



Curso Ciencia, Tecnología y Desarrollo Industrial:  
SOLDADURA

# Módulo 2: Comportamiento Mecánico de Uniones Soldadas

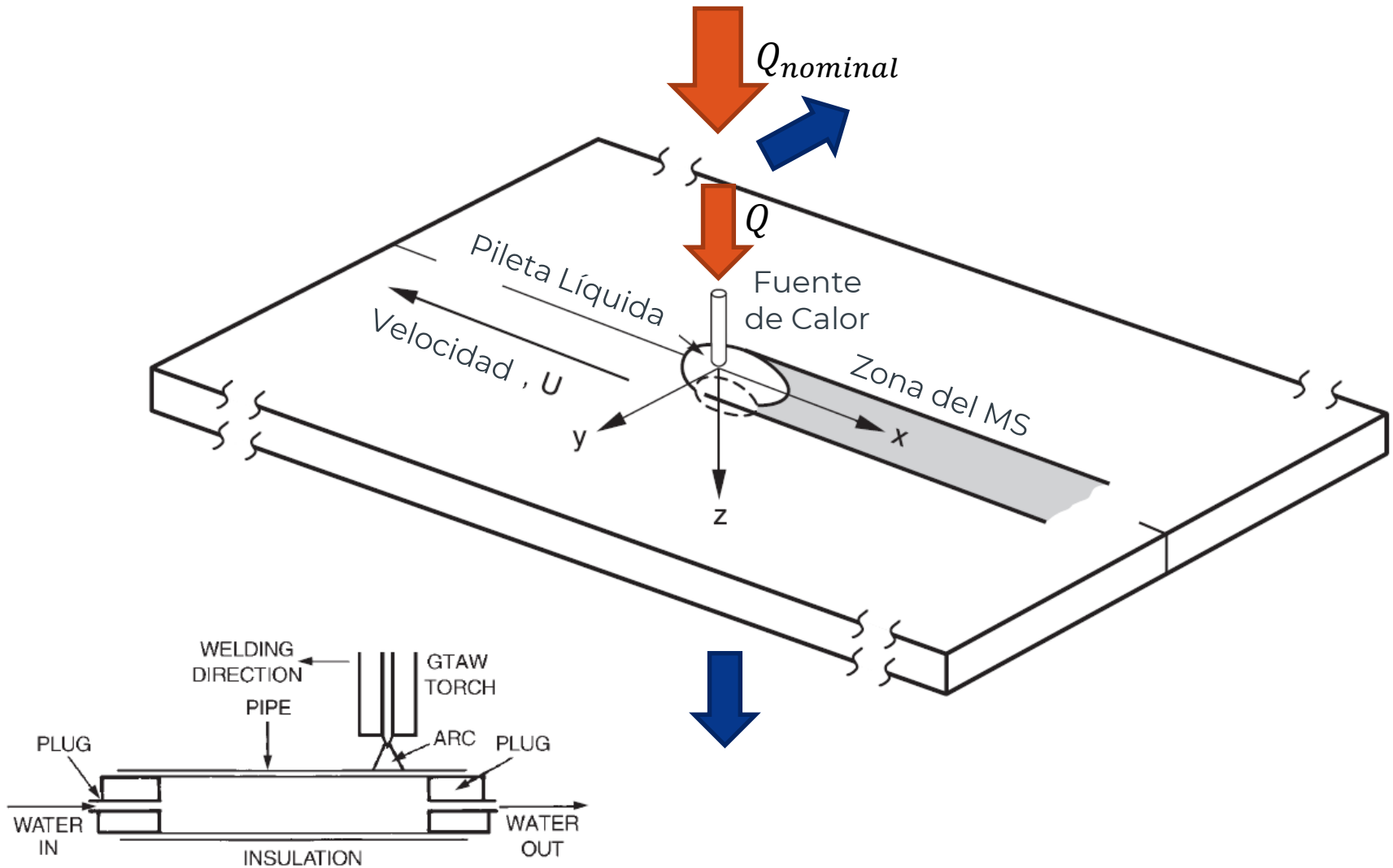
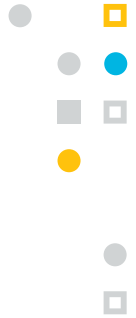


Buenos Aires | Agosto de 2022



# Ciclos Térmicos

# Transferencia de Calor durante la Soldadura



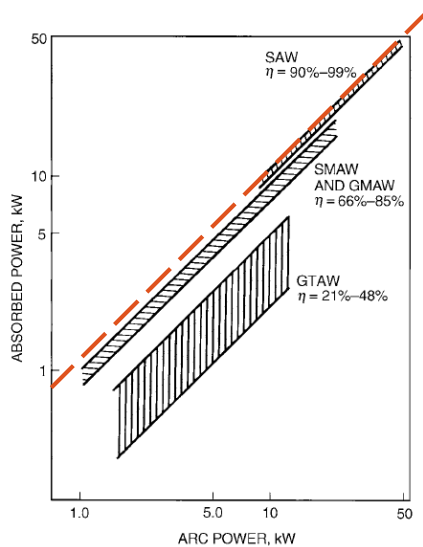
# Fuente de Calor

**Potencia (Q) [W=J/s]:** Energía transferida por unidad de tiempo.

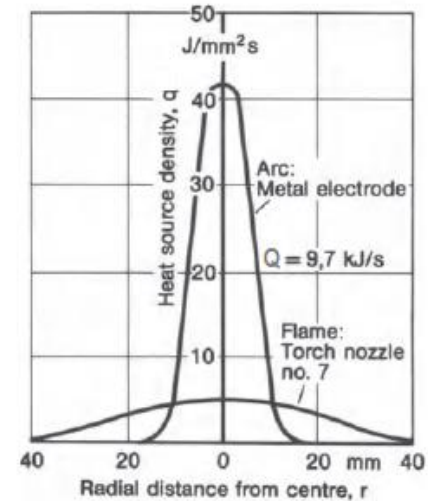
$$Q = \eta \cdot Q_{nominal} = \eta \cdot E[V] \cdot I[A]$$

**Eficiencia (de arco) ( $\eta$ ):**

$$\eta = \frac{Q}{Q_{nominal}}$$



**Densidad de potencia (q) [W/mm<sup>2</sup>= J/(mm<sup>2</sup>.s)]:**

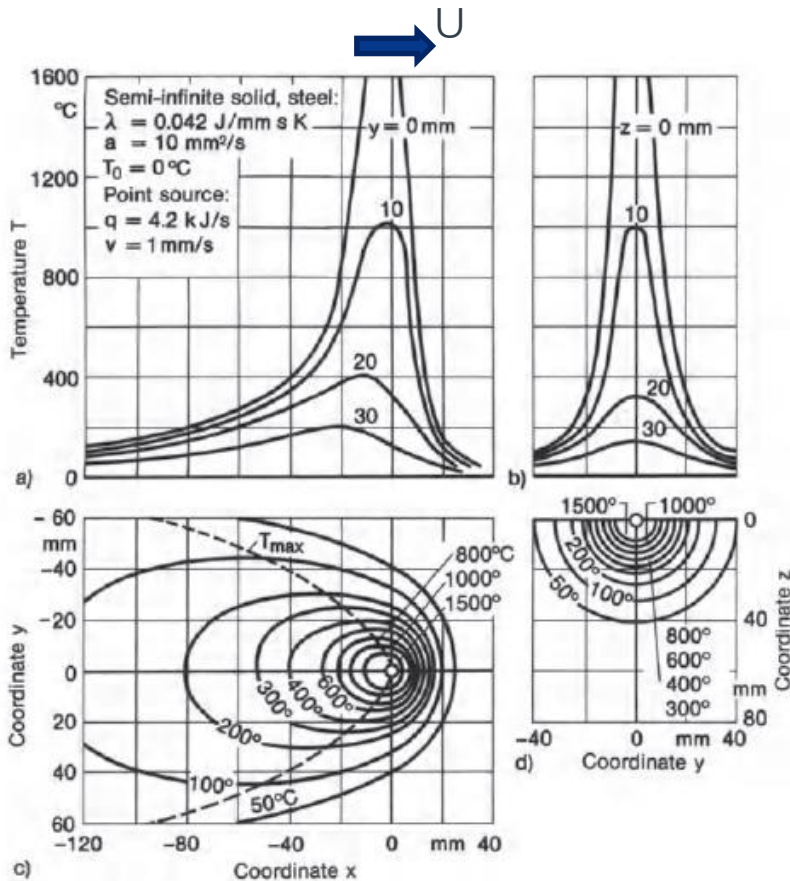


**Calor Aportado (HI) [J/mm]:** Energía aportada por unidad de longitud.  
**Calor Aportado Neto (H<sub>net</sub>)**

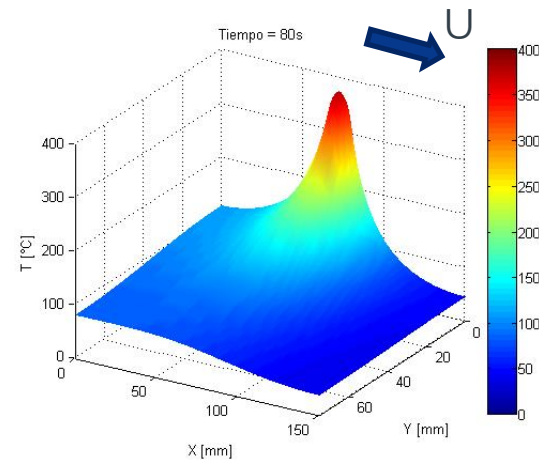
$$H_{net} \left[ \frac{J}{mm} \right] = \frac{Q \left[ W = \frac{J}{s} \right]}{U \left[ \frac{mm}{s} \right]} = \frac{\eta \cdot E[V] \cdot I[A]}{U \left[ \frac{mm}{s} \right]}$$

# Campo de Temperaturas:

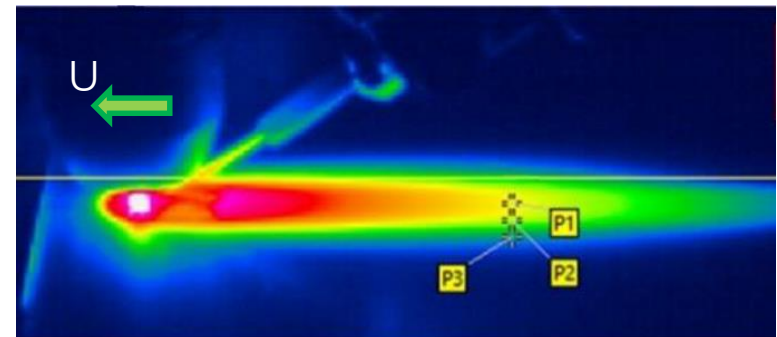
Temperatura en cada posición de la unión soldada para un determinado instante durante la soldadura.



Solución Analítica (Fuente puntual)



Solución Numérica (FEM)



Cámara Termográfica

## Ciclo Térmico:

Variación de temperatura del material en el tiempo durante la soldadura para una dada posición en la unión soldada.

Efectos sobre la microestructura:

- **Transformaciones Alotrópicas.**
- **Crecimiento de Grano.**
- **Recristalización.**
- **Solución y Precipitación.**

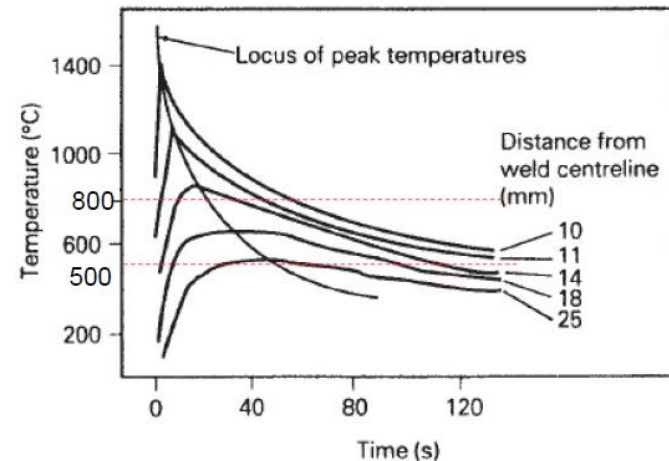
Características Relevantes de los Ciclos Térmicos:

✓ **Temperatura Máximas ( $T_p$ ).**

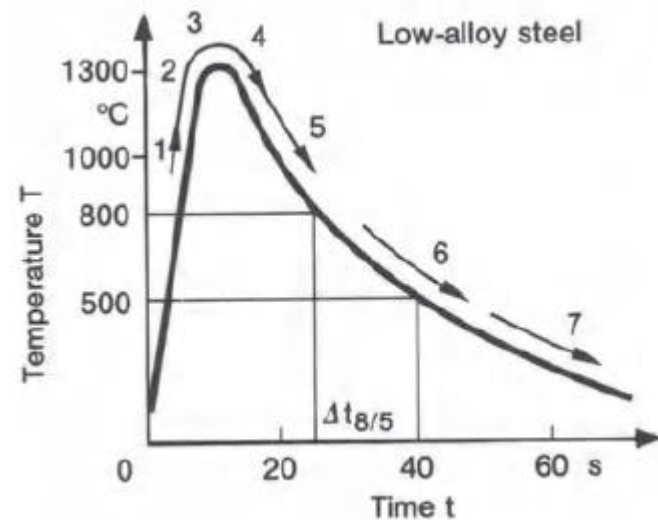
Que se austeniza ( $Fe-\gamma$ ).

✓ **Velocidad de Enfriamiento ( $\Delta t_{8-5}$ ).**

Cómo se transforma la austenita ( $Fe-\gamma$ ).



