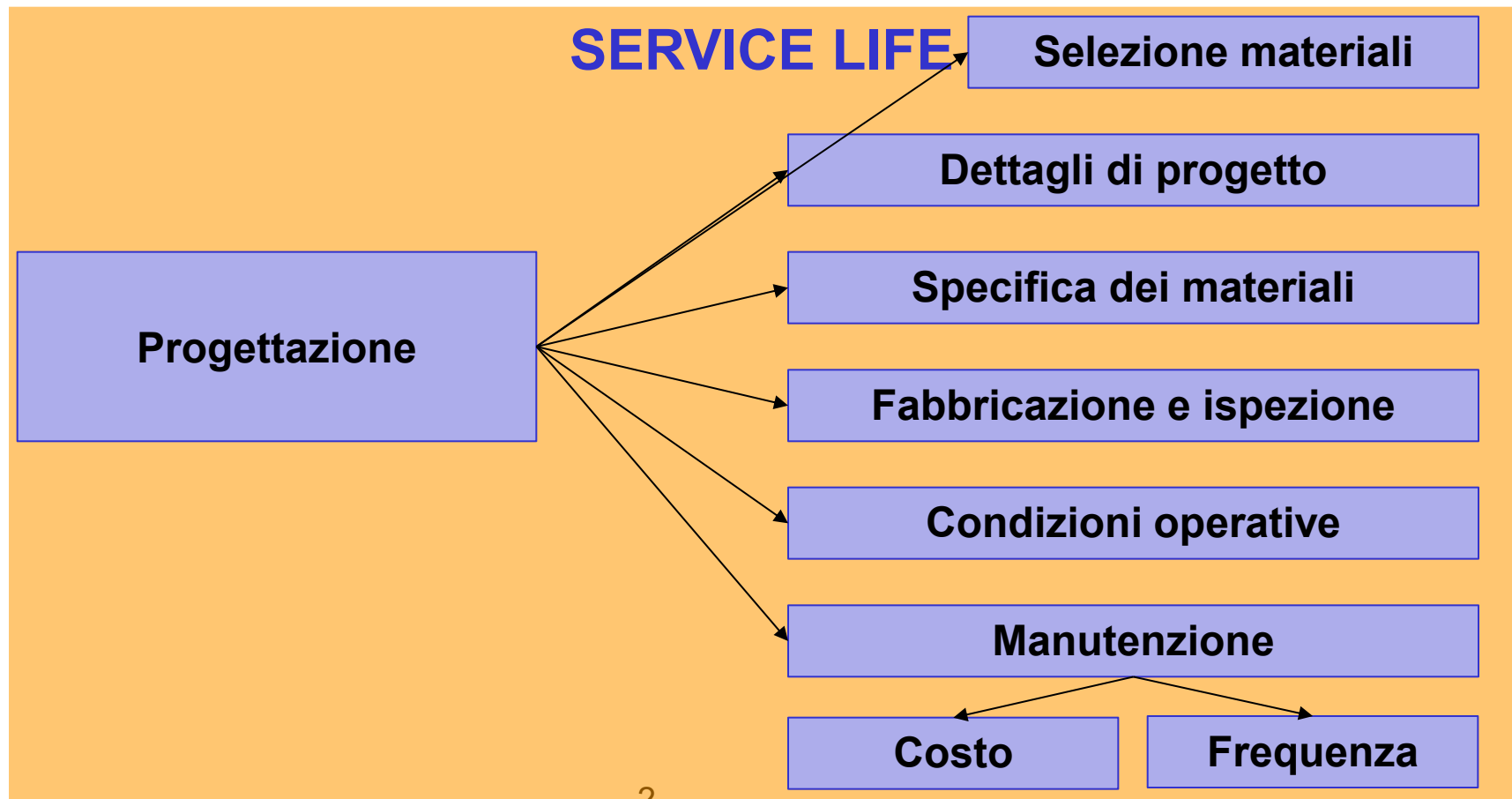


# **Strutture e proprietà dei metalli**

# Approccio nella selezione dei materiali

- La **selezione del materiale** per la costruzione di un componente o di un apparecchio è un **passaggio fondamentale** durante la progettazione



# Dettagli di progetto

- **Specifiche brevi e concise**
  - Requisiti
  - Livelli di qualità
- Evitare indicazioni vaghe o imprecise
- Definire i **criteri di accettabilità per le saldature**
- Definire l'estensione dei controlli
- **Costi**
  - Troppo contenuti possono influire sulla qualità finale
  - Usare materiali disponibili in commercio può ridurli
- **Sicurezza**

Verifiche e test dell'apparecchio



# Condizioni Operative

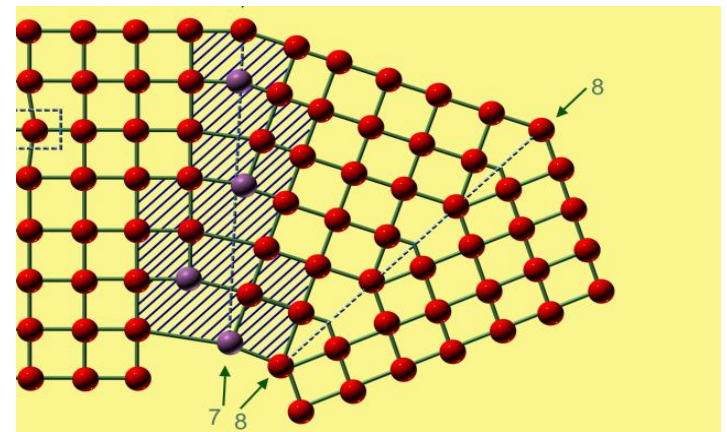
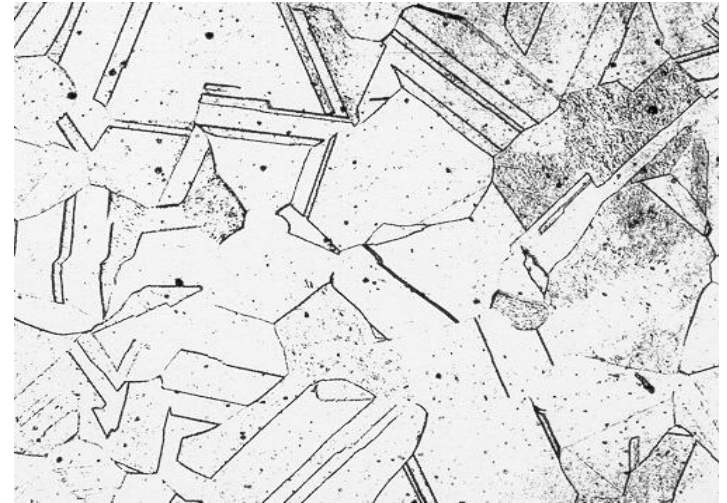
- **Processo:** temperatura, pressione, fluido, ambiente corrosivo
- **Suscettibilità del materiale** di costruzione al degrado (meccanico e metallurgico) in determinate condizioni (***grafitizzazione, infragilimento, creep, fatica termica...***) e interazione con l'ambiente corrosivo ed il fluido
- Sensibilità del materiale in funzione della composizione chimica
- Processo di saldatura impiegato
- **Influenza della saldatura** sull'affidabilità di un apparecchio a pressione durante l'esercizio
- **Competenza del fabbricante**
  - Personale CND qualificato
  - Personale di saldatura qualificato
  - Certificazione QA/QC documentata

# Condizioni Operative

- **Trattamento Termico** richiesto (riduzione delle tensioni e incremento della resistenza alla corrosione)
- Il materiale è **sensibile al T.T.?**
- Il materiale è **sensibile alle lavorazioni di macchina?** (stato tensionale interno)
- Necessità di **opportuni materiali d'apporto** per la saldatura onde evitare criticità durante l'esercizio

# La struttura dei metalli: i grani

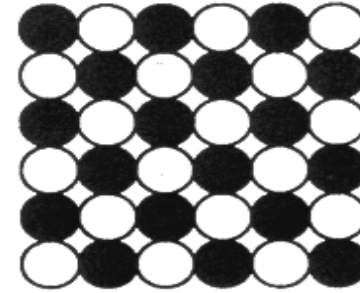
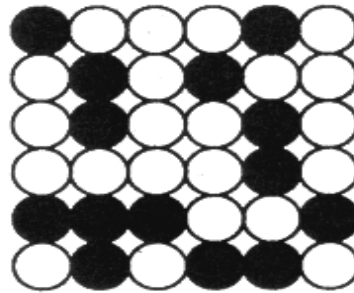
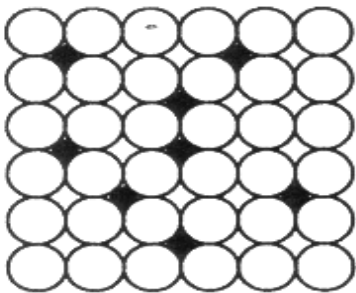
- Analizzando ad elevato ingrandimento un metallo, esso appare costituito da zone coerenti, denominate **grani** (o cristalli) , e da zone di confine dette di **bordo grano**
  - La **dimensione del grano** è influenzata dalla **composizione chimica** e dalla **velocità di raffreddamento**
  - La **zona del bordo del grano**, in quanto zona di transizione, risulta meno compatta del reticolo cristallino
  - A **temperatura ambiente** risultano più resistenti i materiali a grano fine
  - Ad **alta temperatura** (creep) risultano più resistenti i materiali a grano grosso



Grano e bordo grano  
(metallografia e  
rappresentazione schematica)

