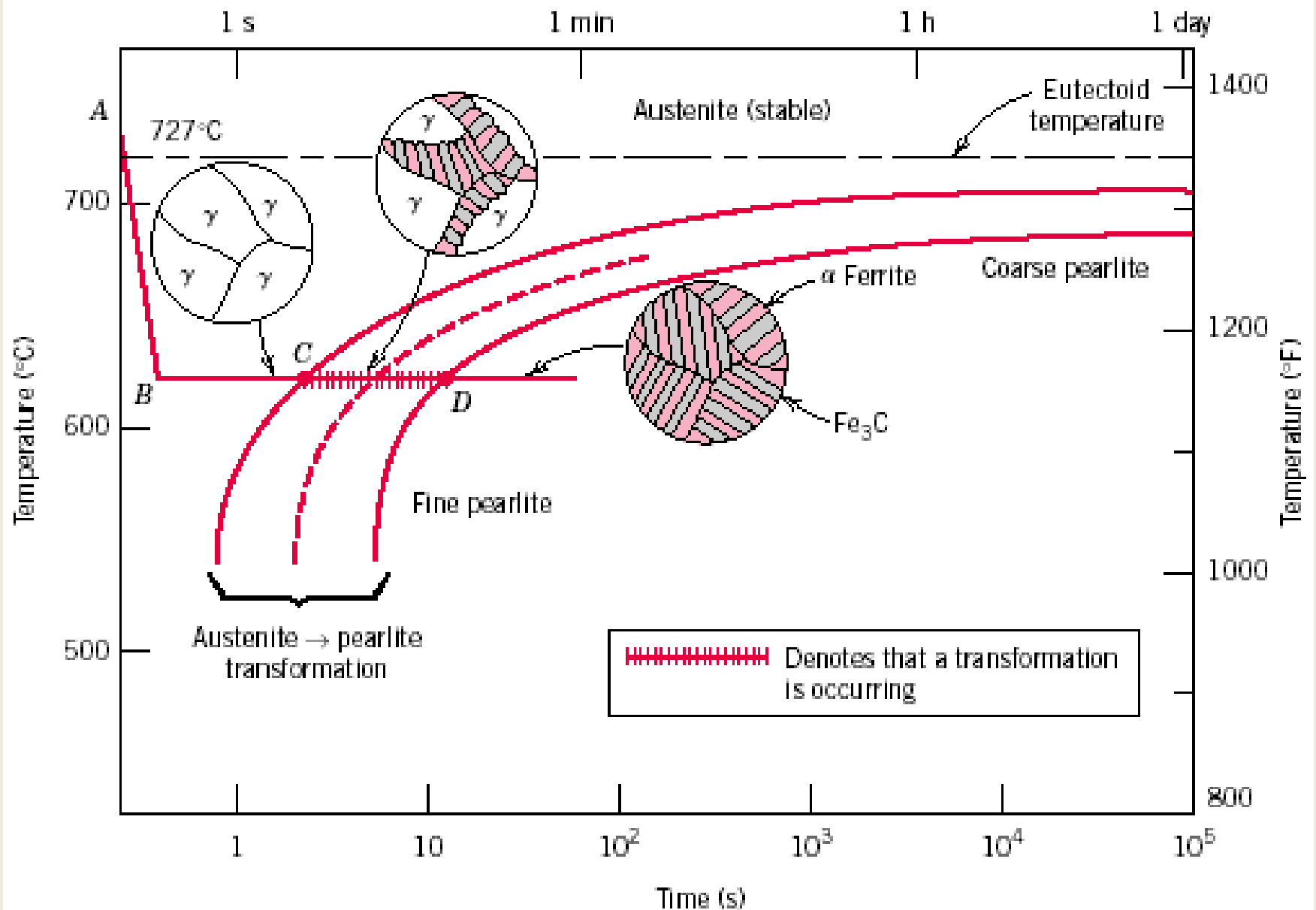
Due to their being so much Carbon dissolved in the FCC austenite structure the BCC Ferrite cannot begin to form.