Badheshia, H. y Honeycombe, R.; Steel – Microstructure and properties; Ed. Elsevier; 2006





## Variables que afectan el Ciclo Térmico

- ✓ **Calor Aportado** (Potencia y Velocidad de la Fuente de Calor).  
Grandes calores aportados, resultan en menores velocidades de enfriamiento.
- ✓ **Densidad de Potencia.**  
Una mayor densidad de potencia localiza más el aporte de calor, modificando la forma de la pileta líquida generando una mayor penetración.
- ✓ **Espesor del metal base.**  
Los metales de mayor espesor enfrían más rápidamente que los metales delgados por efecto de la disipación térmica.
- ✓ **Pre calentamiento** (y Temperatura entre pasadas).  
Un incrementando la temperatura inicial (y entre pasadas) del metal resulta en menores velocidades de enfriamiento.
- ✓ **Diseño de la Junta.**



# Metalurgia de la Soldadura



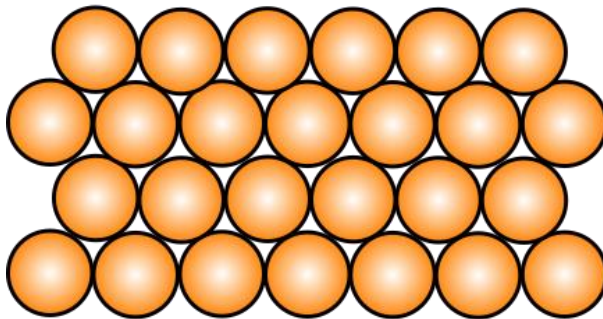
# Conceptos de Metalurgia Física



**Modelo:** átomos = esferas rígidas

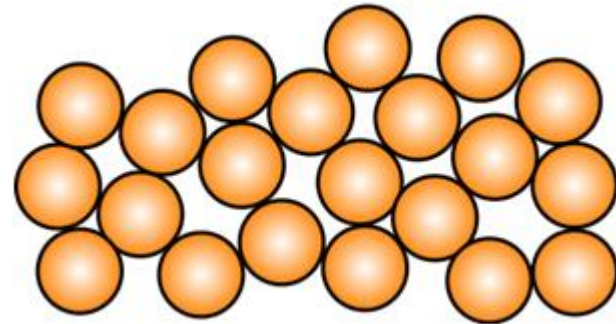
**Distribución de los átomos en el espacio:**

## Sólido Cristalino



Patrón tridimensional  
repetitivo

## Sólido Amorfo



Sin orden de largo alcance

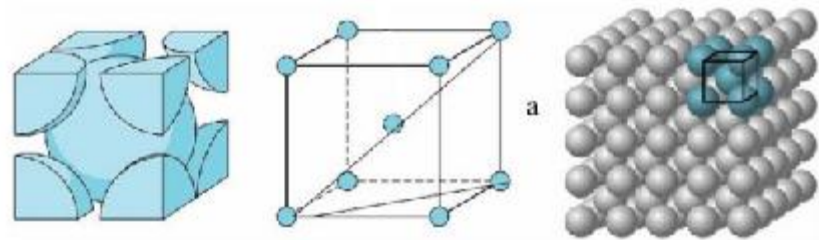
# Conceptos de Metalurgia Física



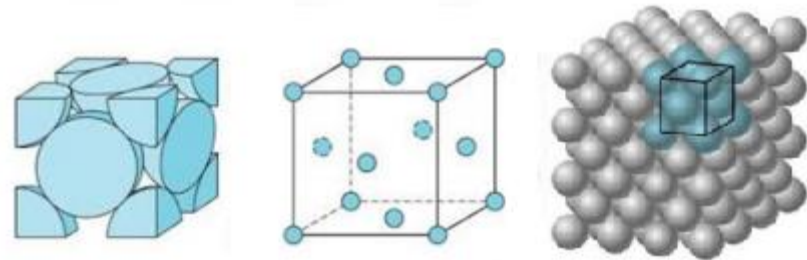
## Sistemas cristalinos:

patrón que se repite en el espacio = celda unidad

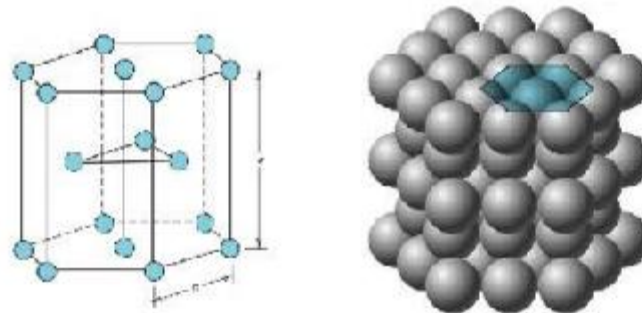
Cúbica centrada en el cuerpo: BCC



Cúbica centrada en las caras: FCC



Hexagonal compacta: HCP

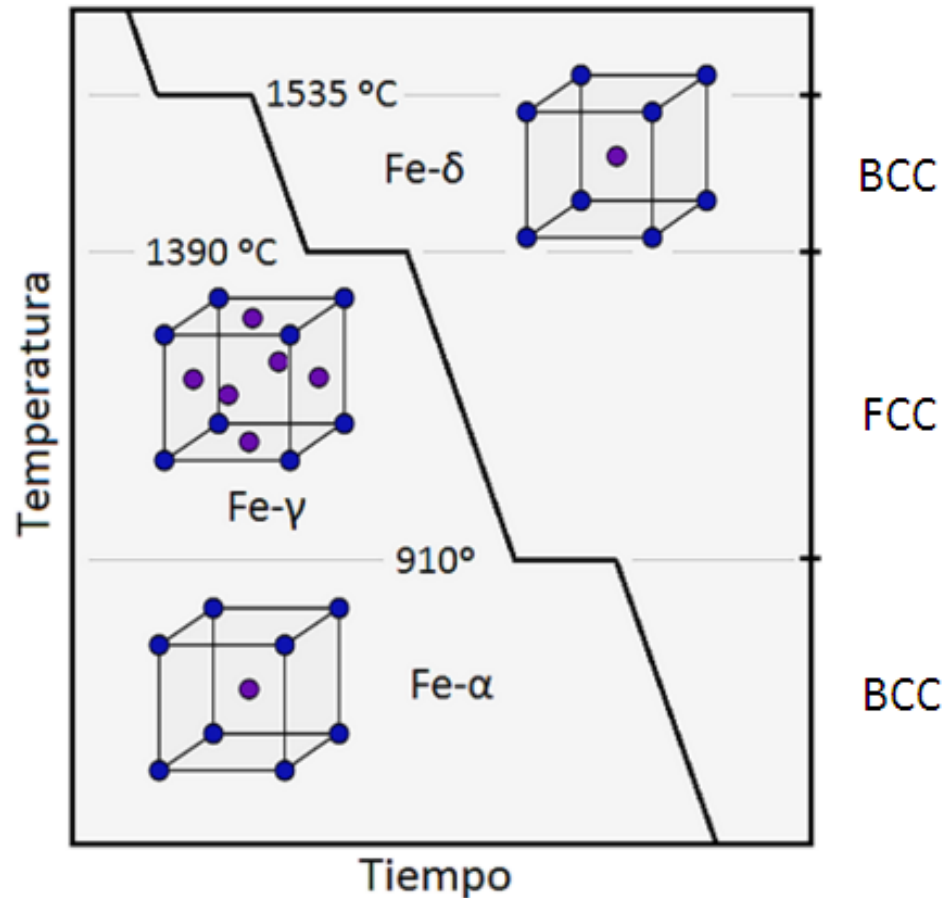


# Conceptos de Metalurgia Física



**Alotropía:** Un elemento puede presentarse en más de un sistema cristalino

Ej: Hierro



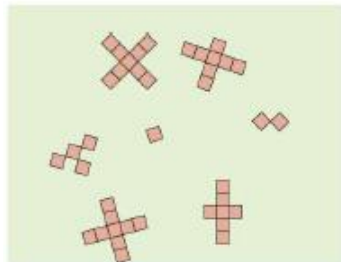
## Conceptos de Metalurgia Física



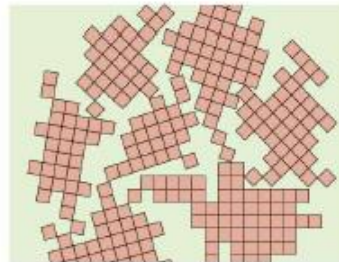
### **Solidificación por nucleación y crecimiento:**

formación de núcleos sólidos que crecen reemplazando el volumen de líquido

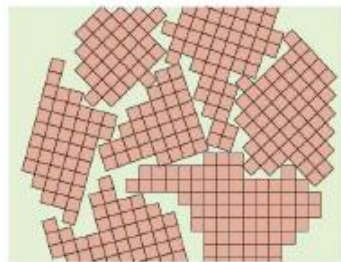
Cada núcleo crece dando lugar a un **GRANO**



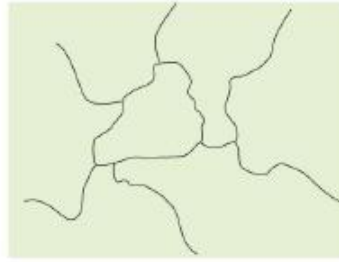
(a)



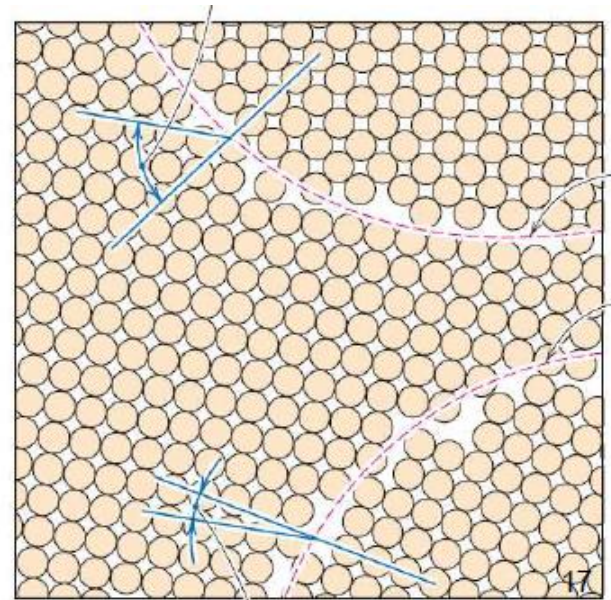
(b)



(c)



(d)

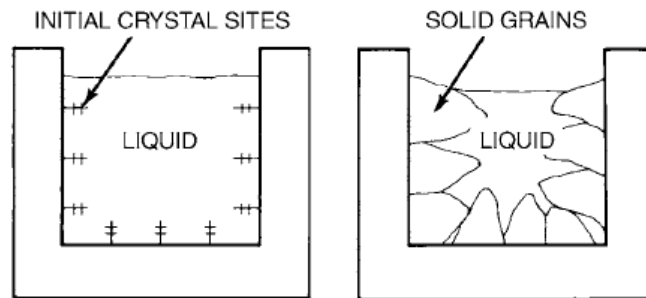


Distintos granos: Distintas orientaciones cristalográficas



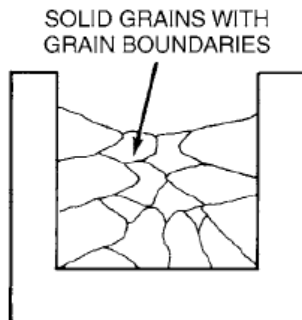
## Solidificación a partir de sólidos preexistentes:

Los granos crecen en la dirección en la que se extrae el calor (perpendicular a la interfase sólido/líquido)

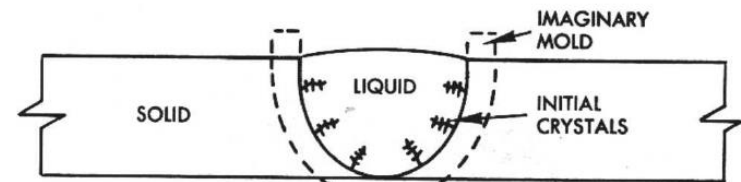


(A) Initial Crystal Formation

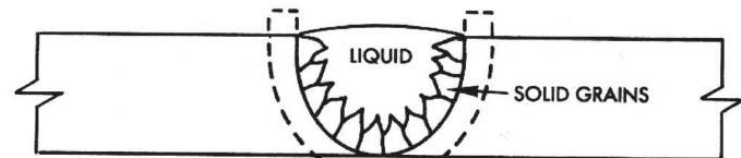
(B) Continued Solidification



(C) Complete Solidification



A-INITIAL CRYSTAL FORMATION

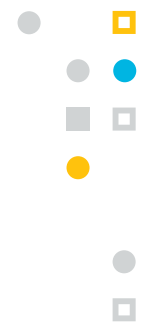


B-CONTINUED SOLIDIFICATION



C-COMPLETE SOLIDIFICATION

# Conceptos de Metalurgia Física



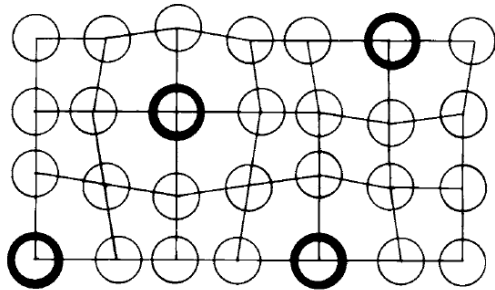
## Aleación:

Mezcla de metales (o metal/metales + no metal)

Ejemplo: acero (Fe + C)

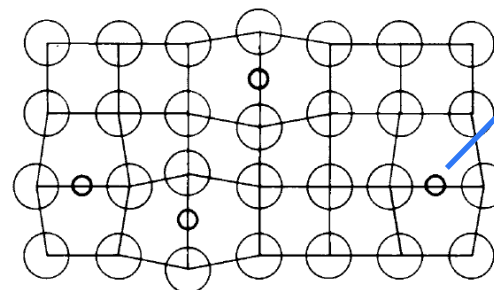
Cuando dos metales (o metal + no metal) son solubles, constituyen:

## Soluciones sólidas



### Sustitucional

Átomos de tamaño similar  
SUSTITUYEN átomos de  
soluto



### Intersticial

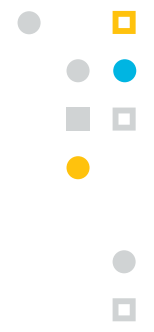
Átomos más pequeños se  
ubican en los  
INTERSTICIOS de la red