# Leghe: soluzioni solide

- Una lega è il prodotto dell'unione di due o più elementi puri
- L'elemento quantitativamente preponderante è detto **solvente**, quello in minore quantità è detto **soluto**
- Una **soluzione solida** è caratterizzata da atomi di soluto che si attraggono in modo analogo agli atomi del solvente:
  - **soluzione solida di sostituzione (casuali o ordinate)** - gli atomi di solvente e soluto hanno dimensioni paragonabili (differenti per almeno il 15%)
  - **soluzione solida di inserzione** - gli atomi del soluto hanno piccole dimensioni rispetto al solvente

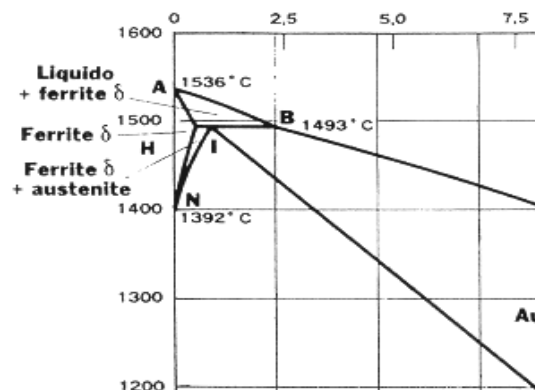


# Fine





# Il diagramma di stato ferro - carbonio: $A_1$ ed $A_3$



## Le linee di trasformazione

- Le linee di trasformazione durante il raffreddamento sono indicate con  $A_r$ , quelle durante il riscaldamento con  $A_c$
- $A_1$  indica le temperature di equilibrio tra austenite e perlite: nel raffreddamento, l'austenite si decompone in perlite eutettoide (cementite + ferrite)
- $A_3$  indica le temperature di equilibrio tra austenite e ferrite; al di sopra di  $A_3$ , l'austenite è stabile, al di sotto è stabile la ferrite
- In una lega Fe - C tutte le trasformazioni di fase avvengono nell'ambito di un certo  $\Delta T$ , a parte la trasformazione  $A_1$ , isoterma ( $723^\circ\text{C}$ )

Diagramma di stato Fe-C

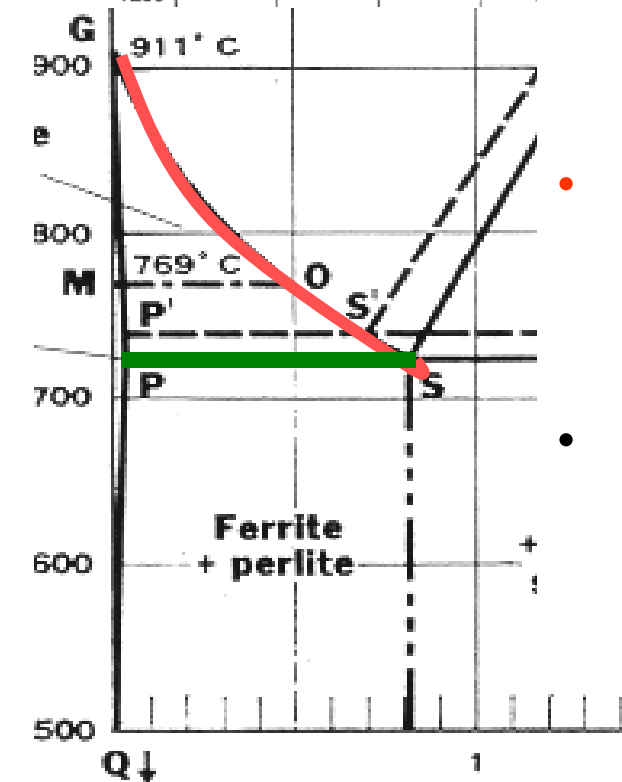
$A_1$  ed  $A_3$

Solidificazione e  $\delta \rightarrow \gamma$

$\gamma \rightarrow \alpha$   
(ipoeutettoidi)

$\gamma \rightarrow \alpha$   
(eutettoidi ed ipoeutettoidi)

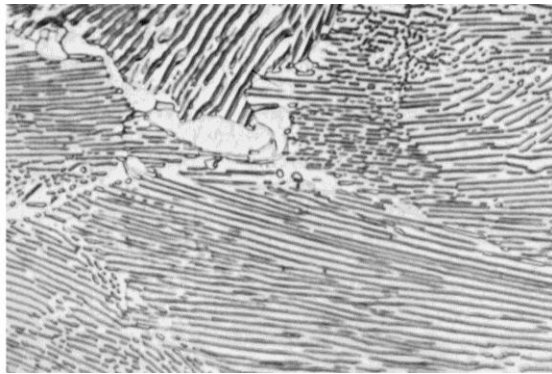
Fine



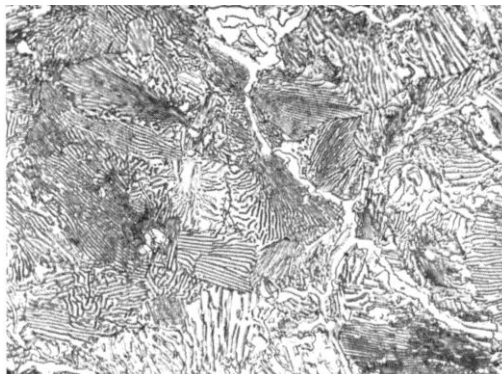
Contenuto di cementite in peso %

# Strutture all'equilibrio del ferro

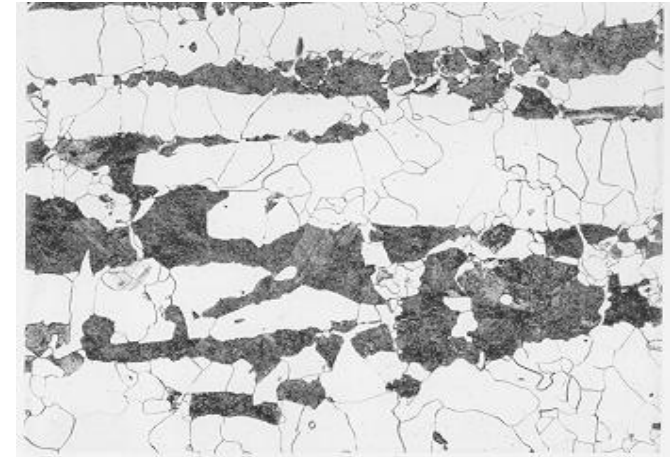
- La **ferrite** è una soluzione solida di inserzione di C nel ferro alfa
  - In funzione della T di riferimento, è denominata ferrite **delta** (a T superiori) o ferrite **alfa** (a T inferiori)
- L'**austenite** è una soluzione solida di inserzione di C nel ferro gamma
- La **perlite** è l'eutettoide del sistema ferro carbonio che si forma alla T di 723°C
  - Si tratta di una lega di **giustapposizione** composta da lamelle fini di **ferrite** e di **cementite**, nella quale il C ha il valore medio dello **0.83%**



STRUTTURA PERLITICA DI UN ACCIAIO EUTOTTOIDE



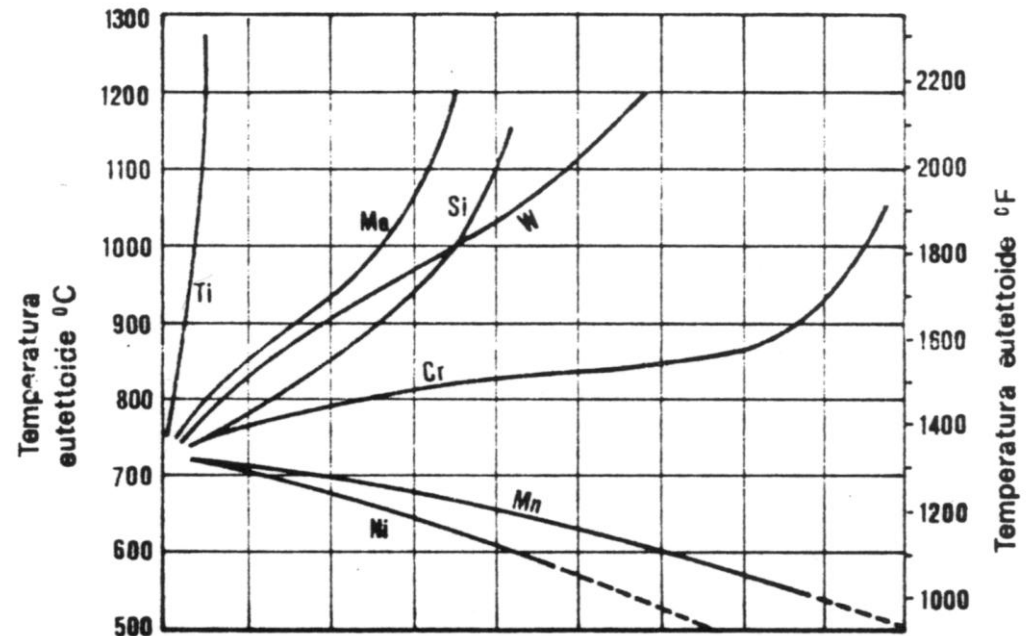
STRUTTURA AUSTENITICA DI UN ACCIAIO



STRUTTURA FERRITICO – PERLITICA  
DI UN ACCIAIO AL C

# Influenza degli elementi di lega (temperatura Ac1)

- In funzione della presenza di elementi di lega nel materiale, si verifica una variazione delle caratteristiche meccaniche e delle temperature di trasformazione, e di A1 in particolare.
- In generale si distingue tra:
  - **Ferritizzanti**, come Titanio, Cromo, Molibdeno
  - **Austenitizzanti**, come Manganese e Nichel