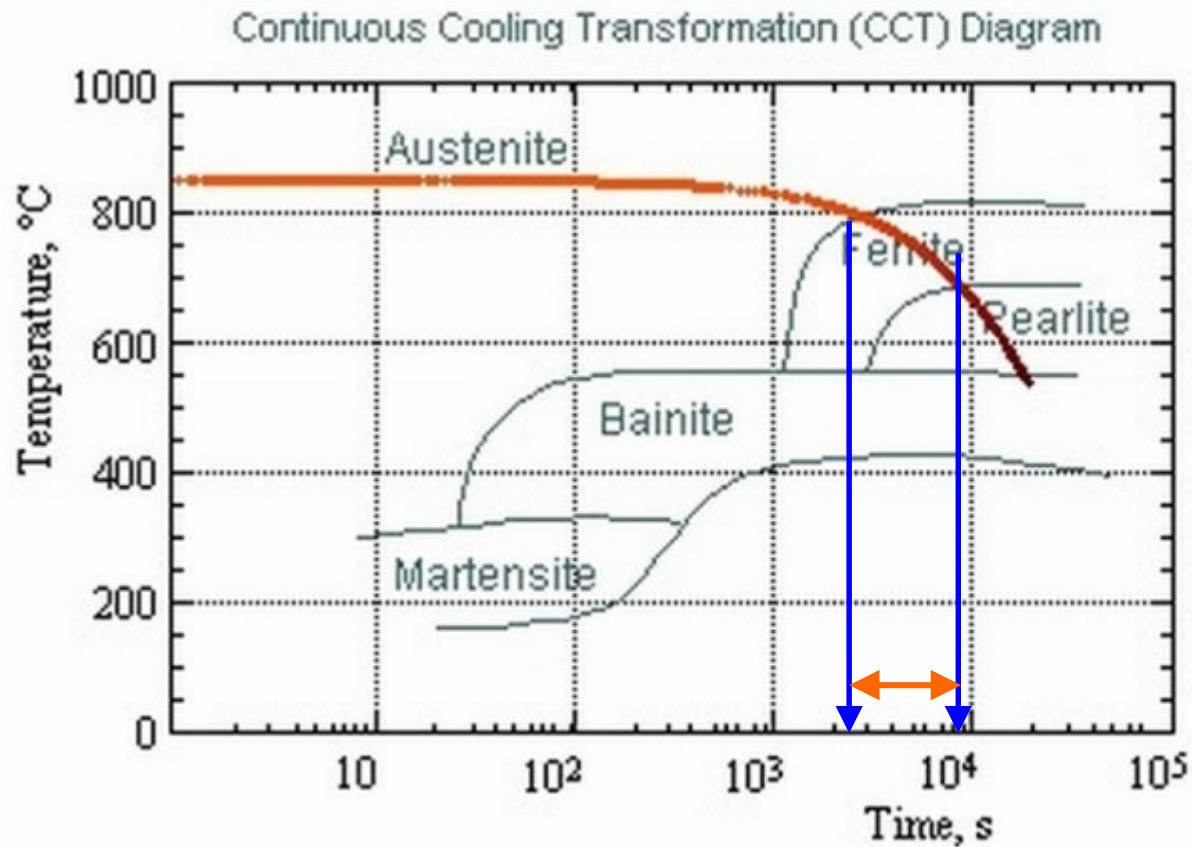
Below 723 deg. the excess Carbon is taken into the cementite (Fe_3C) as the cementite grows in thin layers. It draws the Carbon from all around it allowing the austenite to form Ferrite. This ends up a Lamellar structure with with alternate layers of Ferrite and Cementite in the ratio of 7 parts ferrite to one part Cementite (Fe_3C).



Cinética de la transformación. Curvas TTT.



Slow Cooling



18803s, 538°C



Slow cool

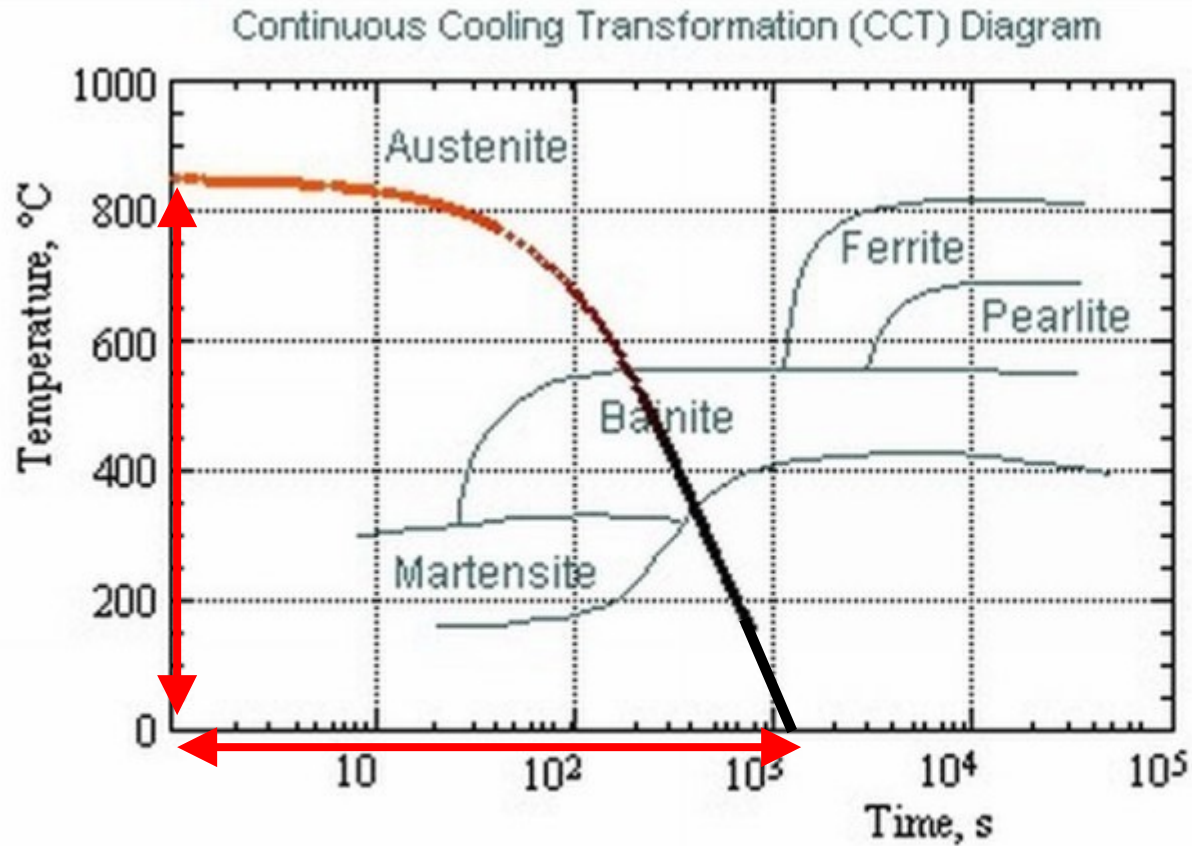
Medium cool

Fast cool

Simulation rate:

Ferrite + pearlite

Medium Cooling



792s, 154°C



**Cooling Rate, R, is
Change in Temp /
Time °C/s**

Slow cool

Medium cool

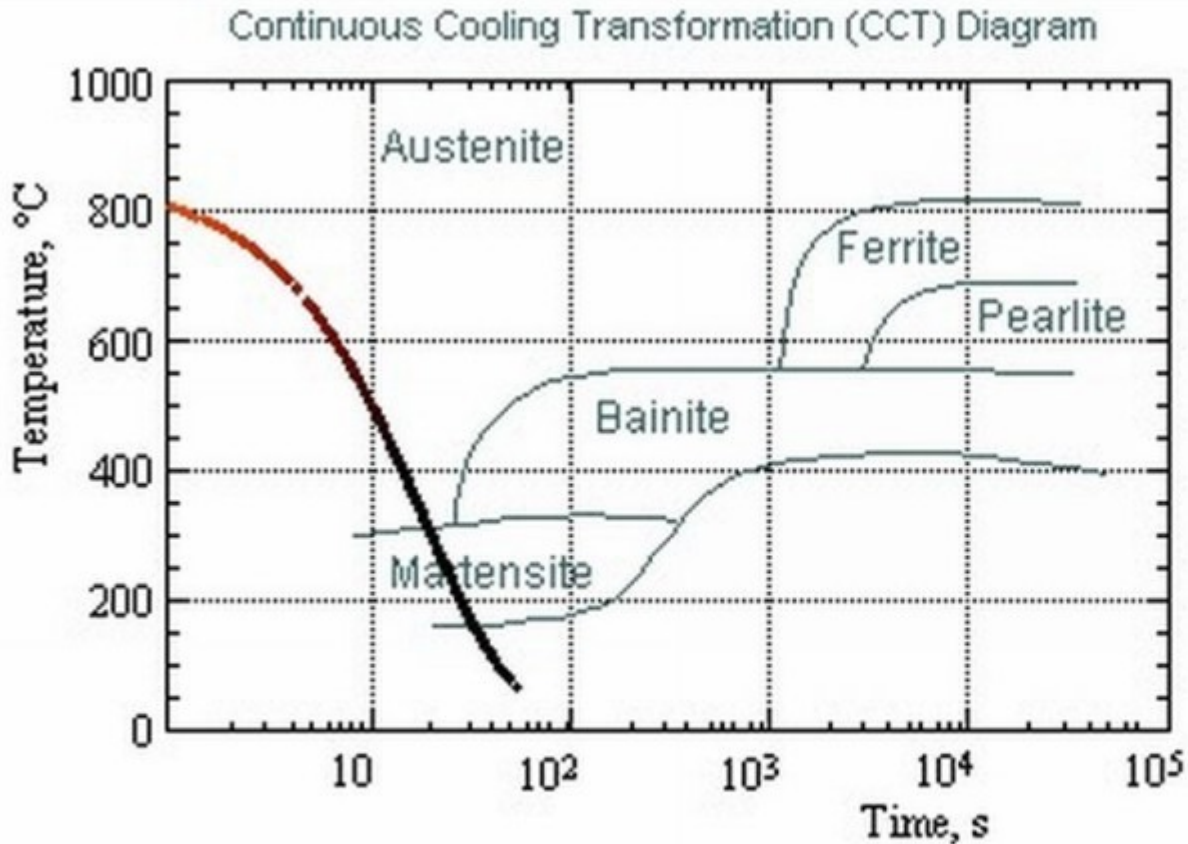
Fast cool

Simulation rate:

Start

Bainite

Fast Cooling



56s, 64°C



This steel is very hardenable... 100% Martensite in ~ 1 minute of cooling!