**Soluto:** componente  
que se encuentra en  
**menor** proporción

**Solvente:** componente  
que se encuentra en  
**mayor** proporción

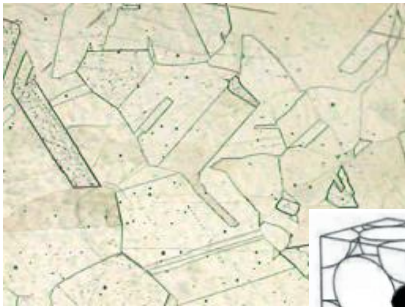


# Conceptos de Metalurgia Física

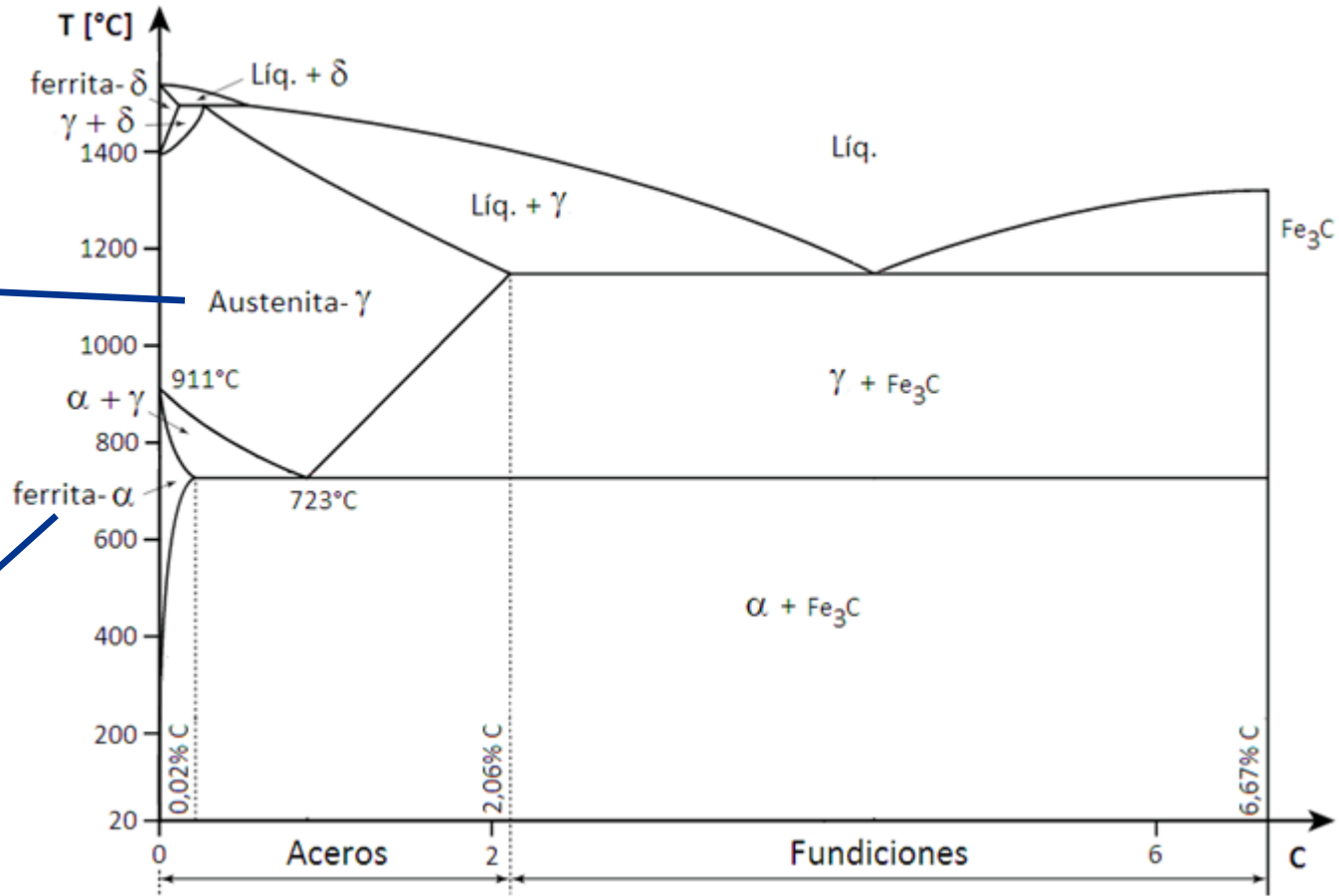
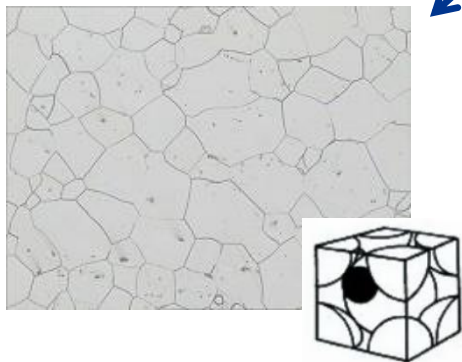


## Soluciones sólidas de carbono en hierro:

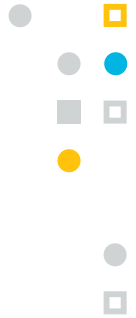
Solución sólida de C en Fe-FCC



Solución sólida de C en Fe-BCC

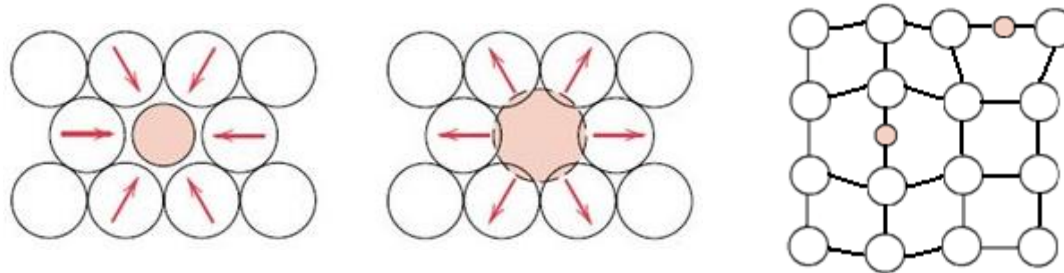


# Conceptos de Metalurgia Física

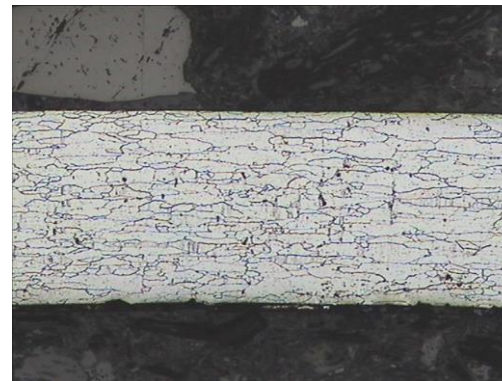
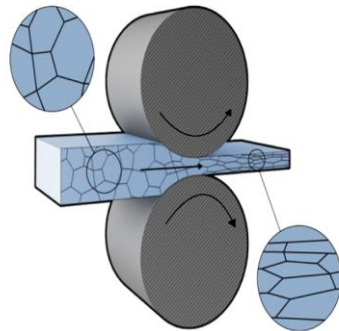


**Mecanismos de endurecimiento:** apuntan a introducir distorsiones / discontinuidades en la red cristalina para aumentar la resistencia del material

## ✓ Endurecimiento por solución sólida



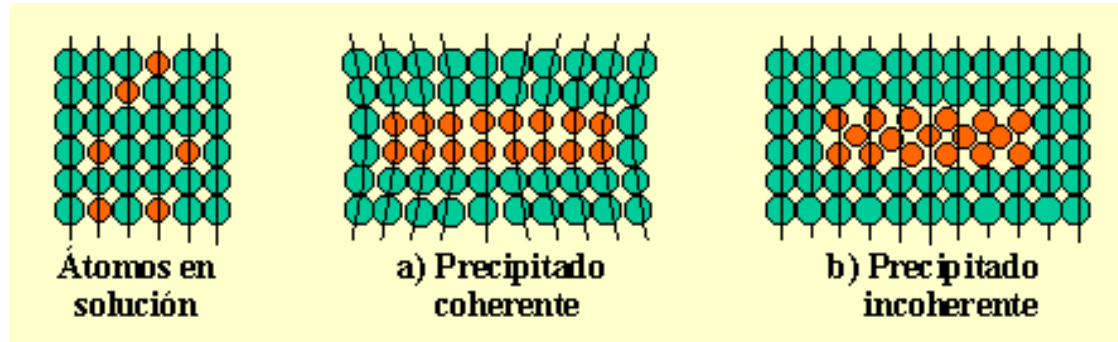
## ✓ Deformación plástica en frío



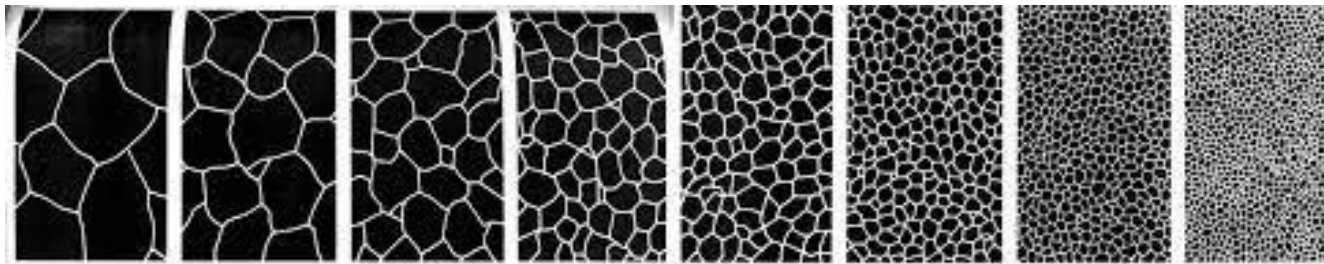


## Conceptos de Metalurgia Física

- ✓ Endurecimiento por precipitación de segundas fases



- ✓ Disminución del tamaño de grano



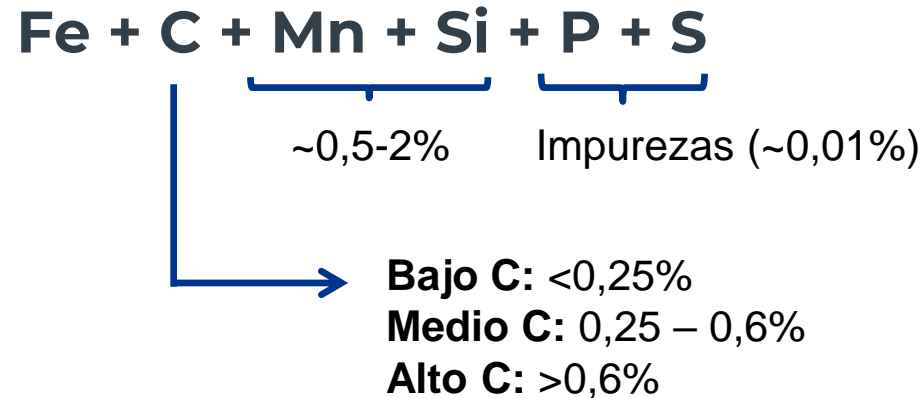
- Mayor “interrupción” (discontinuidad) de la red cristalina
- Mayor dureza y resistencia mecánica

# Metalurgia del acero



## Clasificación de aceros:

### ✓ Aceros al carbono



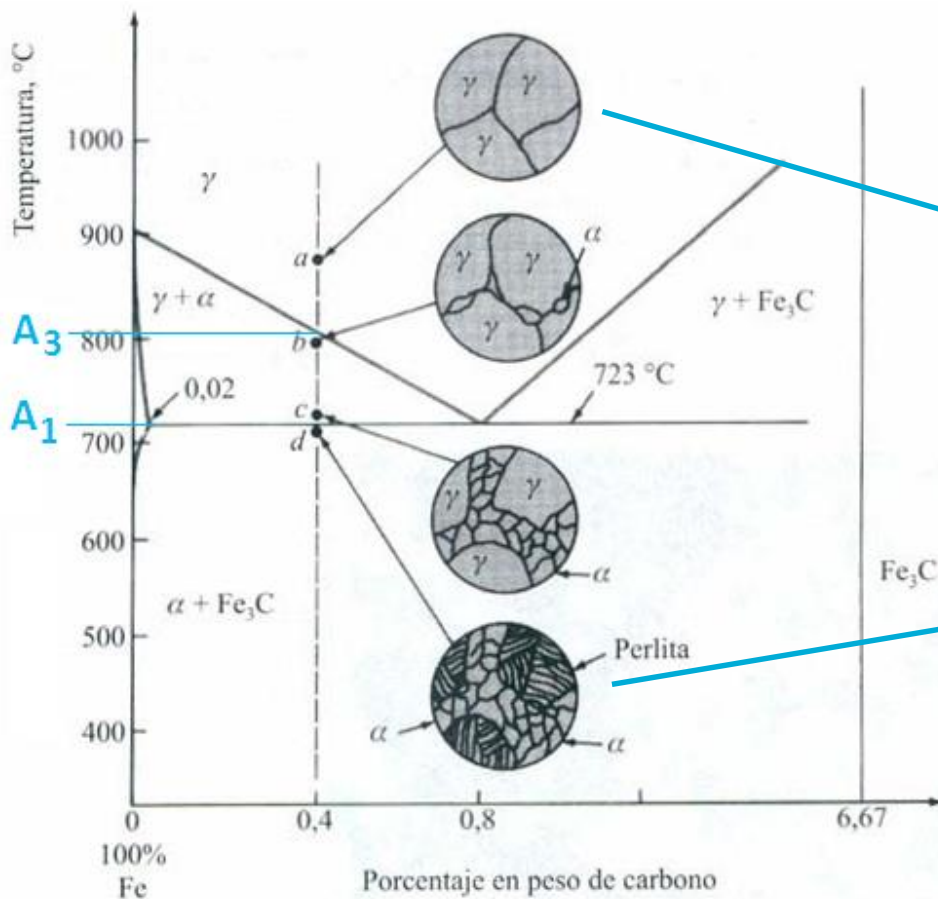
### ✓ Aceros aleados

(+ Mn, Si, Cr, Ni, Mo, Al, Cu, V, Ti, Nb, ...)