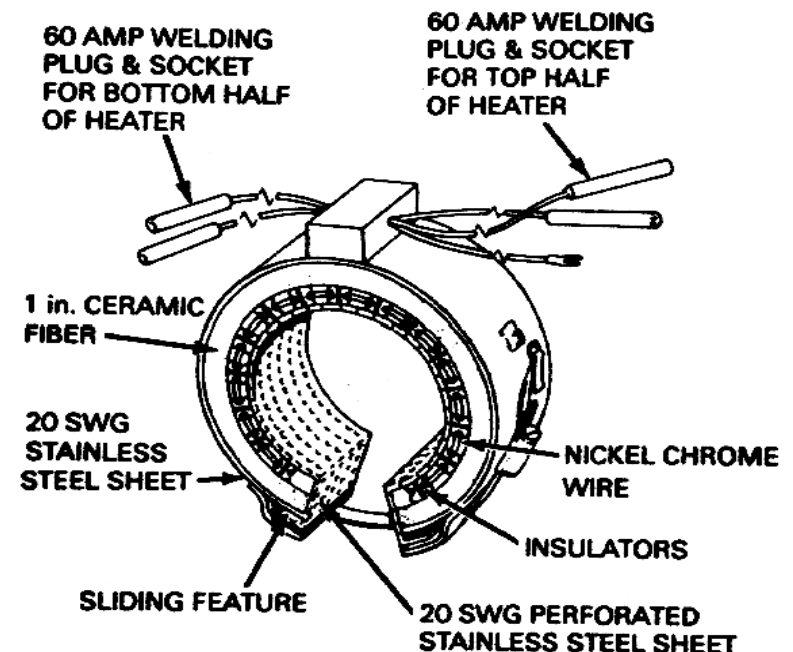


# **I principali trattamenti termici dei materiali base e dei giunti saldati**



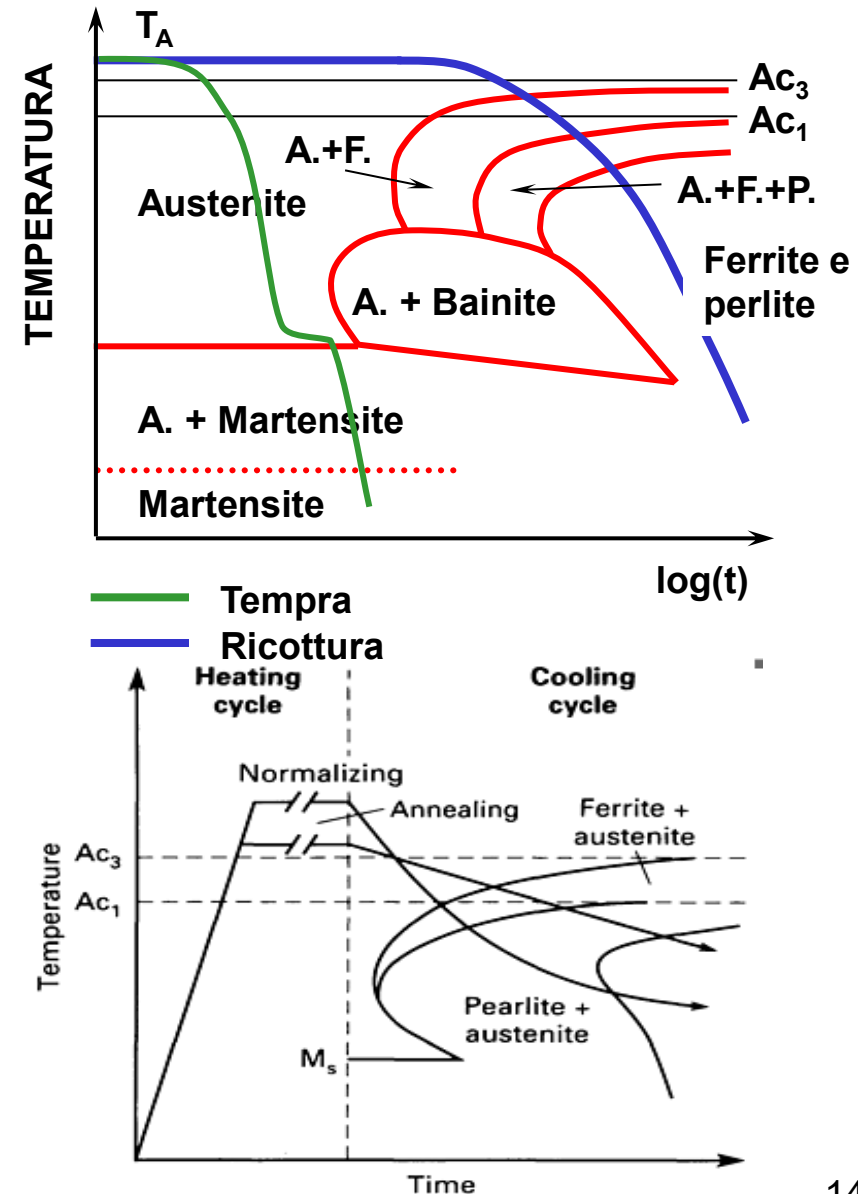
# Trattamenti termici dei materiali base e dei giunti saldati

- Un modo per **influire termicamente sulle proprietà** dei metalli, consiste nell'esecuzione di trattamenti termici.
- La finalità principale per i **metalli base** è **modificare la microstruttura iniziale del materiale** (dimensioni e forma dei grani, composizione e tipologia delle fasi presenti), in modo tale che il materiale o il giunto siano idonei all'utilizzo previsto.
- Le finalità per i **giunti saldati** possono essere
  - Modificare la **microstruttura del materiale**
  - Ridurre o eliminare le **tensioni di ritiro**



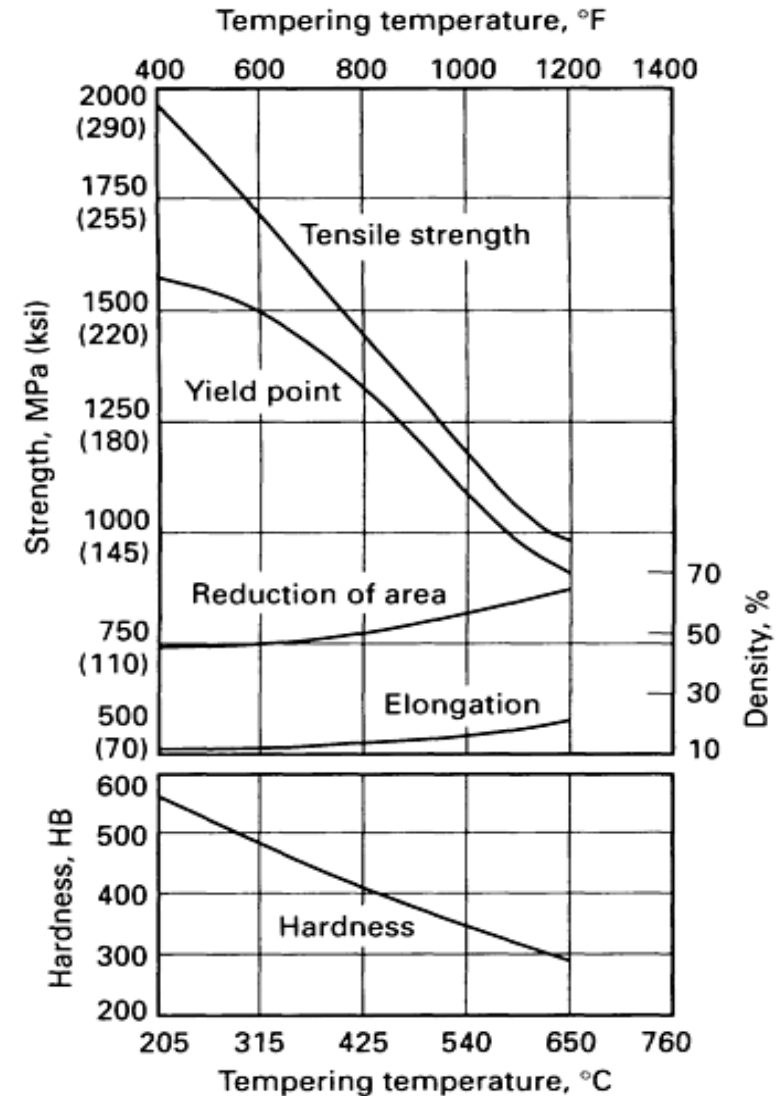
# Classificazione dei trattamenti termici – effetti

- Trattamenti durante i quali la **temperatura massima raggiunta è tale da ottenere la completa austenitizzazione**
  - **Ricottura:** La struttura finale, a grano “grosso”, è caratterizzata da notevole duttilità, dolcezza e lavorabilità
  - **Normalizzazione:** La struttura finale presenta un **grano molto fine e regolare**; la resistenza meccanica e il carico unitario di snervamento sono **significativamente superiori** rispetto allo stato ricotto.
  - **Tempra:** La struttura ottenuta con la tempra è particolarmente dura e fragile, talvolta è necessaria per particolari meccanici soggetti ad usura;



# Classificazione dei trattamenti termici – effetti

- Trattamenti durante i quali la temperatura massima raggiunta **non comporta l'austenitizzazione**:
  - **Distensione**: utilizzato per **ridurre le tensioni residue** indotte grazie alla diminuzione del carico unitario di snervamento con l'aumentare della temperatura
  - **Rinvenimento**: consente la **riduzione della durezza** e **l'incremento della tenacità** delle **strutture temprate**
- Tempra e rinvenimento, eseguite in sequenza, costituiscono il **trattamento di Bonifica**