Slow cool

Medium cool

Fast cool

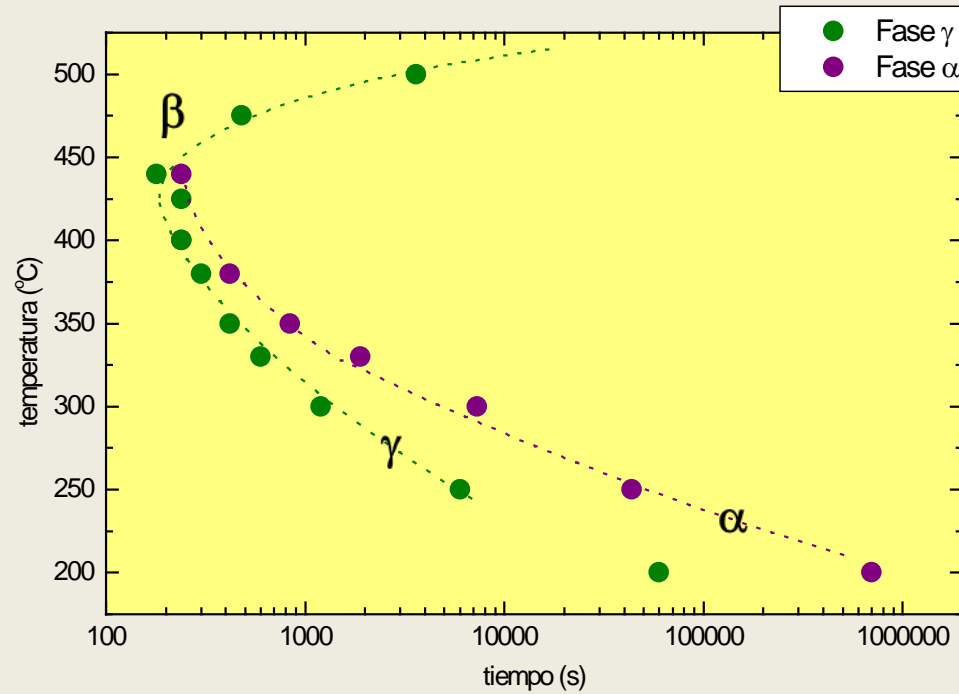
Simulation rate:

Start

Martensite

Descomposición isotérmica de aleación base cobre

☀ Aleaciones no ferrosas con memoria

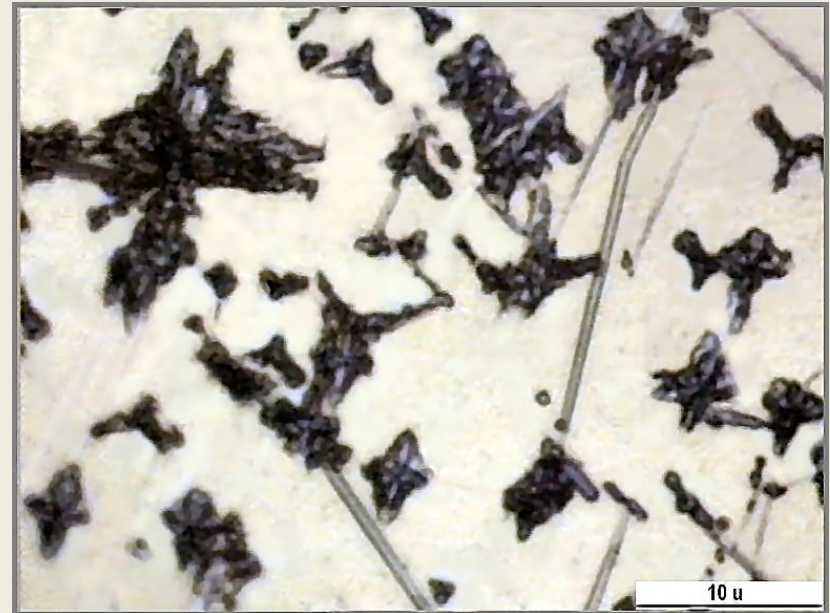


❖ Aleaciones no ferrosas con memoria

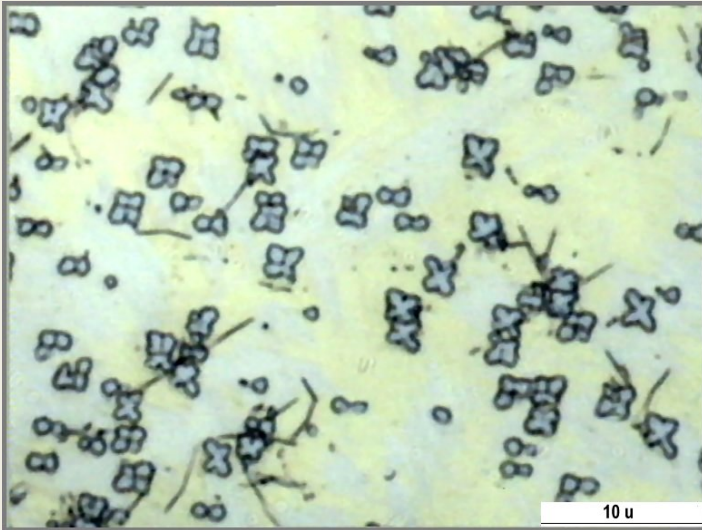
❖ Descomposición de la fase β (Cu-Zn-Al-Ti-B)