**Baja aleación:** <2%  
**Media aleación:** 2 – 5%  
**Alta aleación:** >5%

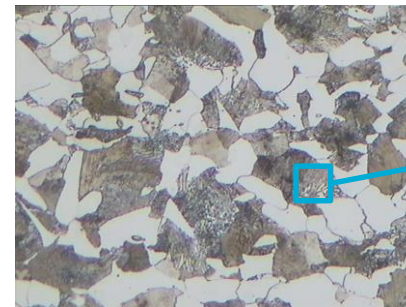
# Metalurgia del acero

## Transformaciones de fase:



**A<sub>1</sub>**: Temperatura crítica inferior (723 °C)  
**A<sub>3</sub>**: Temperatura crítica superior. Varía con %C

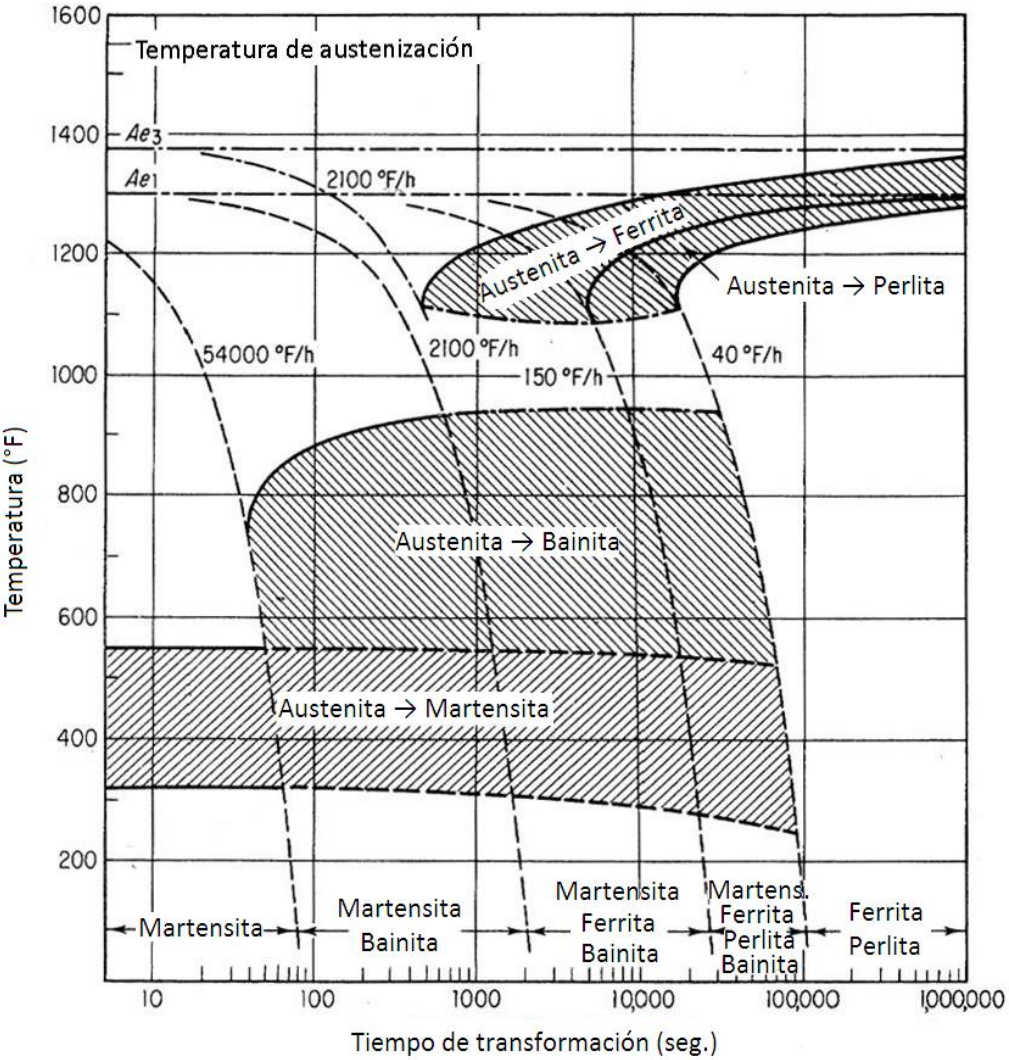
**A mayor temperatura, mayor tamaño de grano austenítico**



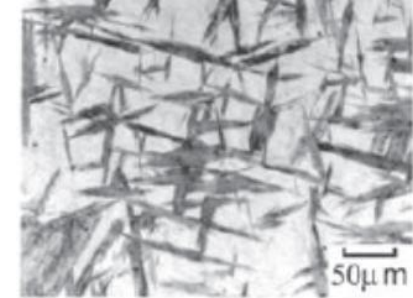
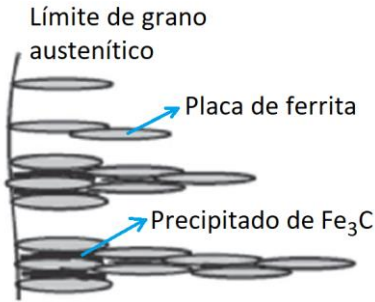
**Perlita = Ferrita + Cementita (Fe<sub>3</sub>C)**  
- Estructura laminar  
- Mayor dureza y resistencia que las soluciones sólidas (más interfase)

# Metalurgia del acero

## Diagrama TEC: distintas velocidades de enfriamiento



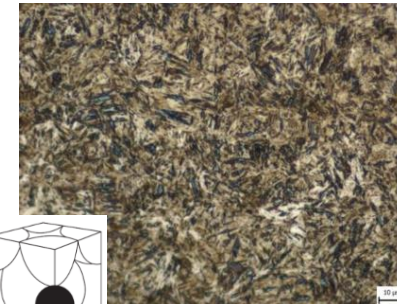
### Bainita:



- ✓ Buena resistencia y alta tenacidad

### Martensita:

- ✓ Estructura muy distorsionada
- ✓ Alta dureza PERO gran fragilidad



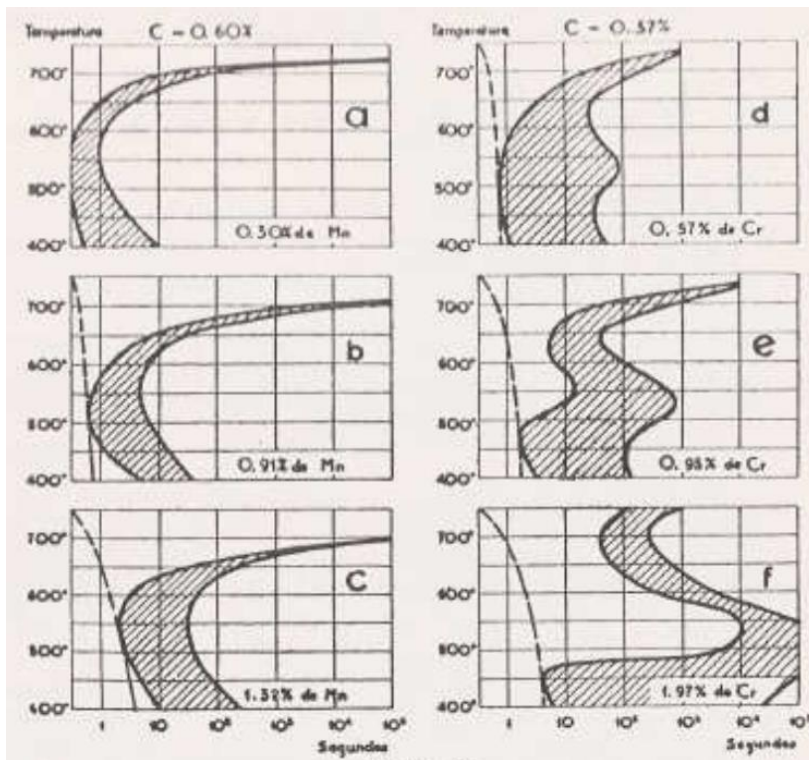
- ✓ Se trata de evitar





# Metalurgia del acero

## Templabilidad: capacidad para obtener martensita



Mayor %C y otros **aleantes** (excepto Co)



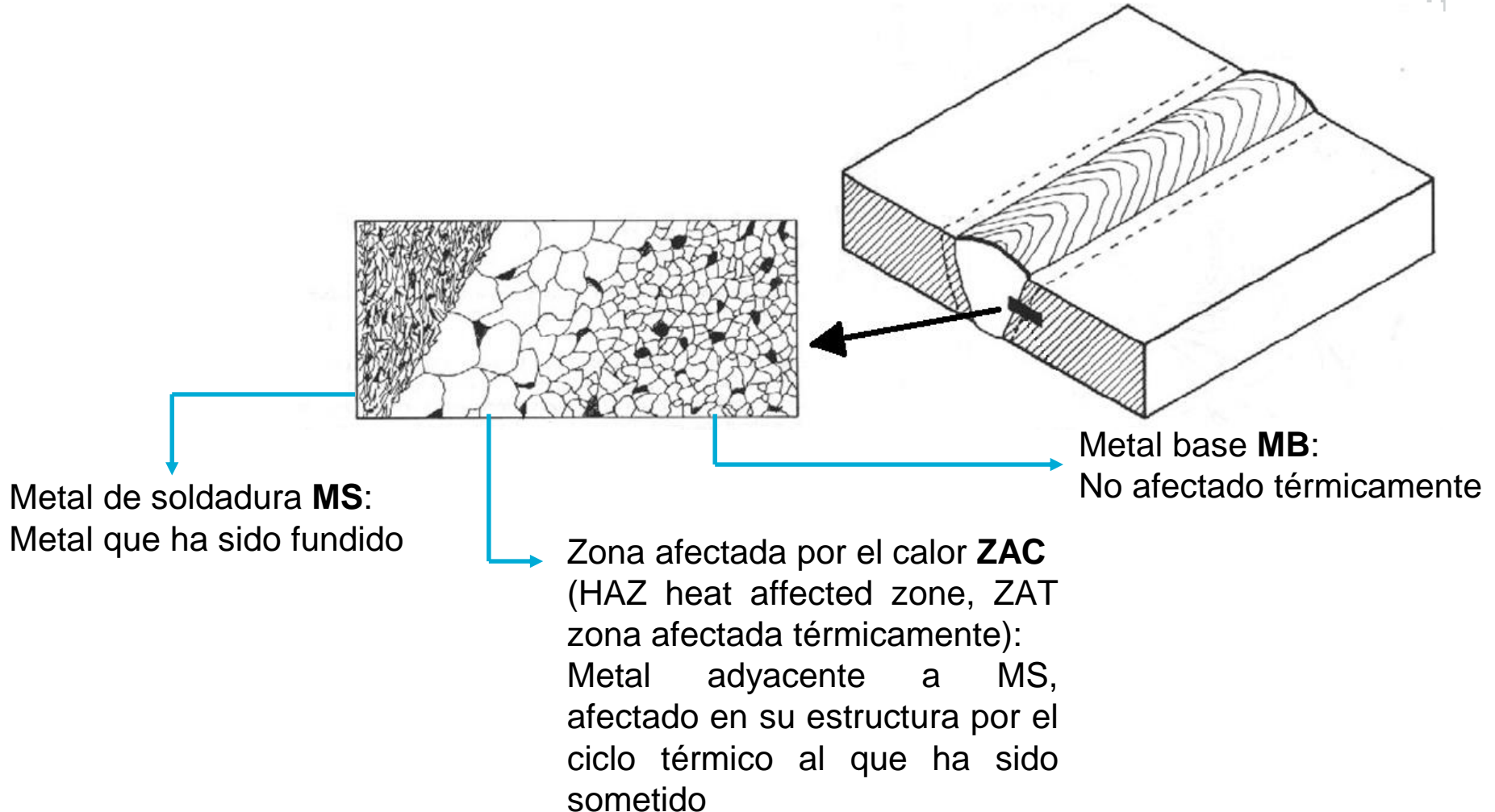
Las **curvas** de transformación **se desplazan hacia la derecha**



Se puede obtener **martensita con menores velocidades de enfriamiento**

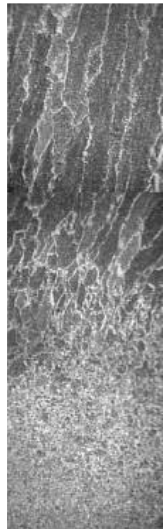
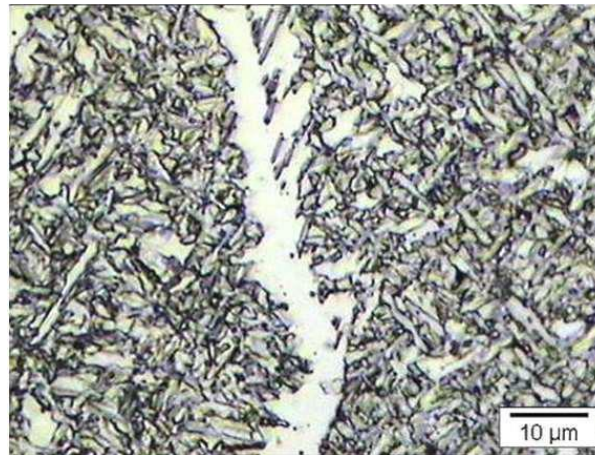
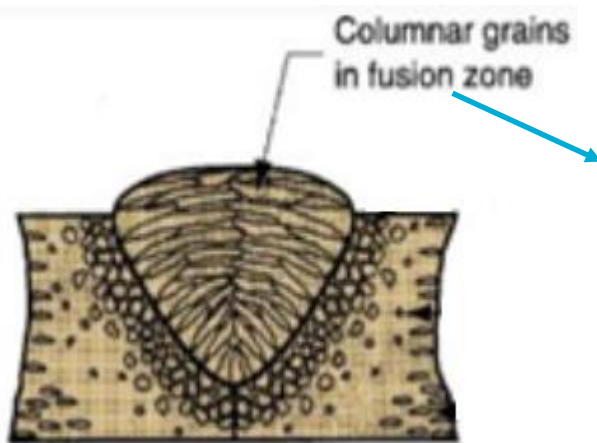
# Metalurgia de la soldadura

## Distintas zonas que componen la unión soldada



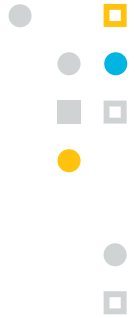
# Metalurgia de la soldadura

## Metal de soldadura

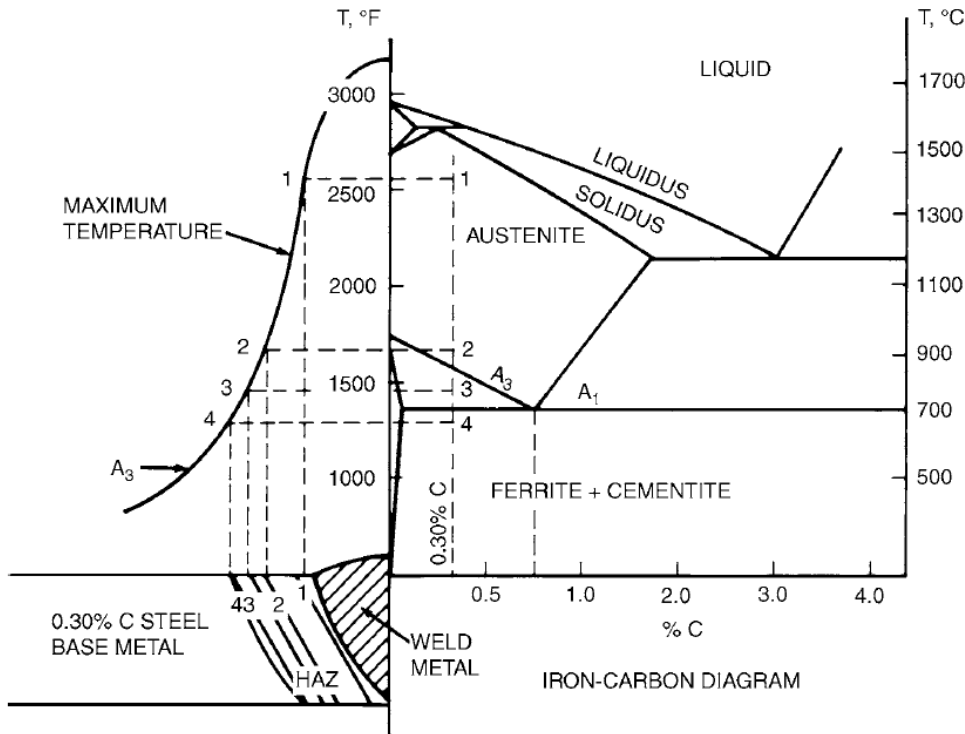


- ✓ Puede ser: metal base (fundido y solidificado), metal de aporte, o mezcla de ambos, según proceso utilizado
- ✓ Estructura columnar. Constituyentes del tipo bainítico: ferrita + carburos
- ✓ Varias pasadas: recristaliza el MS refinando el grano, mejorando las propiedades (sobre todo la tenacidad)