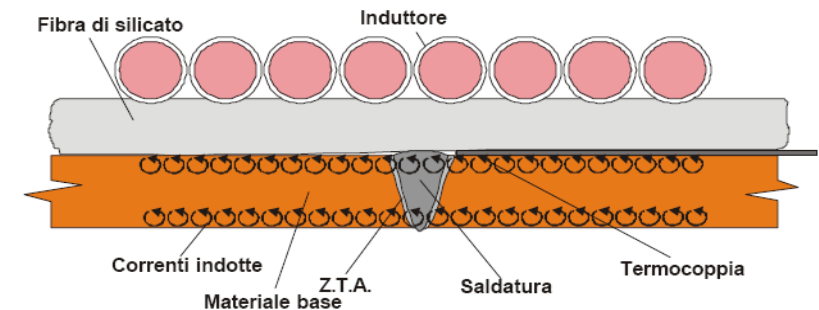
Acciaio AISI 4340

# Classificazione dei trattamenti termici - modalità

- I trattamenti termici possono essere eseguiti in **modalità**:
  - **Generalizzata**, coinvolgendo tutta la struttura
  - **Localizzata**, realizzata cioè su un particolare componente (tipicamente sui giunti saldati)
  - I trattamenti localizzati possono essere realizzati **esclusivamente su componenti a geometria cilindrica o sferica**
- Le **apparecchiature** per l'esecuzione del trattamento possono essere
  - **Forni** (a gas, elettrici, a riscaldamento indiretto)
  - Sistemi ad **aria calda**
  - Sistemi con **resistenze elettriche**
  - Sistemi ad **induzione**



SERBATOIO COIBENTATO QUASI COMPLETAMENTE



PRINCIPIO DEL TRATTAMENTO LOCALIZZATO AD INDUZIONE



# **Acciai al carbonio**

# Classificazione e campo d'impiego degli acciai

	Operating temperature (°C)	Examples of designation	Standard reference
<b>Plain Carbon and Carbon - Manganese Steels</b>	-20 ÷ 400	S235JR, S275JR, S355JR	UNI EN 10025
<b>Fine - Grained Steels</b>	-50 ÷ 400	P235GH, P355GH, S355N, S355 M	UNI EN 10028-2 UNI EN 10113
<b>Quenched and Tempered Steels</b>	-60 ÷ 400	S460Q, S550Q, S960Q	UNI EN 10137
<b>Cr-Mo Steels</b>	20 ÷ 650	16 Mo 3, 14 Cr Mo 4 5, 10 Cr Mo 9 10	UNI EN 10028-2
<b>Ni Steels</b>	-200 ÷ 50	12 Ni 14, 12 Ni 19, X 7 Ni 9	UNI EN 10028-4
<b>Cr Stainless Steel</b>	600 ÷ 900	X 12 Cr 13, X 6 Cr 17	UNI EN 10088
<b>Cr-Ni Stainless Steel</b>	-200 ÷ 900	X 4Cr Ni 18 12, X 2 Cr Ni Mo 17 11 2	UNI EN 10088
<b>DUPLEX Stainless Steel</b>	-30 ÷ 280	X 2 Cr Ni N 23 4, X 2 Cr Ni Mo N 22 5 3	UNI EN 10088

# Acciai al carbonio : applicazioni

- Applicazioni al campo **strutturale**, navale, **caldereria**, strutture **off – shore** e **ponti**



Costruzione di un recipiente a pressione



Costruzione in campo navale



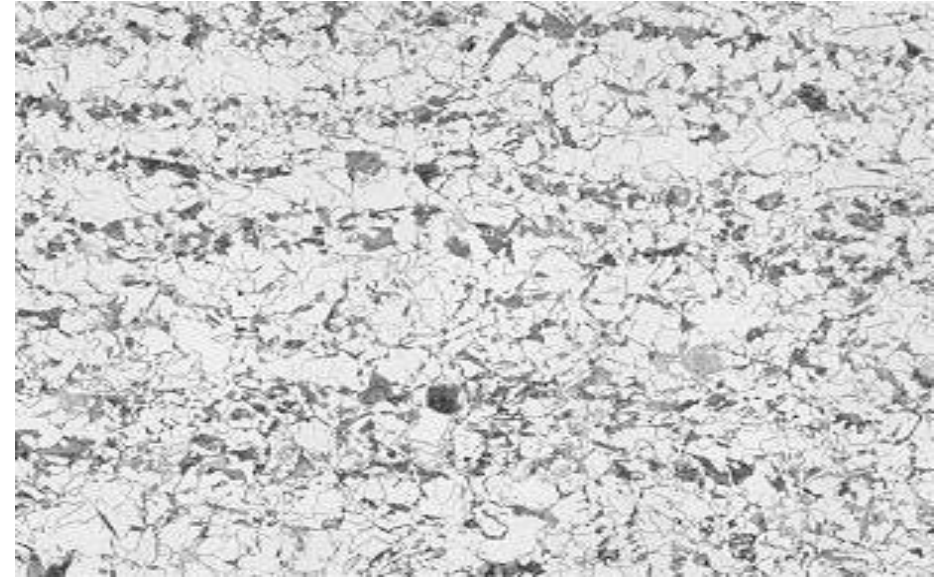
Costruzione di un ponte saldato



Fasi realizzative della costruzione di piattaforme off-shore

# Acciai al carbonio: metallurgia

- Metallurgia: è caratterizzata dalla presenza di Mn con tenori fino a (circa) 1,7%:
  - **aumento Rm e tenacità**
  - **disossidante, desolforante** (MnS)
  - **austenitizzante**: abbassa le temperature di trasformazione, favorisce un forte affinamento del grano.

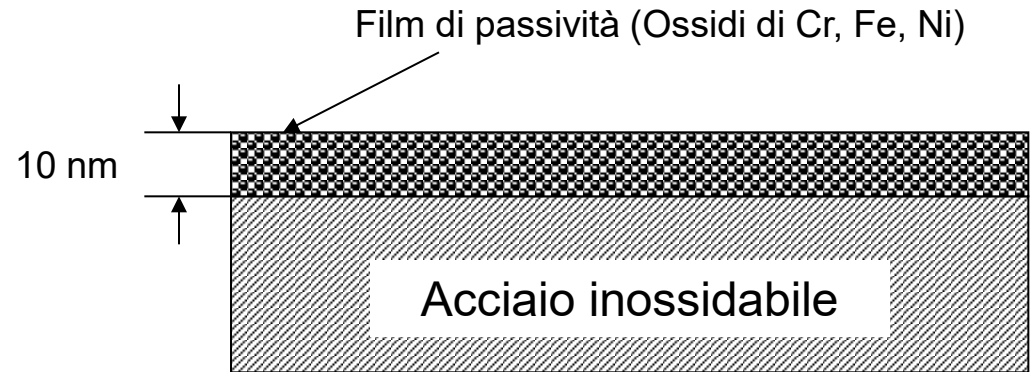


Acciai al carbonio: struttura  
ferritico - perlitica

# Acciai inossidabili

# Introduzione

- Effetti del **cromo** sul comportamento degli acciai.
  - Elemento attivo (facilmente ossidabile).
  - Ossido tenace, impermeabile e poco solubile negli elementi corrosivi
  - Già per tenori di Cr > 5% si buona resistenza all'ossidazione a caldo
- Per definizione, gli acciaio vengono classificati come **inossidabili** quando il **Cr > 12%**
- L'**aggiunta di Ni** migliora la resistenza alla corrosione in ambienti debolmente ossidanti, la duttilità e la resistenza ad alta temperatura.





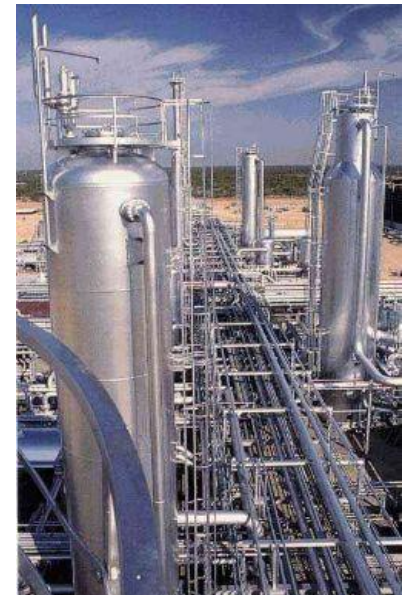
# Acciai inossidabili

- Sulla base della composizione chimica, si possono distinguere:
  - Acciai inossidabili **tradizionali**:
    - *Martensitici*
    - *Ferritici*
    - *Semiferritici*
    - *Austenitici*
  - Acciai inossidabili **speciali**:
    - *Supermartensitici*
    - *Superaustenitici*
    - *Superferritici*
    - *Austeno-ferritici (duplex)*
    - *Indurenti per precipitazione (PH)*
- Queste distinzioni sono puramente indicative, essendo la struttura variabile sulla base del trattamento di fornitura dell'acciaio
- La diversa aggiunta di elementi di lega può espandere, restringere o eliminare la fase gamma austenitica



# Acciai inossidabili austenitici

- Sono caratterizzati da una struttura **austenitica** stabile che consente il miglioramento delle caratteristiche meccaniche solo mediante **aggiunta di elementi di lega in soluzione solida** e mediante **lavorazioni e freddo** (“**work hardening**”).
- L’elevata tenacità anche a basse temperature consente l’applicazione degli acciai inossidabili austenitici fino a temperature dell’ordine di **- 269°C**
- Tali materiali garantiscono una buona resistenza all’ossidazione a caldo anche a  **$T > 600^{\circ}\text{C}$**



**Struttura austenitica**



# Elementi di lega fondamentali

## Cromo (16÷25%)

Garantisce le caratteristiche di resistenza alla corrosione. Aumenta anche le caratteristiche di resistenza all'ossidazione a caldo. E' un elemento ferritizzante.