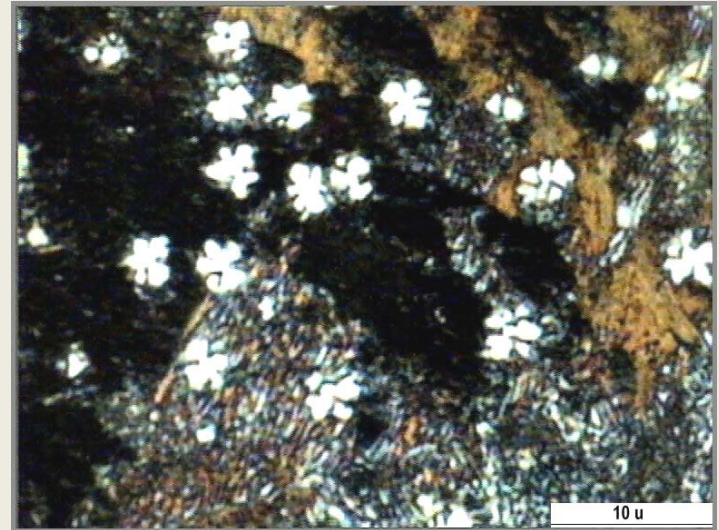
Precipitación γ en borde de grano
18000s a 250°C



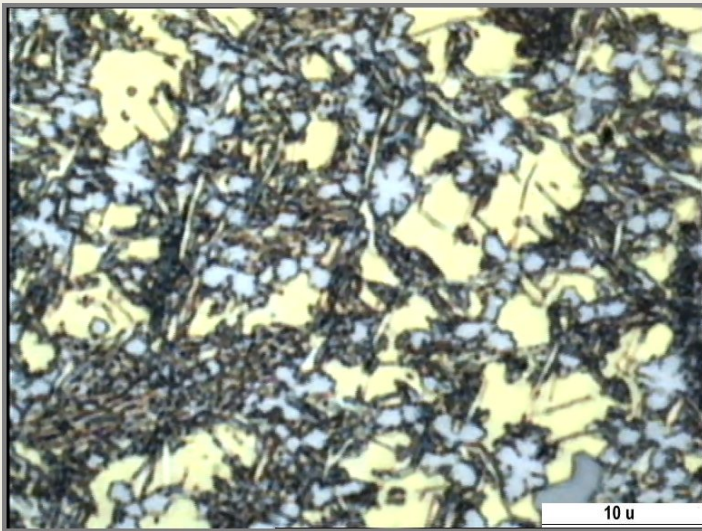
Precipitados α - 80000s a 250°C y
precipitados γ dendrifoides



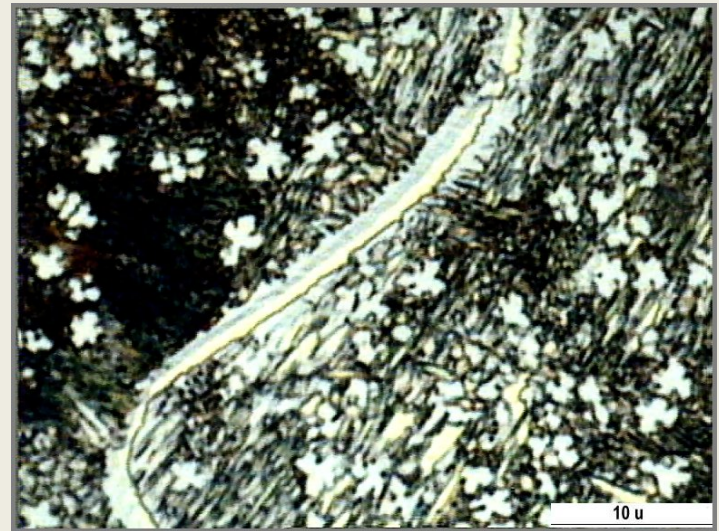
Precipitados γ y α
2400s a 350°C



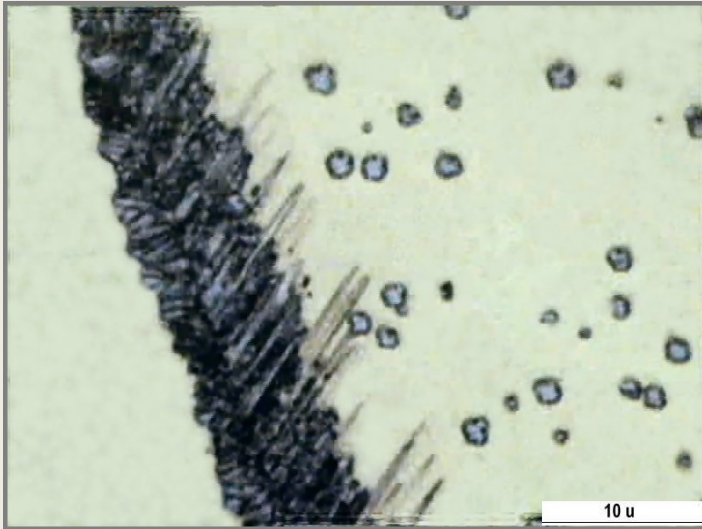
Precipitados γ con morfología arrosetada
sobre campo eutectoide, 3000s a 350°C