# Metalurgia de la soldadura



## ZAC

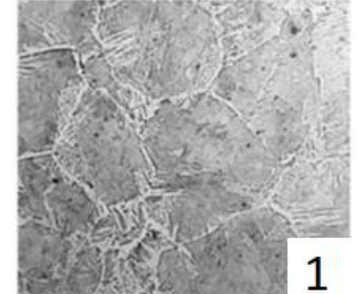
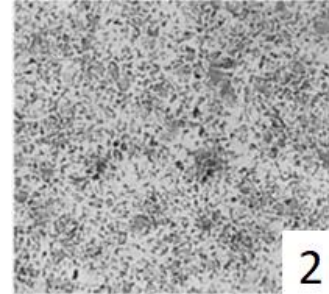
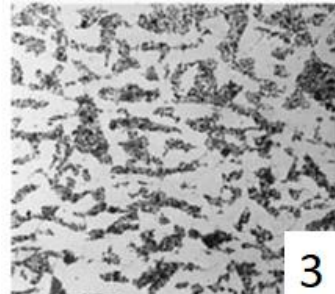
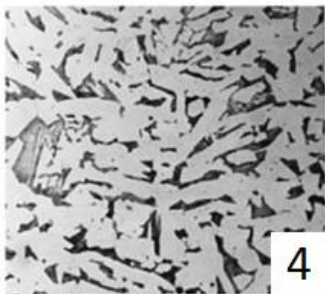


1 – Zona recristalizada de grano grueso

2 – Zona recristalizada de grano fino

3 – Zona intercrítica

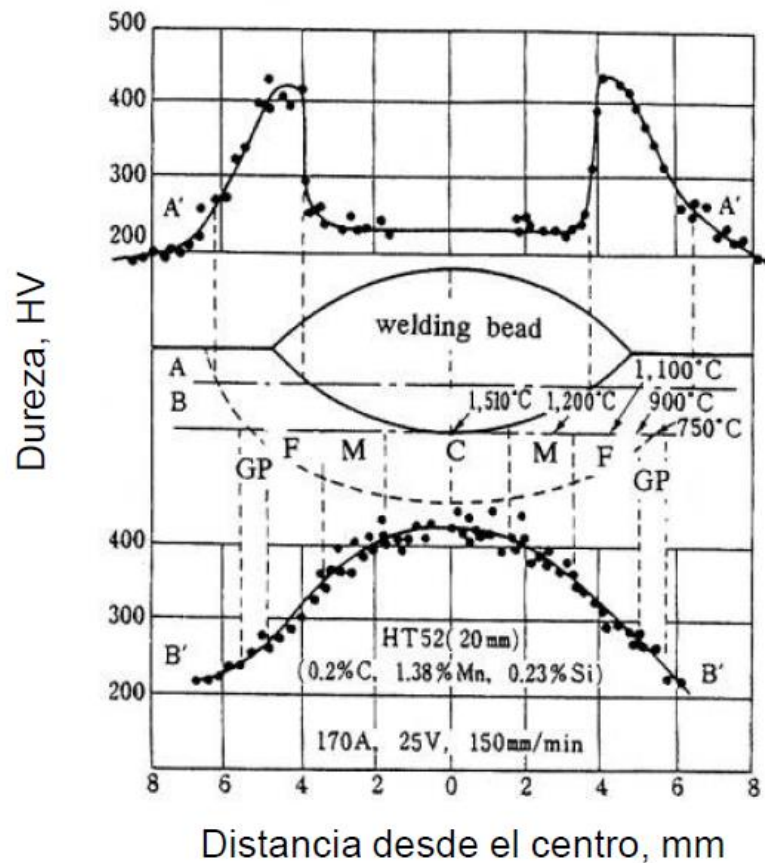
4 – Zona subcrítica





# Metalurgia de la soldadura

## Perfil de dureza



C = ZAC grano grueso  
M = zona intermedia  
F = ZAC grano fino  
GP = ZAC parcialmente austenizada

# Metalurgia de la soldadura

## Soldabilidad

“Capacidad de un material para ser soldado bajo las condiciones de construcción impuestas en una estructura específica y diseñada adecuadamente, así como para desempeñarse satisfactoriamente en el servicio previsto” (AWS A3.0)

Un material tendrá mayor soldabilidad si al ser soldado sin condiciones especiales, no se obtienen constituyentes frágiles (como martensita)

Para esto se debe tener una composición química adecuada: bajo %C y bajo % de aleantes. Referencia = **Carbono equivalente**

$$CE_{IIW} = \%C + \frac{\%Mn + \%Si}{6} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5}$$

# Metalurgia de la soldadura

CE alto → requiere condiciones especiales para no obtener martensita

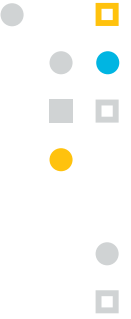
## Pre calentamiento

Para reducir la velocidad de enfriamiento de la pieza. Puede ser:

- En horno (piezas pequeñas)
- Con soplete
- Con resistencias eléctricas



# Tensiones Residuales y Distorsiones



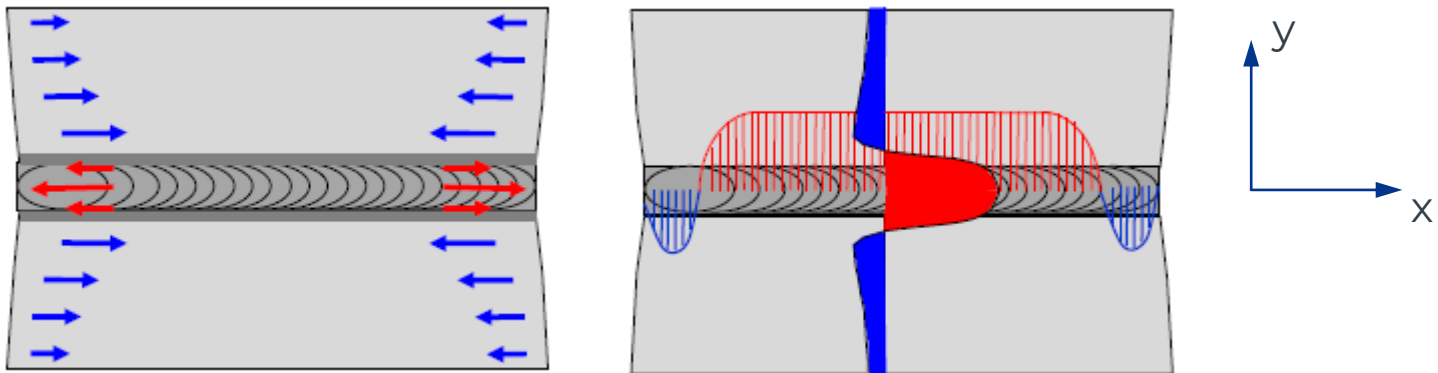
## Tensiones Residuales:

Son aquellas que están presentes en un componente cuando no se le aplican cargas.

Se generan por la presencia de **campos no uniformes** de **deformaciones no elásticas (térmicas, plásticas, por transformaciones alotrópicas)**.

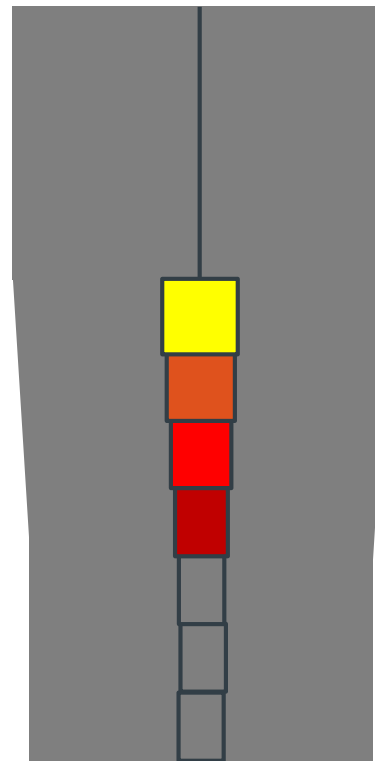
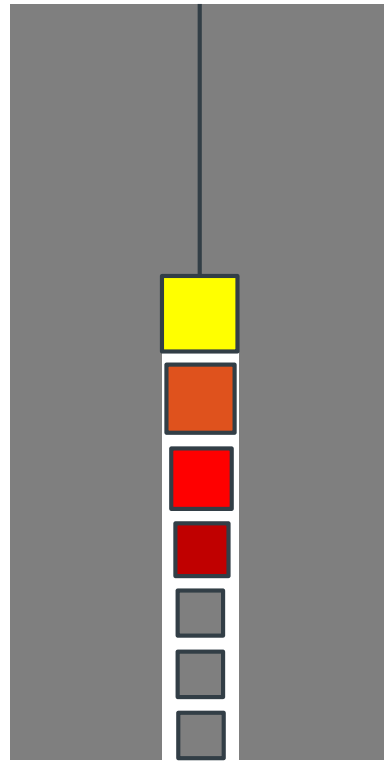
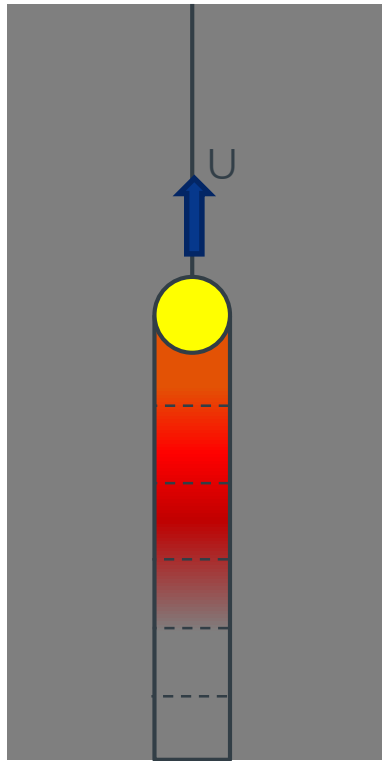
Características:

- ✓ Las tensiones residuales se inducen por esfuerzos internos.
- ✓ No hay tensiones residuales en las superficies libres (normales a dicha superficie).
- ✓ El balance de tensiones residuales es cero (zonas de tensiones de tracción y compresión).

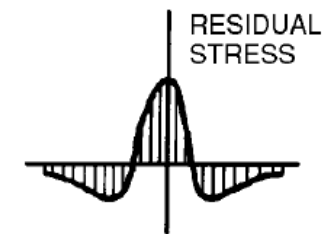
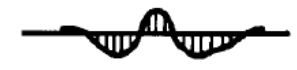
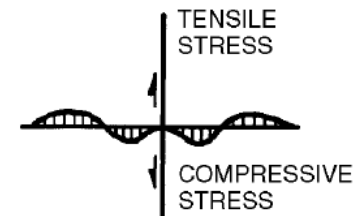


# Generación de Tensiones Residuales

Análisis de la generación de tensiones residuales en uniones soldadas.  
Modelo conceptual para  $\sigma_x$ .

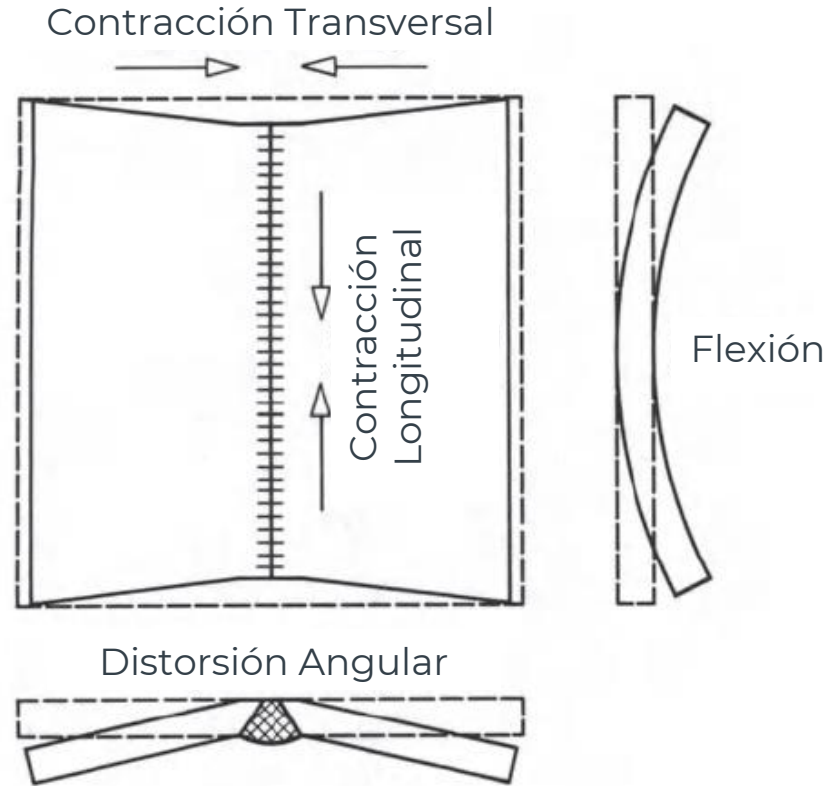


Tensión en la dirección x ( $\sigma_x$ )



## Distorsiones:

Las deformaciones no uniformes generadas durante la soldadura también pueden generar distorsiones.



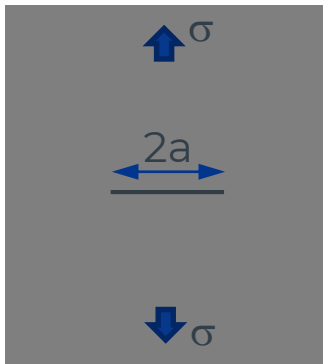
Las distorsiones y tensiones son opuestas:



# Efectos de las Tensiones Residuales:

El efecto es significativo en fenómenos que ocurren **bajo cargas aplicadas de baja magnitud**, como ser:

## ✓ Fractura Frágil:



$$K_I = Y \cdot \sigma \sqrt{\pi a}$$

$$\sigma = \sigma_{servicio} + \sigma_{residual}$$

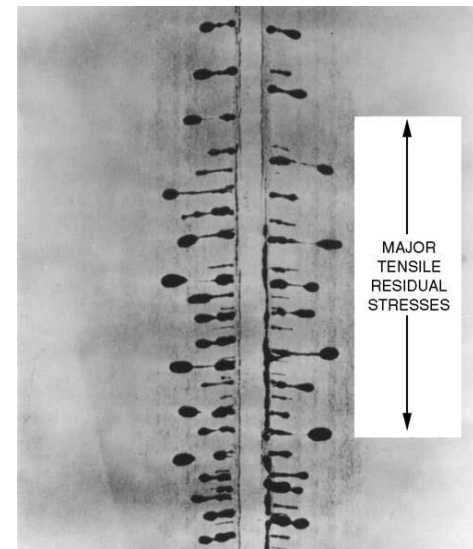
También Asociadas con Fragilización por Hidrógeno / Fisuración en Frío.