## Nichel (8÷20%)

Promuove la formazione della struttura austenitica, migliora la duttilità e le tenacità. Incrementa la resistenza a corrosione in ambiente acido.

## Molibdeno

Migliora le caratteristiche di resistenza alla corrosione sia localizzata che generalizzata. Conferisce anche migliori caratteristiche meccaniche. E' un elemento ferritizzante.

## Carbonio (0.02÷0.08%)

Promuove la stabilità della fase austenitica e le caratteristiche meccaniche a caldo

# Elementi di lega fondamentali

## Manganese ( $\cong 2\%$ )

Migliora la lavorabilità a caldo. Il suo effetto sulla stabilità dell'austenite varia con la temperatura: a caldo stabilizza la fase ferritica, mentre a freddo stabilizza la fase austenitica. Aumentando la solubilità dell'azoto migliora è utilizzato negli acciai inossidabili ad alto N (p.e. AISI 316 LN)

## Niobio & Titanio

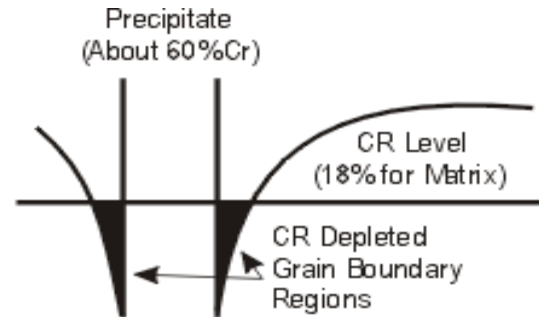
Vengono utilizzati, per la loro proprietà di formare carburi stabili, allo scopo di migliorare la resistenza alla corrosione intergranulare. Aumentano anche le caratteristiche meccaniche ad alta temperatura.

## Azoto

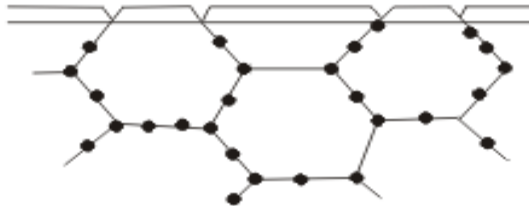
E' un forte stabilizzante della fase austenitica. Migliora le caratteristiche meccaniche e la tenacità a bassa temperatura. In combinazione con il Mo migliora le caratteristiche di resistenza alla corrosione localizzata. Può dare porosità in saldatura



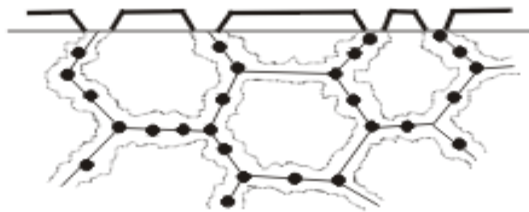
# Effetti conseguenti all'esposizione ad elevata temperatura: precipitazione di carburi



Cr depleted zone around a grain boundary precipitate of secondary carbide



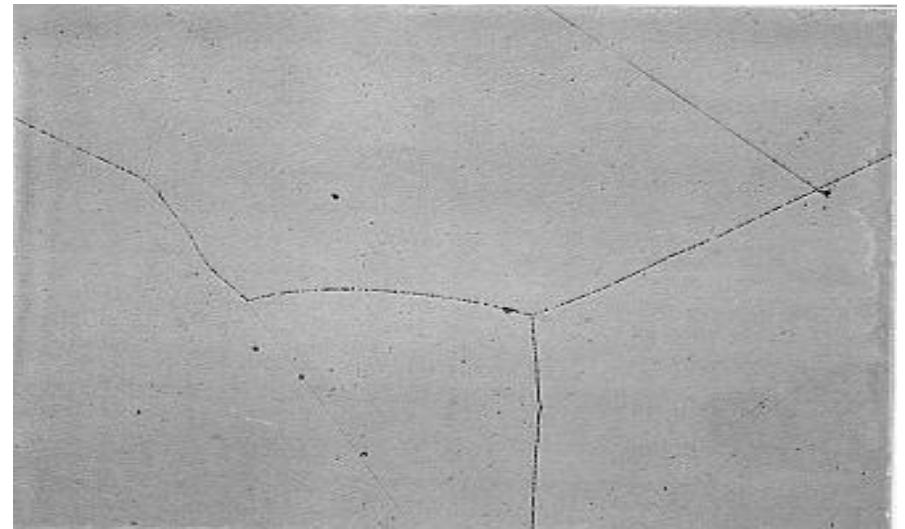
Carbides at grain boundaries



Corrosion at grain boundaries due to regions of Cr depletion

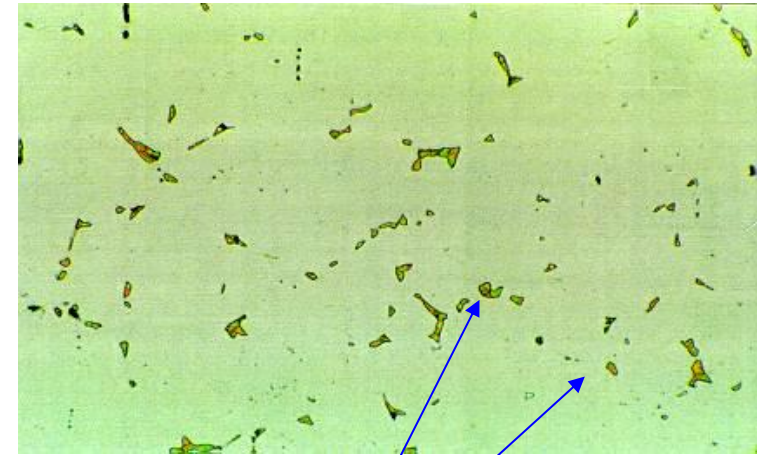
La precipitazione a bordo grano di carburi ricchi in cromo induce un locale impoverimento di di cromo nelle zone adiacenti al bordo grano stesso, che diventano più suscettibili alla corrosione in determinati ambienti.

Il tipico intervallo di temperatura di precipitazione è  $450^{\circ}\div 850^{\circ}\text{C}$



# Effetti dell'esposizione ad alta temperatura: fase $\sigma$

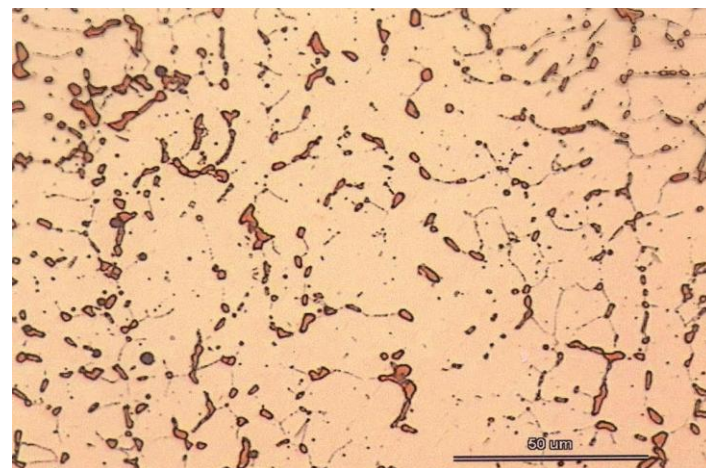
- Fase **intermetallica (Fe-Cr) dura e fragile**, che precipita nel range di temperature  $480^{\circ} \div 900^{\circ}\text{C}$ , ma in tempi apprezzabili a  $550^{\circ}\text{C}$ , e con grande rapidità a temperature di  $800 \div 850^{\circ}\text{C}$ .
  - Precipita principalmente a **partire dalla ferrite  $\delta$**  presente nel materiale (in modo comunque non proporzionale);
  - Può formarsi anche dall'austenite (soprattutto in acciai molto legati) ma con tempi più lunghi e a temperature più elevate.
  - La precipitazione è favorita negli acciai che contengono **Mo**
- Piccole quantità di fase  $\sigma$  (fino al 5%) non creano problemi in quanto la fase risulta discontinua nella matrice.