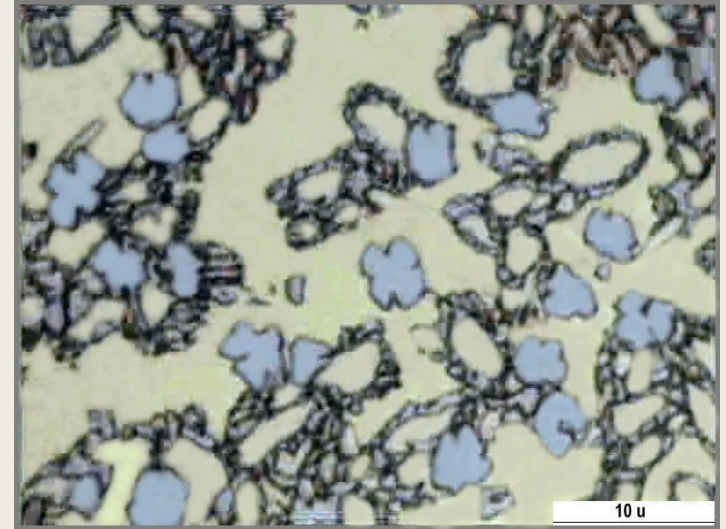
Precipitados γ , α , eutectoide y
fase matriz β , para 4800s a 350°C



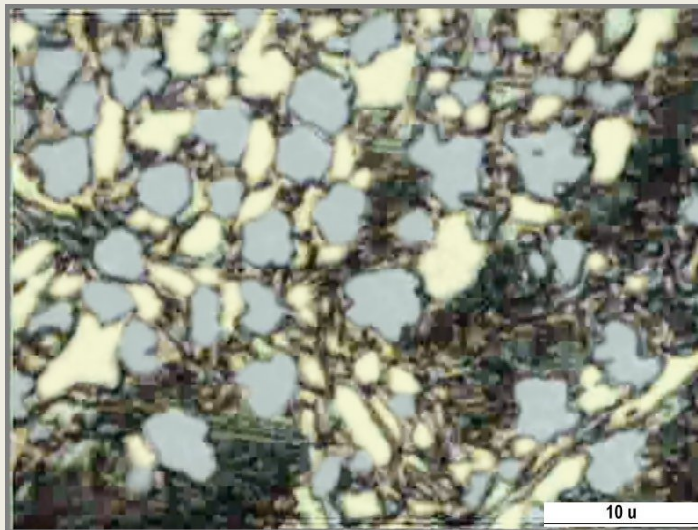
Escasez de precipitación γ , para
8000s a 350°C



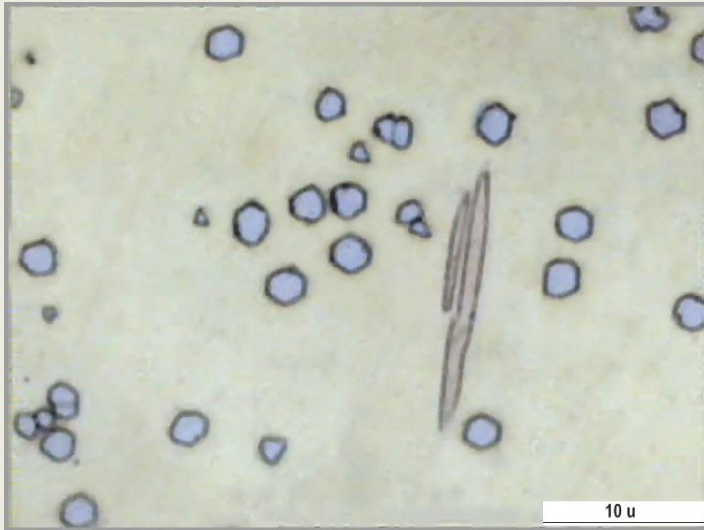
Borde de grano con γ y α , 240s a 440°C



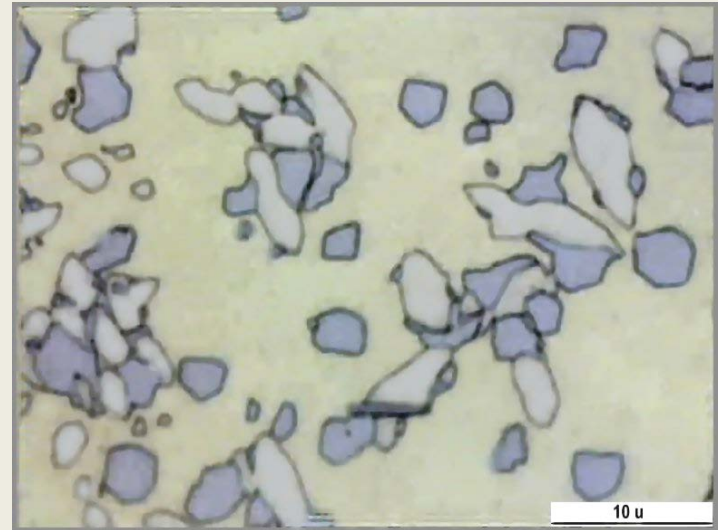
Anillos de fase α con bordes de γ , 600s a 440°C