## ✓ Fatiga (Tensiones Cíclicas):

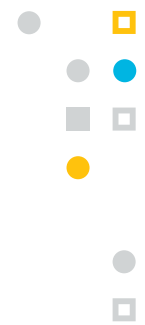
- Tensiones residuales de compresión mejoran la resistencia a la fatiga.
- El efecto puede ser despreciable por relajación de las tensiones residuales.

## ✓ Corrosión Bajo Tensiones (SCC):

Microestructura Susceptible  
+ Ambiente Corrosivo  
+ Tensión de Tracción  
(aplicadas y/o residuales)



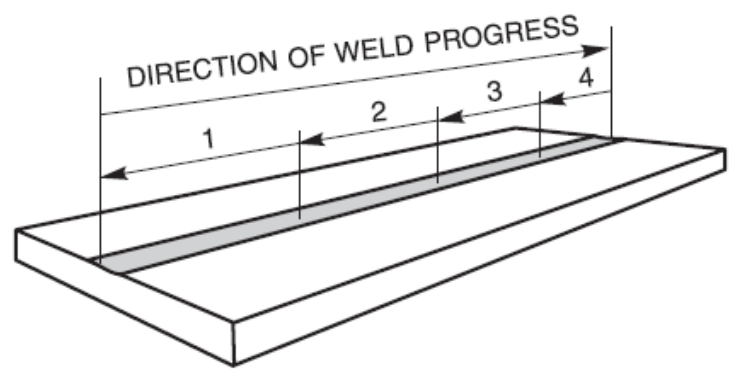




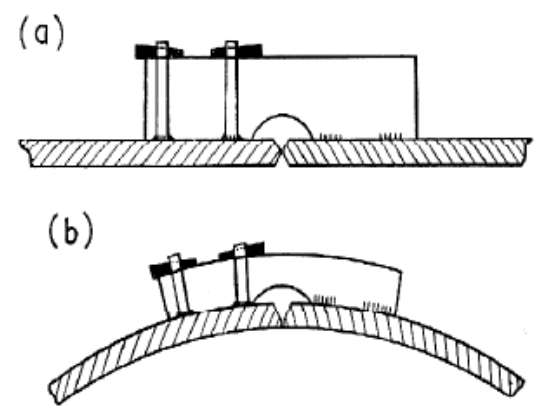
# Control de Tensiones Residuales y Distorsiones:

- Control y Secuencia del Ciclo Térmico y Aporte de Material.

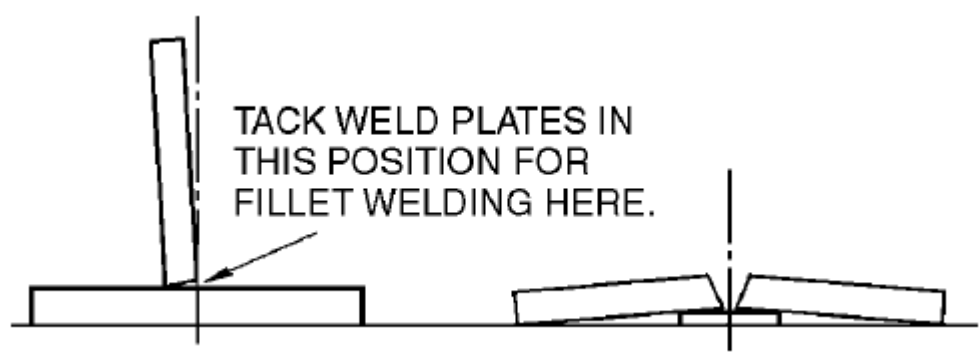
- Paso Peregrino:



- Posicionadores:



- Pre-posicionamiento:



# Reducción Tensiones Residuales:

## ✓ Tratamientos Térmicos (Post Soldadura):

Tratamiento térmico de alivio de tensiones.

Calentamiento localizado o la totalidad de la pieza.

Disminución del límite elástico  $\Rightarrow$  permite a las tensiones deformar localmente y relajarse.

Efectos metalúrgicos.

## ✓ Tratamientos Mecánicos (Deformación Plástica):

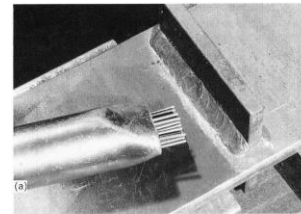
- Martillado

- Milagujas (escariador)

- Granallado

- Ultrasonido

- Sobrecarga





# Discontinuidades



## Discontinuidad:

Interrupción en la estructura del material, tal como una falta de homogeneidad en sus características mecánicas, metalúrgicas y/o físicas.

## Defecto:

Una discontinuidad que por su naturaleza o efecto, torna a un producto o parte inaceptable frente a los requisitos de aceptación de una norma o especificación.

Defecto implica rechazo.

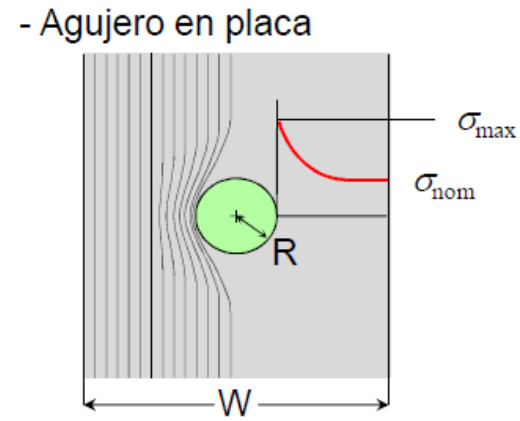
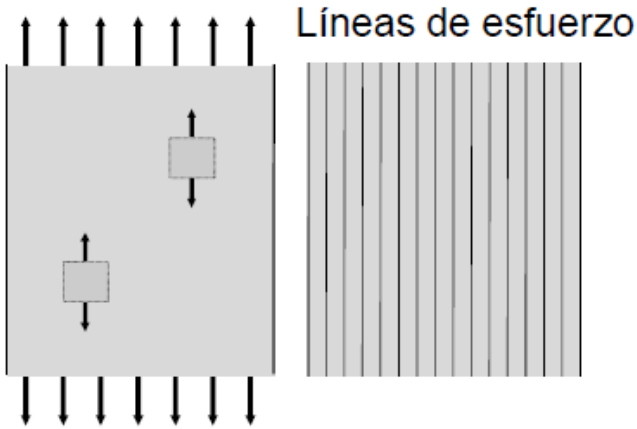
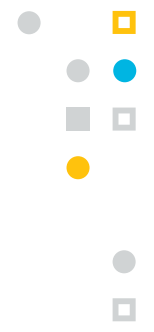
## Discontinuidad $\neq$ Defecto

Defecto = Discontinuidad + criterio de aceptación excedido

Criterios de aceptación (normas) dependen de:

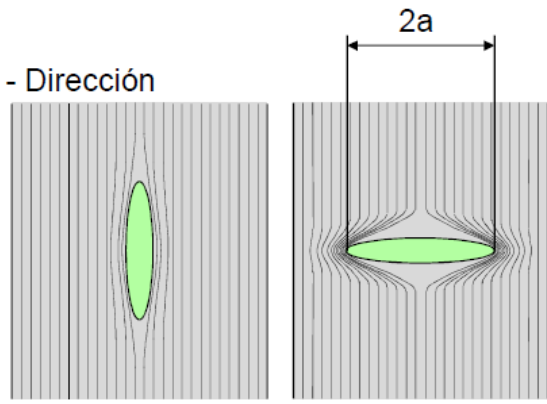
- ✓ Servicio del componente
- ✓ Características de las cargas
- ✓ Características del material
- ✓ Características de la discontinuidad
- ✓ Del grado de análisis mecánico (Fitness For Service)

# Concentración de Tensiones:

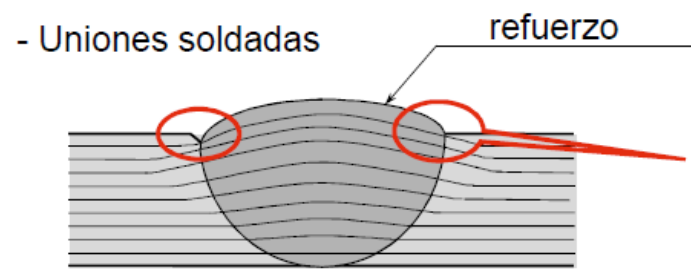


En caso de  $R \ll W$ ,  $K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = 3$

$K_t$ : Factor de Concentración de Tensiones



Importa como varían las líneas de esfuerzo



Socavadura o solapado

$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = 2 \sim 3$$



## Clasificación de las Discontinuidades:

I. Relacionadas con los procesos o procedimientos de Soldadura

II. Metalúrgicas

III. Relacionadas con el diseño

IV. Según su riesgo potencial

V. Según la mecánica de fractura



# Clasificación de las Discontinuidades:

## I. Relacionadas con los procesos o procedimientos de Soldadura:

- ✓ Fisuración
- ✓ Falta de fusión
- ✓ Penetración inadecuada (falta / exceso)
- ✓ Socavadura
- ✓ Refuerzo inapropiado (excesivo / deficiente)
- ✓ Inclusiones (escoria / tungsteno)
- ✓ Cebado de arco
- ✓ Concavidad / convexidad
- ✓ Desalineación
- ✓ Distorsión angular
- ✓ Salpicaduras
- ✓ Porosidad
- ✓ Oxidación



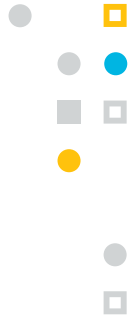
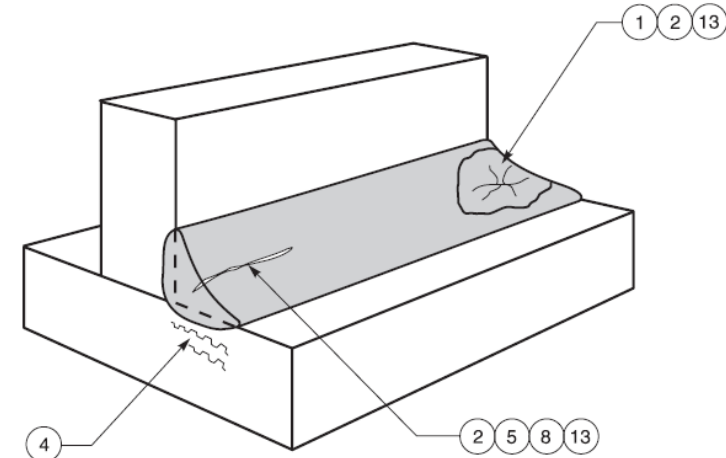
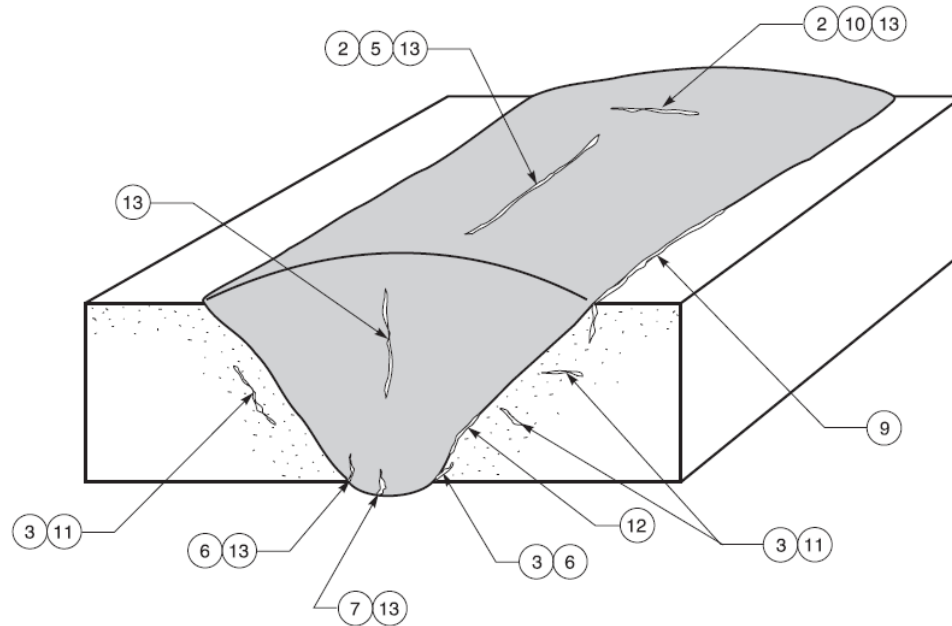
Eficacia para concentrar tensiones.  
Más difíciles de detectar.  
Más críticas.  
Menos toleradas.

La severidad de una imperfección depende de su tamaño, su localización y su efecto concentrador de tensiones y puede llegar a ser un defecto dependiendo de las condiciones de servicio del componente.

# Fisuras en Uniones Soldadas

Las fisuras son **Discontinuidades Inaceptables** en cualquiera de sus formas.

1. Fisura de cráter
2. Fisura sobre la cara
3. Fisura en la ZAC
4. Desgarre laminar
5. Fisura longitudinal
6. Fisura sobre la raíz
7. Fisura sobre la raíz abierta a la superficie
8. Fisura en la garganta
9. Fisura en el borde
10. Fisura transversal
11. Fisura bajo cordón
12. Fisura en el interface del metal de soldadura
13. Fisura en el metal de soldadura





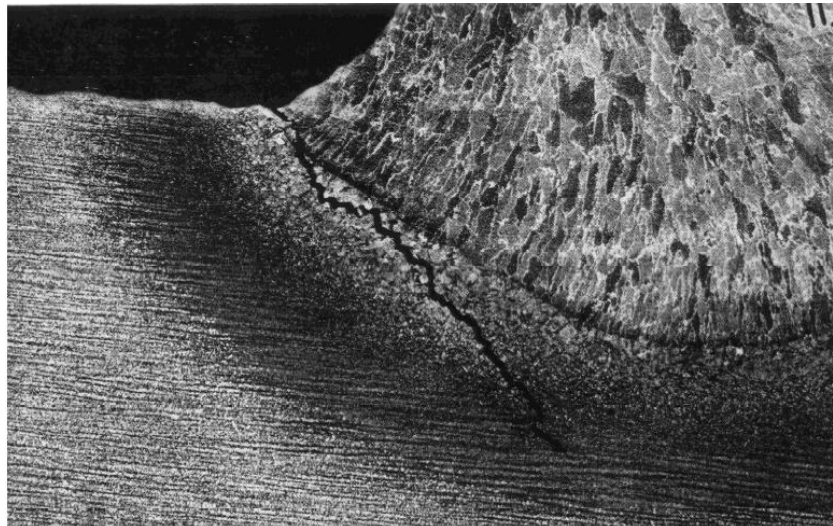
## Fisuración en Frío (Cold Cracking)

Fisuras que se generan luego que la soldadura solidificó y enfrió.