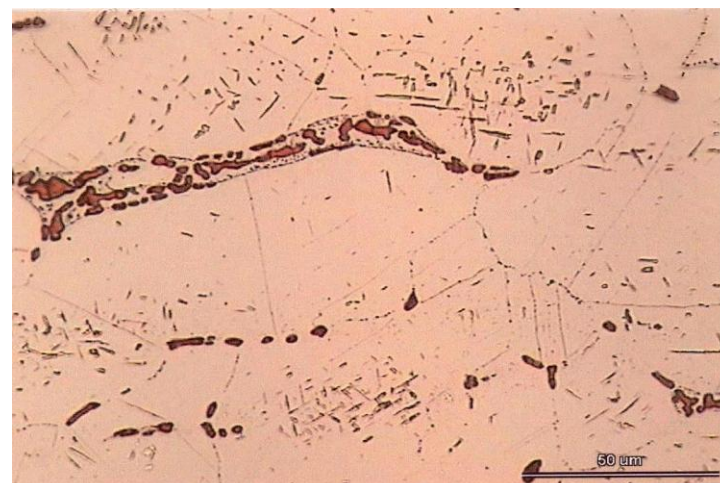
Fase  $\sigma$

# Precipitazione di fase $\sigma$

- Un acciaio inossidabile del tipo AISI304 caratterizzato dalla presenza di una quantità di fase sigma pari al 10% ha una tenacità a 650°C di circa 50 J, a fronte di valori pari a 260 J del materiale solubilizzato (senza fase sigma).
- Pertanto, per applicazioni ad alta temperatura il materiale con fase sigma possiede ancora un certo margine di tenacità, e la presenza della suddetta fase intermetallica può essere tollerata
- Il valore della tenacità a temperatura ambiente di un acciaio 304 contenente il 10 % di fase sigma è pari a circa 17J.
- La bassa tenacità a temperatura ambiente comporta la necessità di limitare le sollecitazioni meccaniche a freddo su materiali contenenti fase sigma (p.e. nel corso di fermate e/o avviamento di impianti che lavorano ad elevate temperature)



**Fase  $\sigma$  precipitata da ferrite delta in un AISI 304H (MB)**



**Fase  $\sigma$  precipitata da ferrite  $\delta$  in un acciaio 308H (ZF)**

# Trattamenti termici (PWHT)

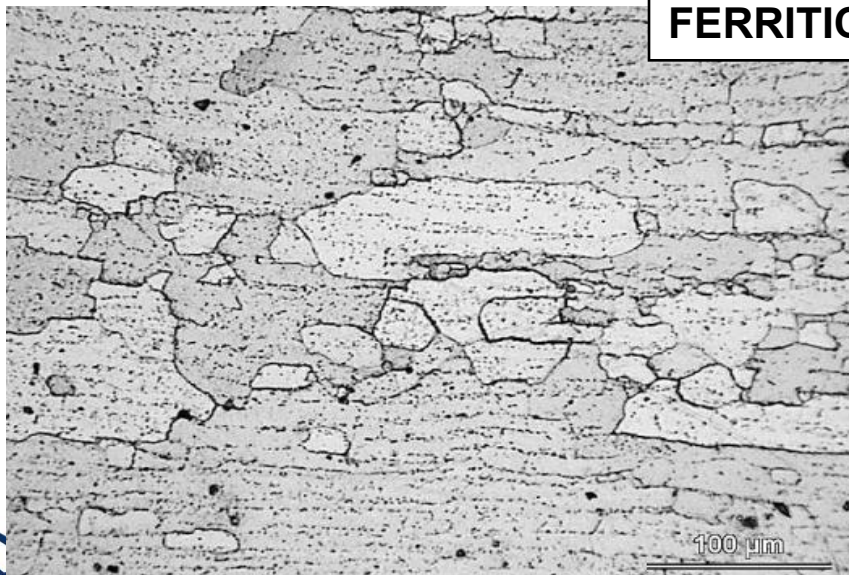
- **Solubilizzazione** ( $980^{\circ}\div 1120^{\circ}\text{C}$ ), per ripristinare le caratteristiche di resistenza alla corrosione:
  - può ridurre le tensioni residue, spesso, però, reintrodotte dai rapidi raffreddamenti richiesti;
  - i tempi di mantenimento devono essere limitati per **evitare la crescita del grano** (3 min ogni 2.5 mm di spessore);
  - il trattamento **non può essere locale**, ma tutto il componente deve essere riscaldato;
  - raffreddamento uniforme e rapido;
  - meglio eseguire il trattamento in atmosfera controllata per evitare ossidazioni eccessive; altrimenti si richiedono metodi di trattamento superficiale (molatura, sabbiatura, decapaggio, ecc.).
- **Stabilizzazione**, che stabilizza i carburi di cromo, introducendo tuttavia rischi di fragilizzazione (sconsigliato)
- Sono **da evitare** trattamenti di **distensione** al di sopra di  $420^{\circ}\text{C}$ .
  - Alcuni costruttori effettuano trattamenti di distensione a  $T = 200^{\circ}\div 420^{\circ}\text{C}$ , ma tali valori di temperature non garantiscono un'ottimale distensione delle tensioni residue, anche se, in taluni casi, possono ridursi i rischi di SCC.





# Acciai inossidabili al solo Cr

- Martensitici
  - AISI 410: 13% Cr - 0,12% C (max)
- Semiferritici (ferritici della prima generazione)
  - AISI 410S: 13% Cr - 0,08% C
  - AISI 430: 27% Cr - 0,12% C
- Ferritici (ferritici della seconda generazione)
  - AISI 446: 27% Cr - 0,20% C
  - AISI 405: 13% Cr - 0,07% C - 0,28% Al



FERRITICO



MARTENSITICO

## Acciai inossidabili al solo Cr martensitici: applicazioni

- Sono caratterizzati da [buone proprietà meccaniche](#), di resistenza al [Creep](#) (utilizzati fino a 650°C), di resistenza a [fatica](#) e da discrete caratteristiche di [resistenza alla corrosione](#) .
- Trovano applicazione nella realizzazione di [turbine a vapore](#), [turbine a gas](#), [motori aeronautici](#), [impianti petroliferi](#) e [petrolchimici](#).
- Le leghe a più alto carbonio sono utilizzate nella realizzazione di [alberi di trasmissione](#), [ingranaggi](#), [strumenti chirurgici](#) ecc.





# Acciai inossidabili austeno-ferritici (DUPLEX)

- Acciai a **struttura bifasica**
  - buona resistenza in ambienti contenenti clorur
  - buona resistenza alla vaiolatura (“Pitting Corrosion”)
  - **ottima resistenza alla tenso-corrosione**

$$PRE = Cr + 3,3 Mo + 16N$$

PRE = 30 - 40 => DUPLEX

PRE > 40 => SUPERDUPLEX



**Microstruttura bifasica - acciaio inossidabile austeno ferritico (SAF2205)**

Alloy	UNS Number	Composition <sup>a,b,c</sup>						Other Elements
		C	Cr	Ni	Mo	N		
329	S32900	0.08	23.0-28.0	2.5-5.0	1.0-2.0	—		—
44LN	S31200	0.030	24.0-26.0	5.5-6.5	1.2-2.0	0.14-0.20		—
DP3	S31260	0.030	24.0-26.0	5.5-7.5	2.5-3.5	0.10-0.30	0.20-0.80 Cu; 0.10-0.50 W	
2205	S31803	0.030	21.0-23.0	4.5-6.5	2.5-3.5	0.08-0.20		—
2304	S32304	0.030	21.5-24.5	3.0-5.5	0.05-0.6	0.05-0.20		—
255	S32550	0.04	24.0-27.0	4.5-6.5	2.9-3.9	0.10-0.25	1.5-2.5 Cu	
2507	S32750	0.030	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-5.0	0.24-0.32		—
Z100 <sup>d</sup>	S32760	0.030	24.0-26.0	6.0-8.0	3.0-4.0	0.2-0.3	0.5-1.0 Cu; 0.5-1.0 W	
3RE60	S31500	0.030	18.0-19.0	4.25-5.25	2.5-3.0	—		—
U50 <sup>d</sup>	S32404	0.04	20.5-22.5	5.5-8.5	2.0-3.0	0.20	1.0-2.0 Cu	
7MoPLUS	S32950	0.03	26.0-29.0	3.5-5.2	1.0-2.5	0.15-0.35		—
DP3W	S39274	0.03	24.0-26.0	6.0-8.0	2.5-3.5	0.24-0.32	0.2-0.8 Cu; 1.5-2.5 W	

a. Single values are maximum percentages.

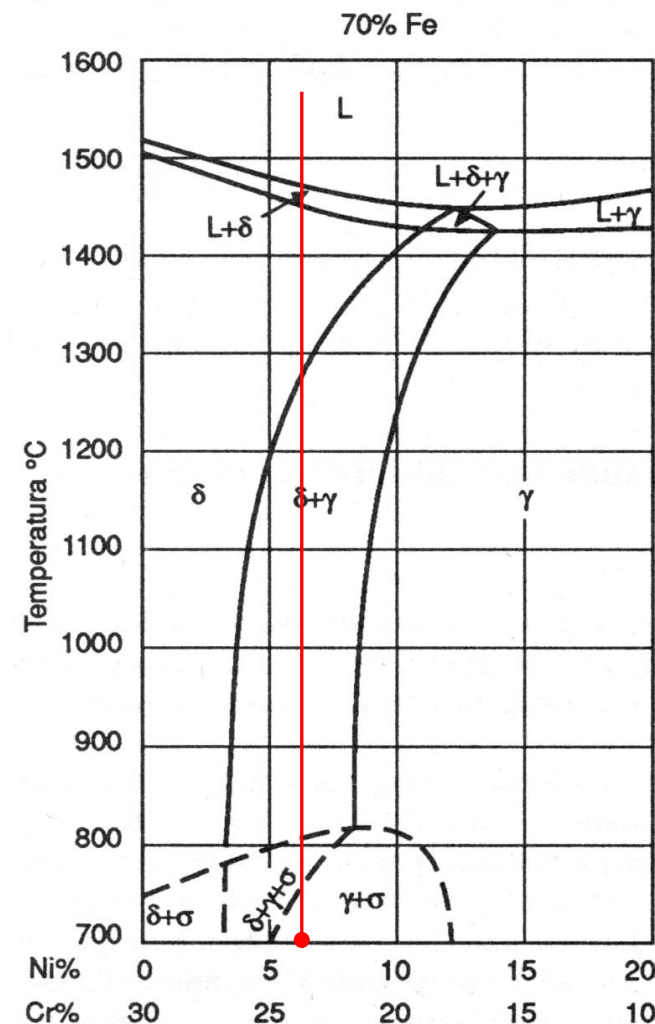
b. 2.5 Mn max.

c. 0.70-1.0 Si max.