Precipitados γ y α reticulares, 2520s a 440°C



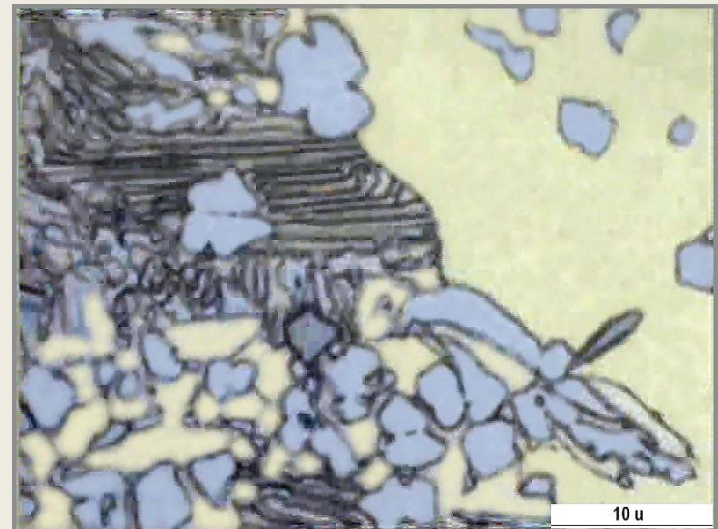
Matriz β con precipitados γ y α ,
240s a 475°C