Tipo de fisuración también conocido fisuración diferida (delayed cracking) o fisuración por hidrogeno (hydrogen embrittlement).

Deben darse tres condiciones:

- ✓ Presencia de contenido crítico de hidrógeno atómico en el acero;
- ✓ ZAC o metal de soldadura susceptible (baja ductilidad);
- ✓ Alto nivel de tensiones (residuales o aplicadas).

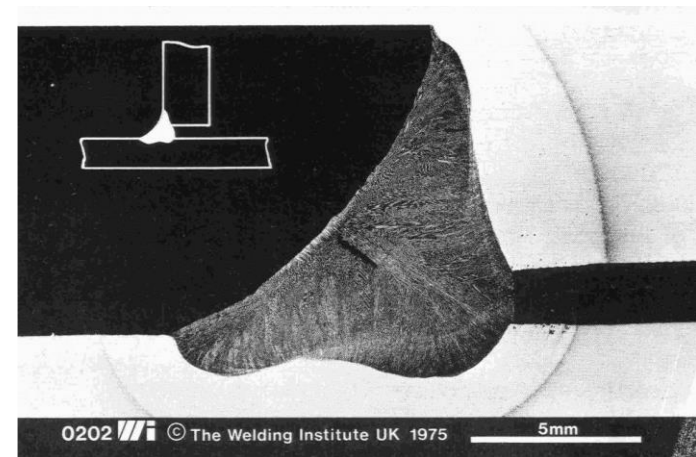
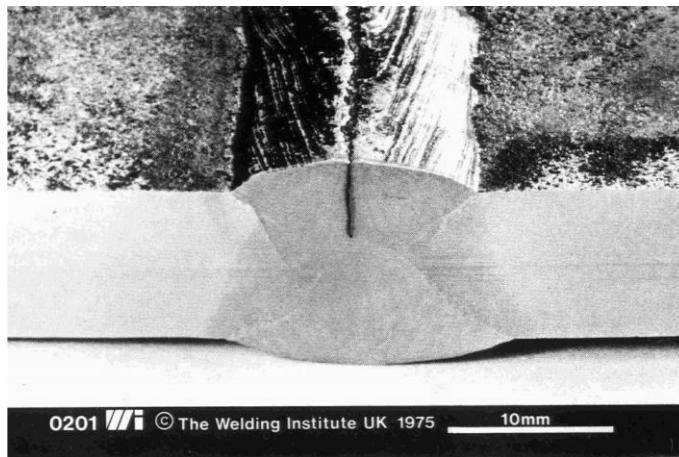


# Fisuración en Caliente (Hot Cracking)

Se presenta a elevada temperatura cuando se produce la solidificación del metal de soldadura.

Debido a que estas fisuras se relacionan con la presencia de fases frágiles en los bordes de grano, aparecen generalmente como intergranulares.

Intervienen factores mecánicos y metalúrgicos.



# Otras discontinuidades relacionadas con los procesos o procedimientos de Soldadura

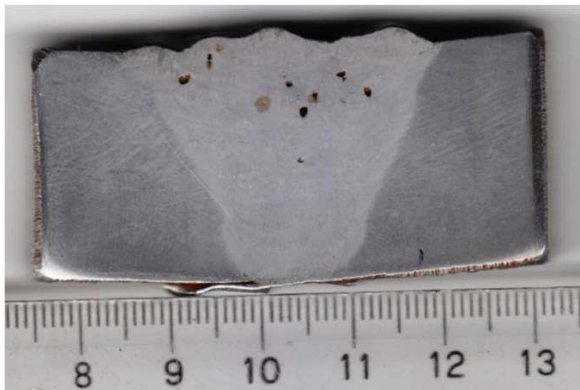
✓ Falta de Fusión:



✓ Falta de Penetración:



✓ Inclusiones de Escoria:



✓ Porosidad:





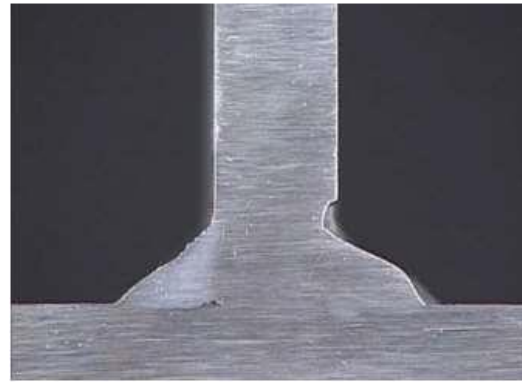
# Otras discontinuidades relacionadas con los procesos o procedimientos de Soldadura



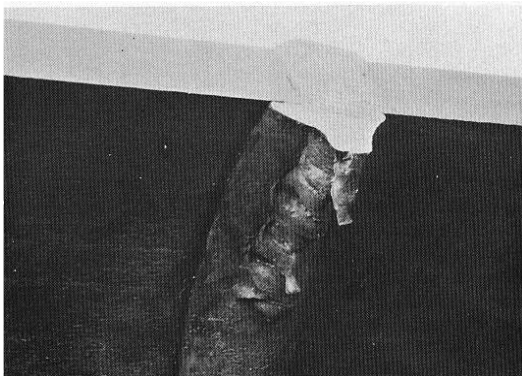
✓ Cebado de Arco:



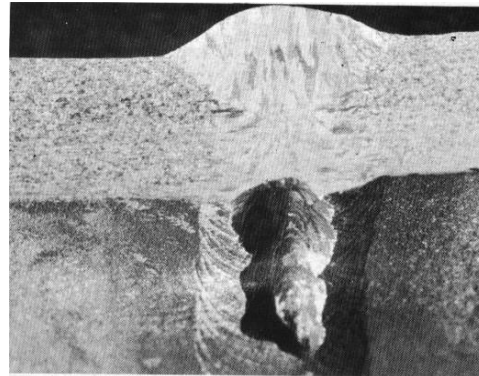
✓ Socavadura:



✓ Exceso de Penetración:

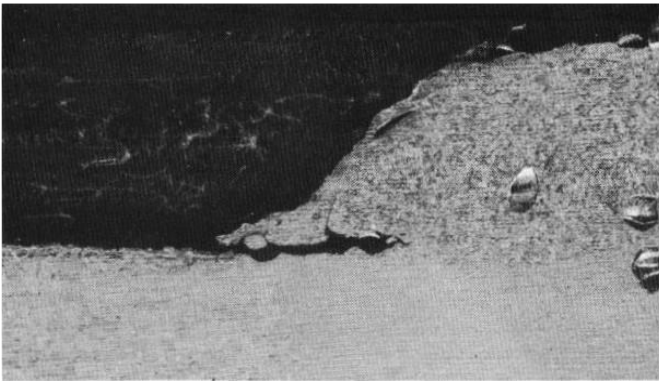


✓ Quemadura:

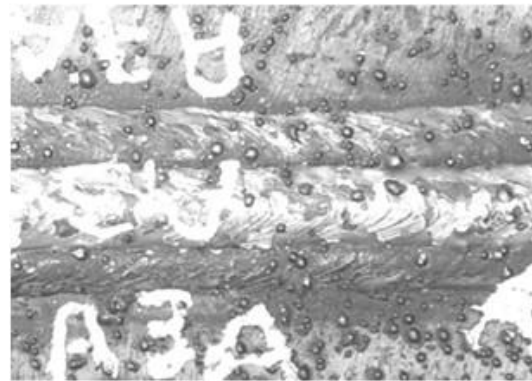


# Otras discontinuidades relacionadas con los procesos o procedimientos de Soldadura

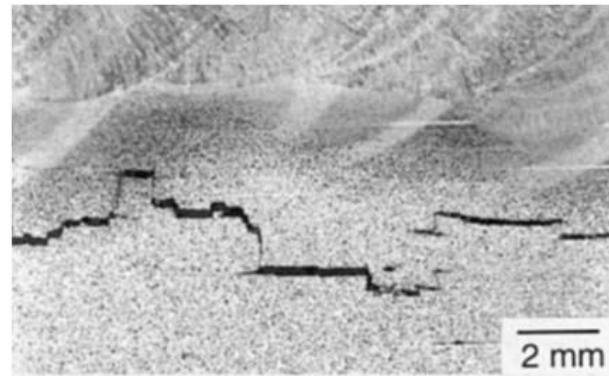
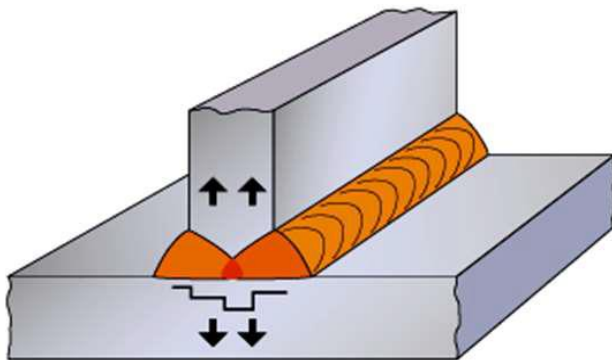
✓ Solapado (Overlap)



✓ Salpicaduras:



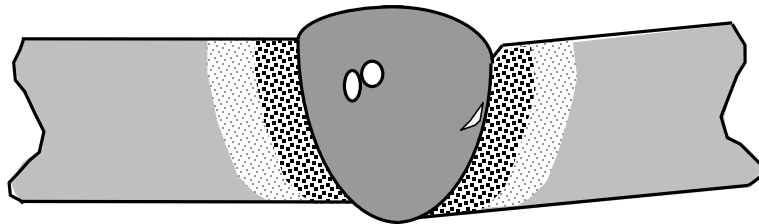
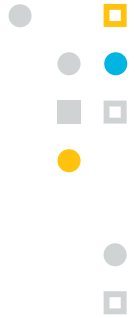
✓ Desgarre Laminar:





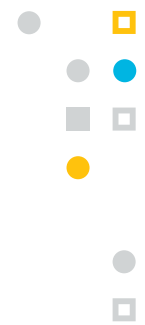
# Propiedades Mecánicas

# Soldadura como proceso especial:



!!!Necesidad de mantener bajo control el proceso de soldadura!!!!





## Modos de Falla:

- ✓ Fatiga de alto ciclo
- ✓ Fractura rápida frágil
- ✓ Inestabilidad elástico (pandeo generalizado o localizado)
- ✓ Corrosión (SCC, corrosión-fatiga)
- ✓ Inestabilidad plástica (pandeo plástico)
- ✓ Creep
- ✓ Fractura rápida dúctil
- ✓ Fatiga de bajo ciclo
- ✓ Excesiva deformación plástica
- ✓ Excesiva deformación elástica
- ✓ Desgaste

### Controlados por **tensión**:

Importante los **concentradores de tensión** y las **tensiones residuales**, la **tenacidad**.

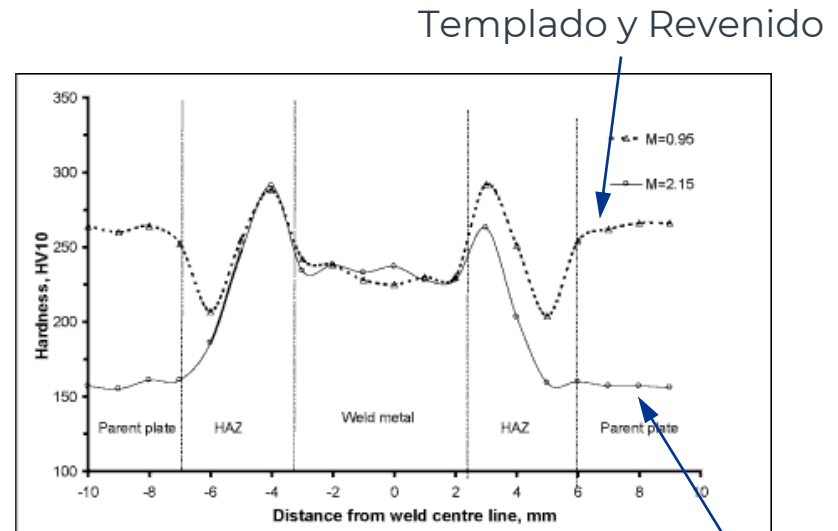
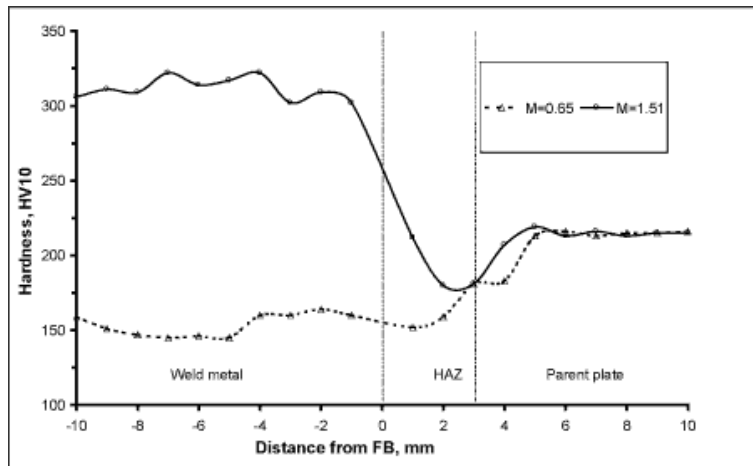
### Controlados por **deformación**:

Importante la **ductilidad**, la **resistencia**, la rigidez.

# Propiedades Mecánicas Locales

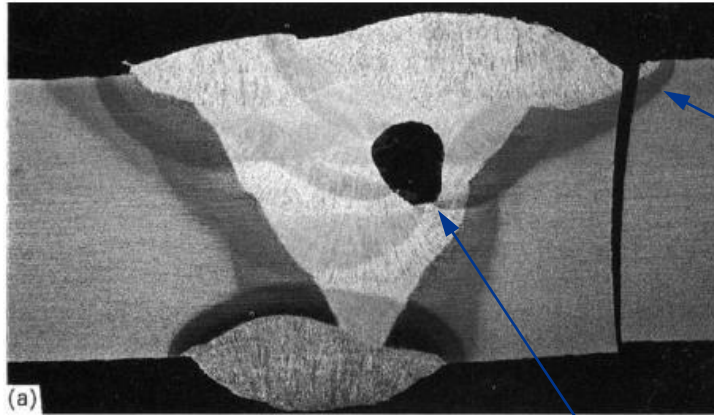
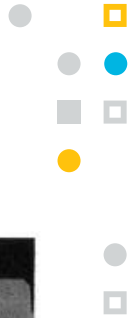
- ✓ Ejemplo: Dos Aceros de 25 mm de espesor.
- ✓ SAW.
- ✓ Efecto del cambio de Alambre.