d. Z100—Zeron 100; U50—Uranus50

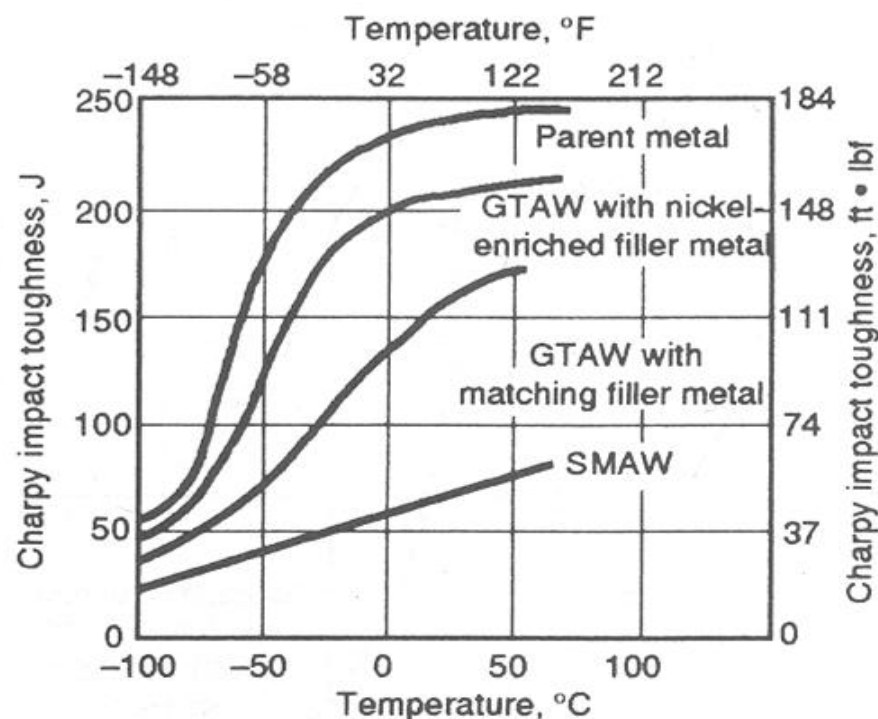
# Resistenza alla corrosione

- Le caratteristiche di resistenza alla corrosione sono attribuibili alla struttura bifasica, ottenuta con:
  - composizione chimica
  - trattamenti termici con raffreddamento controllato tra 1200°C e 800°C
- Rispetto agli acciai inossidabili austenitici hanno una maggiore resistenza alla tenso-corrosione dai cloruri.
- La resistenza alla tenso-corrosione da Cl aumenta con l'aumentare del contenuto degli elementi di lega.
- Gli acciai Duplex sono suscettibili di fenomeni di tenso-corrosione in ambienti  $\text{H}_2\text{S}/\text{Cl}^-$  (in determinate concentrazioni e per temperature tra 60°C e 100°C)



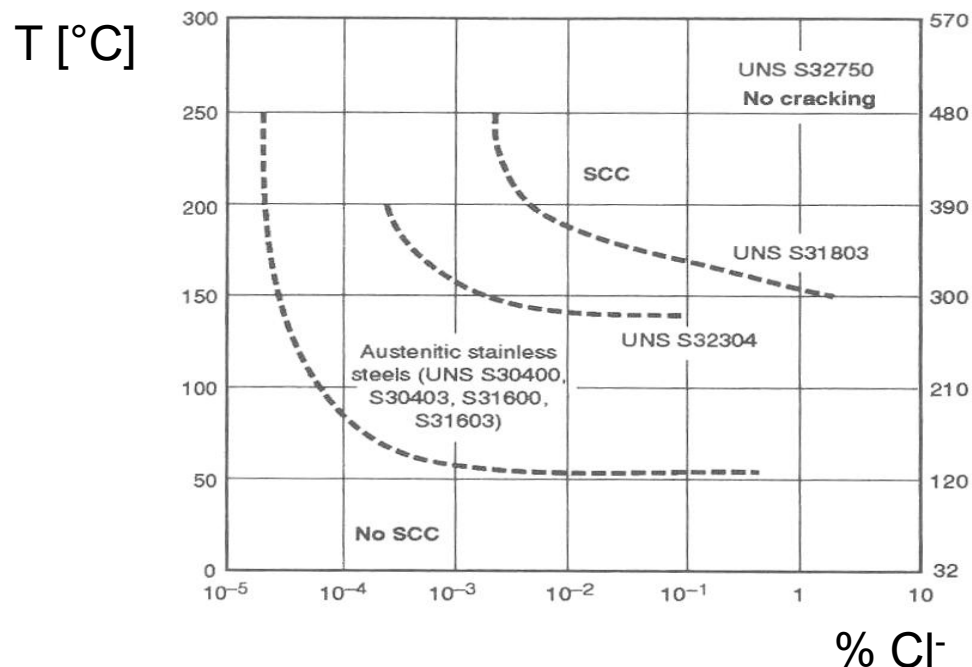
# Caratteristiche d'impiego

- In virtù della struttura bifasica hanno buone caratteristiche meccaniche e ottima resistenza alla tenso-corrosione.
- Sono tutti materiali a basso C (<0.030) quindi non suscettibili alla precipitazione di carburi (sensibilizzazione)
- I differenti elementi di lega favoriscono la cinetica di precipitazione delle fasi fragili
- Temperature d'impiego:
  - Limite di applicazione alle alte temperature (280°C MB e 250° C ZF) per i suddetti problemi di fragilizzazione (fasi intermetalliche).
  - La presenza di ferrite pone un limite di applicazione alle basse temperature (-60°C)

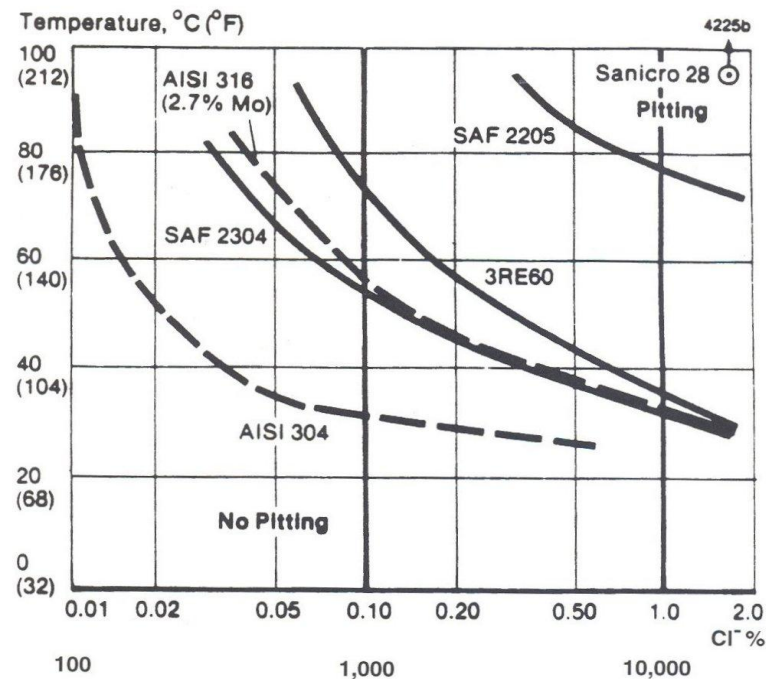


# Acciai inossidabili austeno - ferritici (Duplex)

## Resistenza alla corrosione



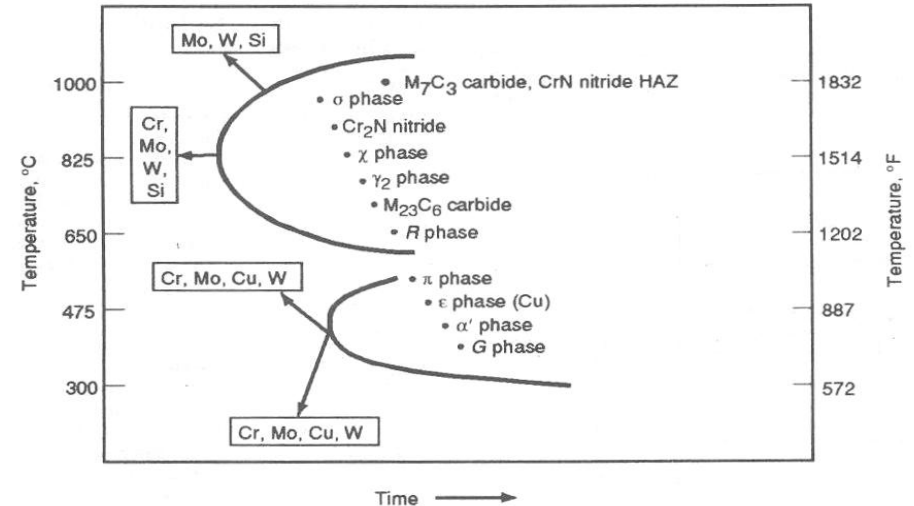
Resistenza alla SCC di alcuni acciai inossidabili in funzione della T e del tenore di ioni cloro



Resistenza alla vaiolatura (pitting) di alcuni acciai inossidabili in funzione della T e del tenore di ioni cloro

# Acciai inossidabili austeno-ferritici (Duplex)

- In virtù della struttura bifasica hanno buone caratteristiche meccaniche e ottima resistenza alla SCC
- Sono tutti materiali a basso C (<0.030) quindi non suscettibili alla Precipitazione di carburi (sensibilizzazione)
- I differenti elementi di lega favoriscono la cinetica di precipitazione delle fasi fragili
- Limite di applicazione alle **alte temperature (280°C MB e 250° C ZF)** per i suddetti problemi di fragilizzazione (fasi intermetalliche).
- La presenza di ferrite pone un limite di applicazione alle **basse temperature (-60°C)**