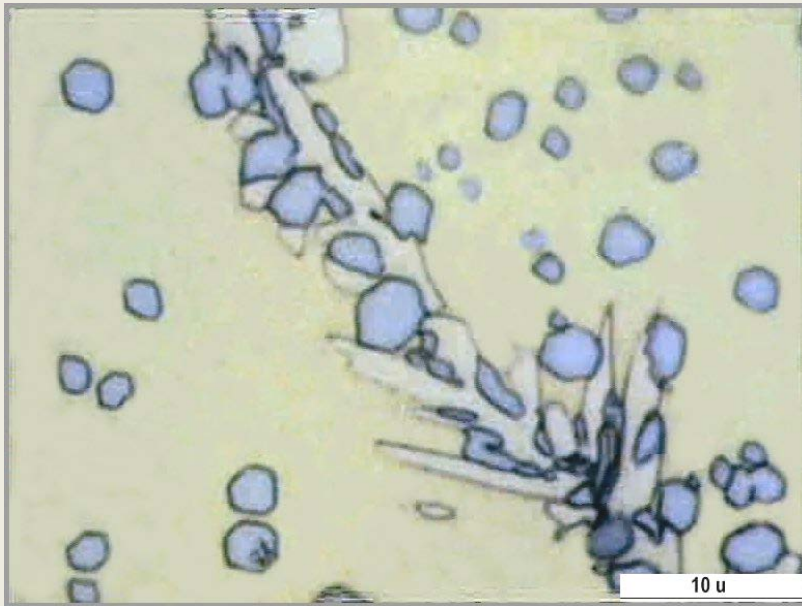
Islotes α con bordes de γ
420s a 475°C



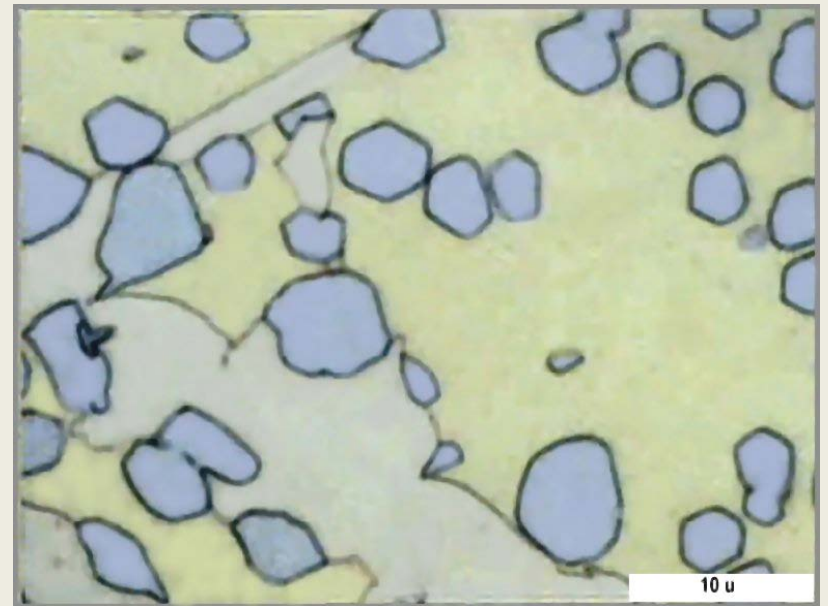
Muestra tratada 420s a 475°C



Muestra tratada 600s a 475°C



Borde de grano con precipitados γ y α , 350s a 500°C

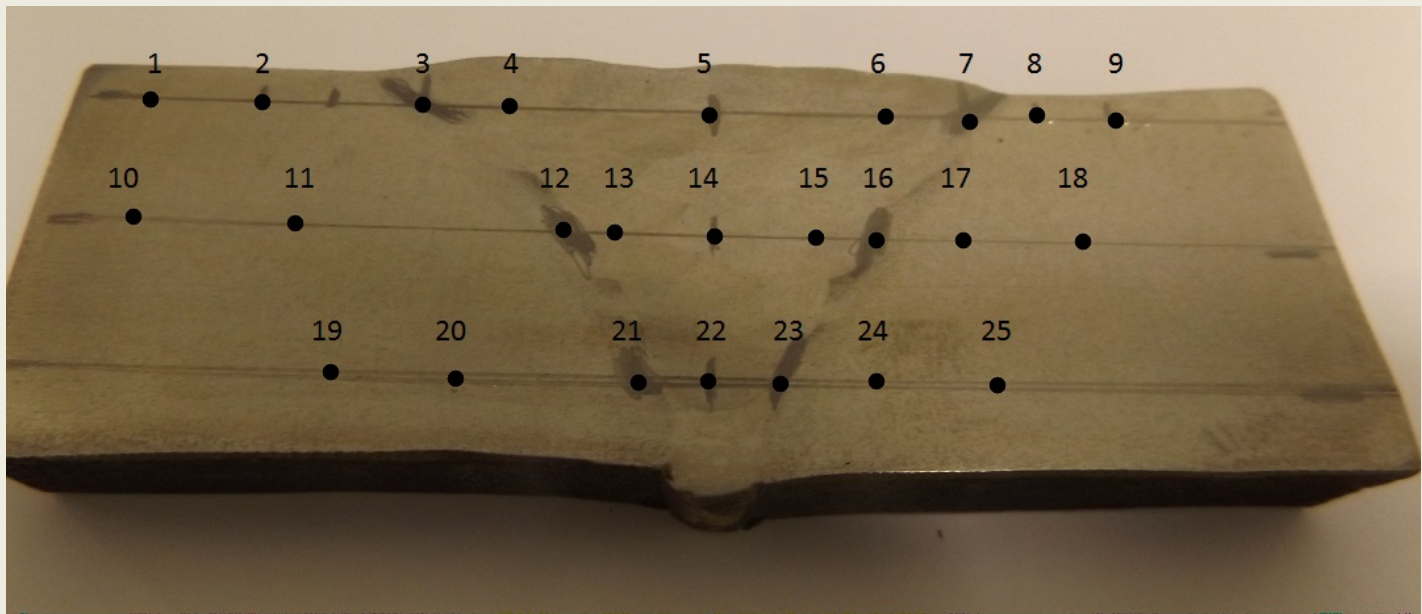


Precipitación γ y α en la matriz β , 4080s a 500°C

MICRODUREZA

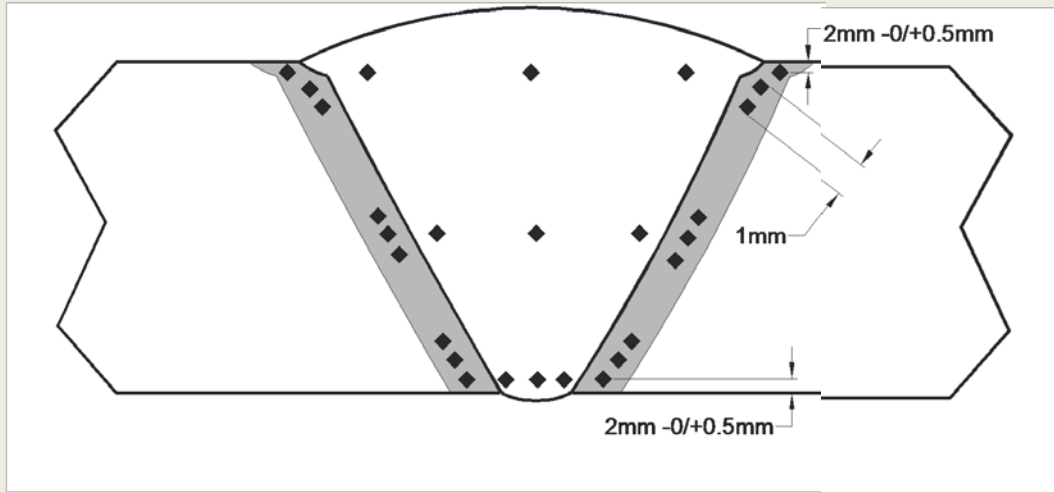


Como parte del análisis microestructural, se realizaron mediciones de microdureza Vickers en la misma muestra donde se realizó metalografía; para ello se realizó un barrido desde el metal base hacia la soldadura, en la zona transversal de la probeta de soldadura cada 50 μm .



DUREZA										Identificación				
										Muestra 1717				
NIVEL	METAL BASE (A)			ZAC (A)			APORTE			ZAC (B)			METAL BASE (B)	
Línea 1	1	2		3		4	5	6		7		8	9	
	215.	210.		353.		245.	269.	254.		333.		223.8	209.	
Línea 2	9	8		4		9	1	7		2				
	10	11		12			13			14		15	16	
Línea 2	220.	209.		354.			259.			399		215.1	228.	
	6	9		2			7					4		
Muestra 1716														
NIVEL	METAL BASE (A)			ZAC (A)			APORTE			ZAC (B)			METAL BASE (B)	
Línea 1	1	2		3		4	5	6		7		8	9	
	216.	212.		238.		248.	257.	256.		244.		202.2	205.	
Línea 2	5	1		9		4	8	7		9				
	10	11		12			13			14		15	16	
Línea 2	209.	218.		244.			241			250.		193.3	199.	
	5	2		7						4		9		

Hardness Testing API 1104



Macrosection test specimens shall be prepared for hardness testing in accordance with ASTM E384. The minimum required number of indentations shall be made using a Vickers indenter and a 10-kg load, or less at locations shown in Figure 21 through Figure 26.

¡GRACIAS!