- ✓ FCAW.
- ✓ Efecto de la condición inicial del MB.



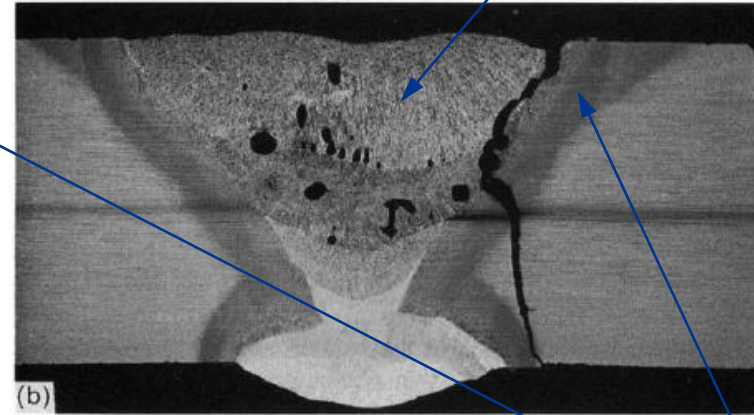
Normalizado

# Fatiga de alto ciclo



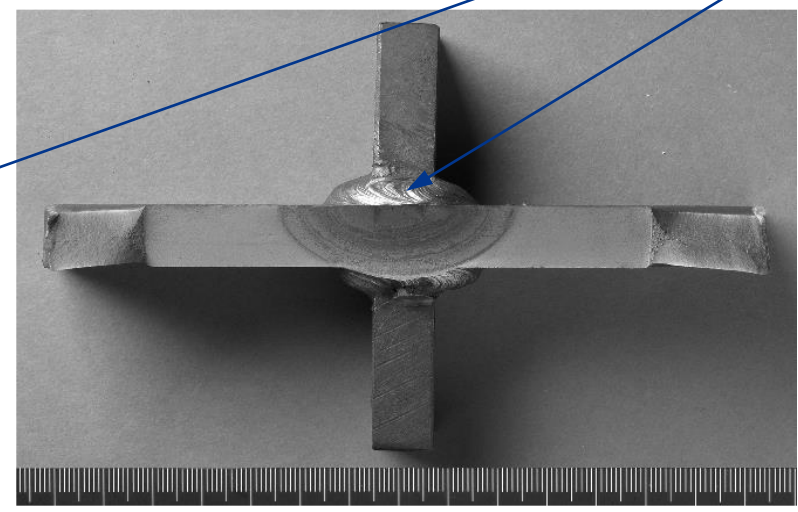
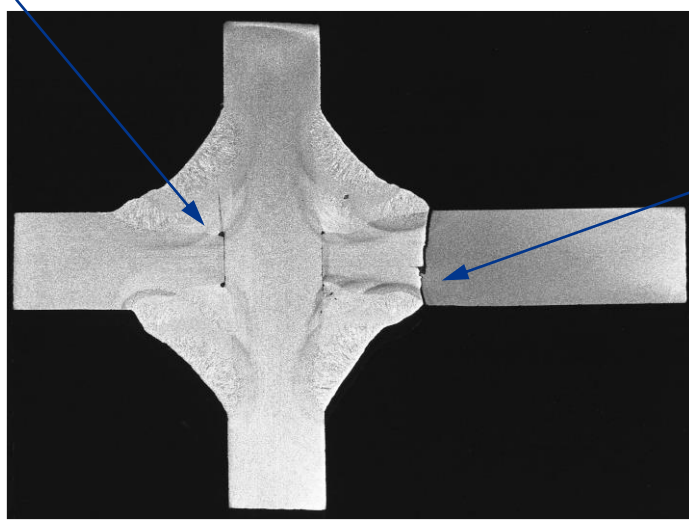
Inicio en la Raíz (Penetración Parcial)

Inclusión de Escoria



Porosidad

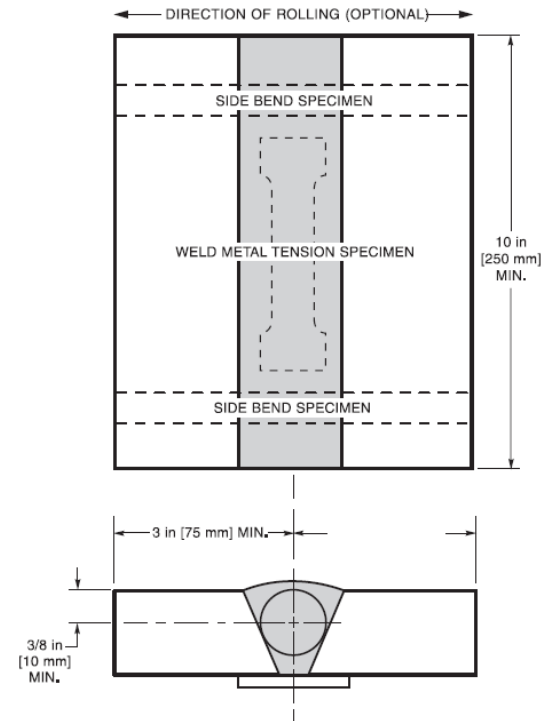
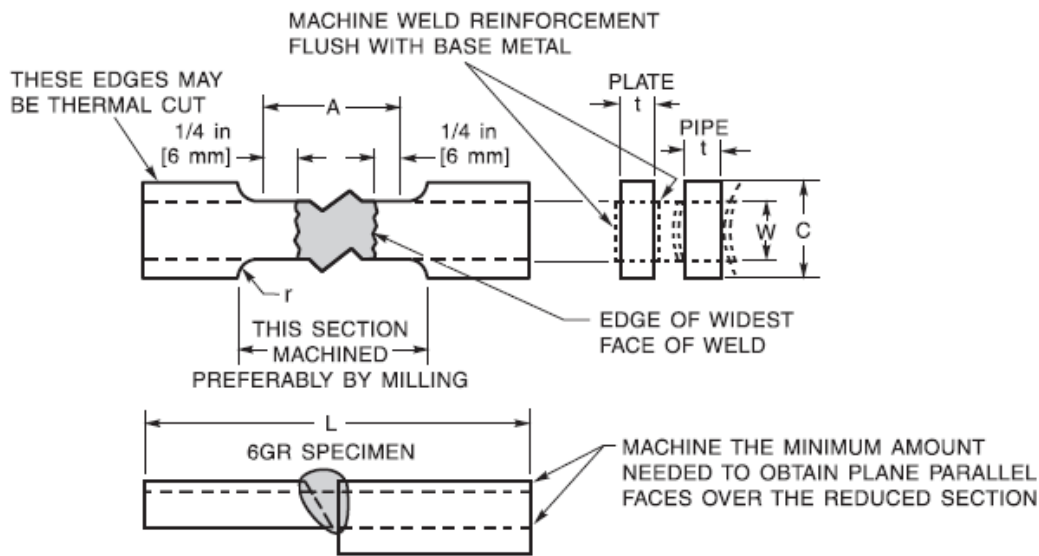
Inicio en el Borde (Pie)



# Ensayos Mecánicos:

## Ensayos de Tracción:

- ✓ Evaluar las propiedades mecánicas en tracción de un material (resistencia y ductilidad).
- ✓ Probeta de tracción de sección reducida (AWS):
- ✓ Probeta de tracción de Metal de Soldadura (AWS):



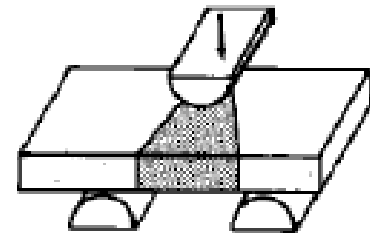
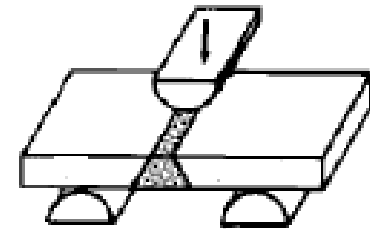
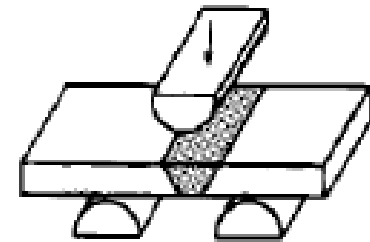
## Ensayos Mecánicos:

### Ensayos de Plegado:

- ✓ Evaluar la ductilidad y/o la ausencia de imperfecciones en uniones soldadas.

#### Variantes del Ensayo de Plegado:

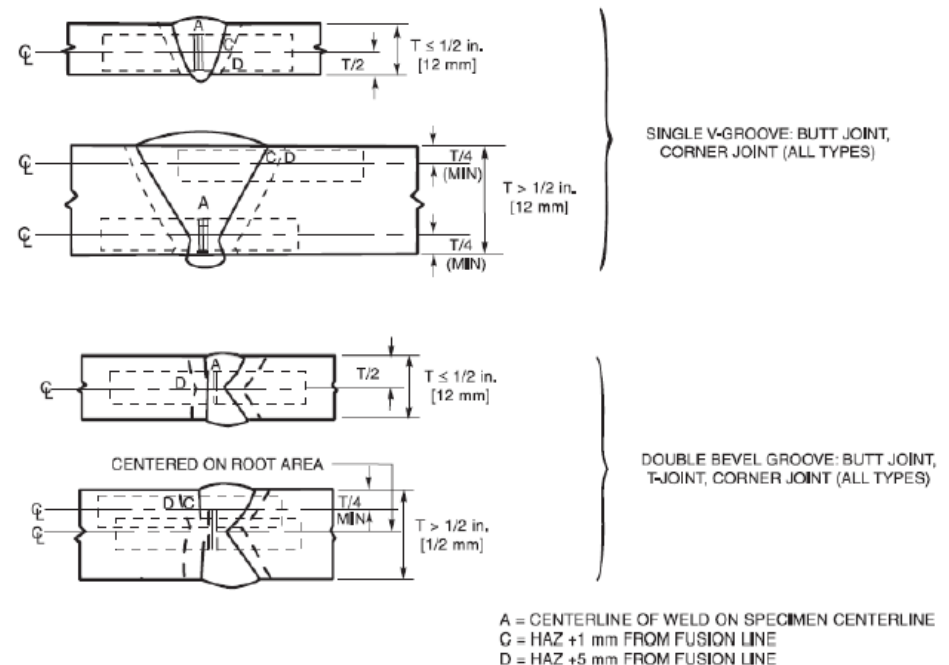
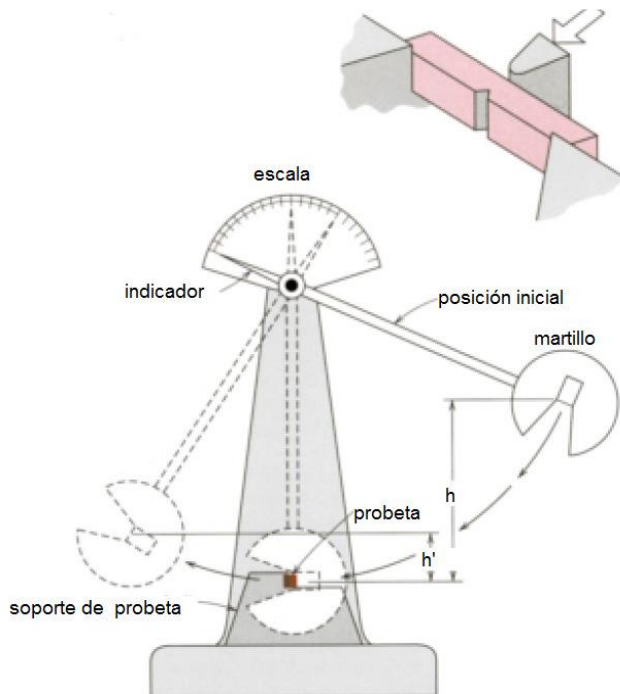
- ✓ **Plegado de Raíz:** La raíz de la soldadura es la parte de la probeta traccionada.
- ✓ **Plegado de Cara:** La cara de la soldadura es la parte de la probeta traccionada.
- ✓ **Plegado de Lado:** La probeta es plegada lateralmente (en todo su espesor), de manera tal que toda la unión es sometida a esfuerzos de tracción (para espesores importantes, en general mayores a 10-12 mm).
- ✓ **Etc.**

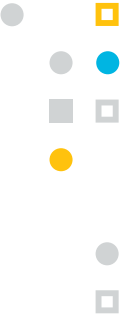


# Ensayos Mecánicos:

## Ensayos de Charpy (Flexión por Impacto):

- ✓ Determinar el cambio en el modo de la fractura (dúctil – frágil) de un material en función de la temperatura.
- ✓ Determinar la energía absorbida a una determinada temperatura.





## Ensayos Mecánicos:

- ✓ Ensayos de Dureza (Brinell, Rockwell, Vickers, ...)
- ✓ Ensayo de Nick Break
- ✓ Ensayo de Fractura de Filete
- ✓ Ensayos Fractomecánicos (Fractoténacidad)
- ✓ Ensayos de Fatiga (y Corrosión-Fatiga)
- ✓ Ensayos de Creep
- ✓ Etc. ...



# Referencias



## Referencias

Jenney, C. L., & O'Brien, A. (Eds.). (2001). Welding handbook: welding science and technology (9<sup>a</sup> ed., Vol 1). American Welding Society.

AWS BIC Standing Task Group on Welding Inspection Handbook (2015). Welding Inspection Handbook (4<sup>a</sup> ed.) American Welding Society.

Radaj, D. (2012). Heat effects of welding: temperature field, residual stress, distortion. Springer Science & Business Media.

Kou, S. (2003). Welding Metallurgy (2<sup>a</sup> ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Masubuchi, K. (1980). Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion, and their Consequences (1<sup>a</sup> ed.). Pergamon Press.

Macdonald, K. (Ed.). (2011). Fracture and fatigue of welded joints and structures. Woodhead Publishing Limited.

Moore, P., & Booth, G. (2014). The welding engineer's guide to fracture and fatigue. Woodhead Publishing Limited.



# MUCHAS GRACIAS

Si querés saber más del **INTI**  
te esperamos en

-  INTIArg
-  @INTIargentina
-  INTI
-  @intiargentina
-  canalinti

[www.inti.gob.ar](http://www.inti.gob.ar)  
[consulta@inti.gob.ar](mailto:consulta@inti.gob.ar)  
0800 444 4004