Precipitazione di fasi nel piano temperatura – tempo per acciai duplex



# Caratteristiche d'impiego

- Scambiatori di calore
- Serbatoi nell'industria chimica
- Reattori nell'industria chimica
- Impianti “flue gas”
- Apparecchiature per impiego in ambienti contenenti acido acetico o fosforico
- Impianti petroliferi e petrolchimici
- Sistemi acqua mare
- Desalinizzatori



# Leghe di nickel, rame e titanio

# Effetto dei principali elementi di lega

- Il Nickel presenta un'elevata **solubilità** nei confronti di numerosi elementi:
  - il **Cu** è completamente solubile allo stato solido (in qualunque percentuale)
  - il **Cr** è solubile sino al 40%
  - il **Mo** è solubile sino a circa il 18%
  - il **Co** è solubile sino a circa il 30%
  - il **Fe** è limitatamente solubile, sino a circa il 5%
- Il **carbonio** ha invece una solubilità praticamente nulla a T ambiente (è circa lo 0,5% a 1300°C)
  - tenori di C anche molto ridotti possono causare la precipitazione di C in forma di grafite
- Si definiscono **leghe di Ni** con tenore di Ni > 30%



La colata da forno elettrico  
di una lega di Ni



# Tipi di lega

- Indurenti per soluzione
- Indurenti per precipitazione
- Indurenti per dispersione

Nominal Chemical Composition of Typical Nickel Alloys

Alloy <sup>a</sup>	UNS Number	Composition, wt %															Other
		Ni <sup>b</sup>	C	Cr	Mo	Fe	Co	Cu	Al	Ti	Nb <sup>c</sup>	Mn	Si	W	B		
Commercially Pure Nickels																	
200	N02200	99.5	0.08	—	—	0.2	—	0.1	—	—	—	0.2	0.2	—	—	—	—
201	N02201	99.5	0.01	—	—	0.2	—	0.1	—	—	—	0.2	0.2	—	—	—	—
205	N02205	99.5	0.08	—	—	0.1	—	0.08	—	0.03	—	0.2	0.08	—	—	—	0.05Mg
Solid-Solution Alloys																	
400	N04400	66.5	0.2	—	—	1.2	—	31.5	—	—	—	1	0.2	—	—	—	—
404	N04404	54.5	0.08	—	—	0.2	—	44	0.03	—	—	0.05	0.05	—	—	—	—
R-405	N04405	66.5	0.2	—	—	1.2	—	31.5	—	—	—	0.1	0.02	—	—	—	—
X	N06002	47	0.10	22	9	18	1.5	—	—	—	—	1	1	0.6	—	—	—
NICR 80	N06003	76	0.1	20	—	1	—	—	—	—	—	2	1	—	—	—	—
NICR 60	N06004	57	0.1	16	—	bal.	—	—	—	—	—	1	1	—	—	—	—
G	N06007	44	0.1	22	6.5	20	2.5	2	—	—	2	1.5	1	1	—	—	—
IN 102	N06102	68	0.06	15	3	7	—	—	0.4	0.6	3	—	—	3	0.005	0.03Zr, 0.02Mg	—
RA 333	N06333	45	0.05	25	3	18	3	—	—	—	1	1.5	1.2	3	—	—	—
600	N06600	76	0.08	15.5	—	8	—	0.2	—	—	—	0.5	0.2	—	—	—	—
601	N06601	60.5	0.05	23	—	14	—	—	1.4	—	—	0.5	0.2	—	—	—	—
617	N06617	52	0.07	22	9	1.5	12.5	—	1.2	0.3	—	0.5	0.5	—	—	—	—
622	N06622	59	0.005	20.5	14.2	2.3	—	—	—	—	—	—	—	3.2	—	—	—
625	N06625	61	0.05	21.5	9	2.5	—	—	0.2	0.2	3.6	0.2	0.2	—	—	—	—
686	N06686	58	0.005	20.5	16.3	1.5	—	—	—	—	—	—	—	3.8	—	—	—
690	N06690	60	0.02	30	—	9	—	—	—	—	—	0.5 <sup>d</sup>	0.5 <sup>d</sup>	—	—	—	—
725	N07725	73	0.02	15.5	—	2.5	—	—	0.7	2.5	1.0	—	—	—	—	—	—
825	N08825	42	0.03	21.5	3	30	—	2.25	0.1	0.9	—	0.5	0.25	—	—	—	—
B	N10001	61	0.05	1	28	5	2.5	—	—	—	—	1	1	—	—	—	—
N	N10003	70	0.06	7	16.5	5	—	—	—	—	—	0.8	0.5	—	—	—	—
W	N10004	60	0.12	5	24.5	5.5	2.5	—	—	—	—	1	1	—	—	—	—
C-276	N10276	57	0.01 <sup>d</sup>	15.5	16	5	2.5 <sup>d</sup>	—	—	0.7 <sup>d</sup>	—	1 <sup>d</sup>	0.08 <sup>d</sup>	4	—	—	0.35V <sup>d</sup>
C-22	N06022	56	0.010 <sup>d</sup>	22	13	3	2.5 <sup>d</sup>	—	—	—	—	0.5 <sup>d</sup>	0.08 <sup>d</sup>	3	—	—	0.35V <sup>d</sup>
B-2	N10665	69	0.01 <sup>d</sup>	1 <sup>d</sup>	28	2 <sup>d</sup>	1 <sup>d</sup>	—	—	—	—	1 <sup>d</sup>	0.1 <sup>d</sup>	—	—	—	—
C-4	N06455	65	0.01 <sup>d</sup>	16	15.5	3 <sup>d</sup>	2 <sup>d</sup>	—	—	—	—	1 <sup>d</sup>	0.08 <sup>d</sup>	—	—	—	—
G-3	N06985	44	0.015 <sup>d</sup>	22	7	19.5	5 <sup>d</sup>	2.5	—	—	0.5 <sup>d</sup>	1 <sup>d</sup>	1 <sup>d</sup>	1.5 <sup>d</sup>	—	—	—
G-30	N06030	43	0.03 <sup>d</sup>	30	5.5	15	5 <sup>d</sup>	2	—	—	1.5 <sup>d</sup>	1.5 <sup>d</sup>	1 <sup>d</sup>	2.5	—	—	—
S	N06635	67	0.02 <sup>d</sup>	16	15	3 <sup>d</sup>	2 <sup>d</sup>	—	0.25	—	—	0.5	0.4	1 <sup>d</sup>	0.015 <sup>d</sup>	0.02La	—
230	N06230	57	0.10	22	2	3 <sup>d</sup>	5 <sup>d</sup>	—	0.3	—	—	0.5	0.4	14	0.015 <sup>d</sup>	0.02La	—
214	N07214	75	0.10	16	—	3	—	—	4.5	—	—	0.5 <sup>d</sup>	0.2 <sup>d</sup>	—	0.01 <sup>d</sup>	0.01Y, 0.1Zr <sup>d</sup>	—
Precipitation-Hardenable Alloys																	
301	N03301	96.5	0.15	—	—	0.3	—	0.13	4.4	0.6	—	0.25	0.5	—	—	—	—
K-500	N05500	66.5	0.10	—	—	1	—	29.5	2.7	0.6	—	0.08	0.2	—	—	—	—
Waspaloy	N07001	58	0.08	19.5	4	—	13.5	—	1.3	3	—	—	—	—	0.006	0.06Zr	—
R-41	N07041	55	0.10	19	10	1	10	—	1.5	3	—	0.05	0.1	—	0.005	—	—
80A	N07080	76	0.06	19.5	—	—	—	—	1.6	2.4	—	0.3	0.3	—	0.006	0.06Zr	—
90	N07090	59	0.07	19.5	—	—	16.5	—	1.5	2.5	—	0.3	0.3	—	0.003	0.06Zr	—
M 252	N07252	55	0.15	20	10	—	10	—	1	2.6	—	0.5	0.5	—	0.005	—	—
U-500	N07500	54	0.08	18	4	—	18.5	—	2.9	2.9	—	0.5	0.5	—	0.006	0.05Zr	—
713C <sup>e</sup>	N07713	74	0.12	12.5	4	—	—	—	6	0.8	2	—	—	—	0.012	0.10Zr	—
718	N07718	52.5	0.04	19	3	18.5	—	—	0.5	0.9	5.1	0.2	0.2	—	—	—	—
X750	N07750	73	0.04	15.5	—	7	—	—	0.7	2.5	1	0.5	0.2	—	—	—	—
706	N09706	41.5	0.03	16	—	40	—	—	0.2	1.8	2.9	0.2	0.2	—	—	—	—
901	N09901	42.5	0.05	12.5	—	36	6	—	0.2	2.8	—	0.1	0.1	—	0.015	—	—
C 902	N09902	42.2	0.03	5.3	—	48.5	—	—	0.6	2.6	—	0.4	0.5	—	—	—	—
IN 100 <sup>e</sup>	N13100	60	0.18	10	3	—	15	—	5.5	4.7	—	—	—	—	0.014	0.06Zr, 1.0V	—
Dispersion-Strengthened Alloys																	
TD Nickel	N03260	98	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2 Th O <sub>2</sub>
TD NICR	N07754	78	—	20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2 Th O <sub>2</sub>

a. Several of these designations use parts of or are registered trade names. These and similar alloys may be known by other designations and trade names.  
b. Includes small amount of cobalt, if cobalt content is not specified.

c. Includes tantalum (Nb+Ta).  
d. Maximum value.  
e. Casting alloys.



# Tipologie di lega

- Una **seconda classificazione** può essere basata sull'elemento (o gli elementi) di lega principale e quelli secondari

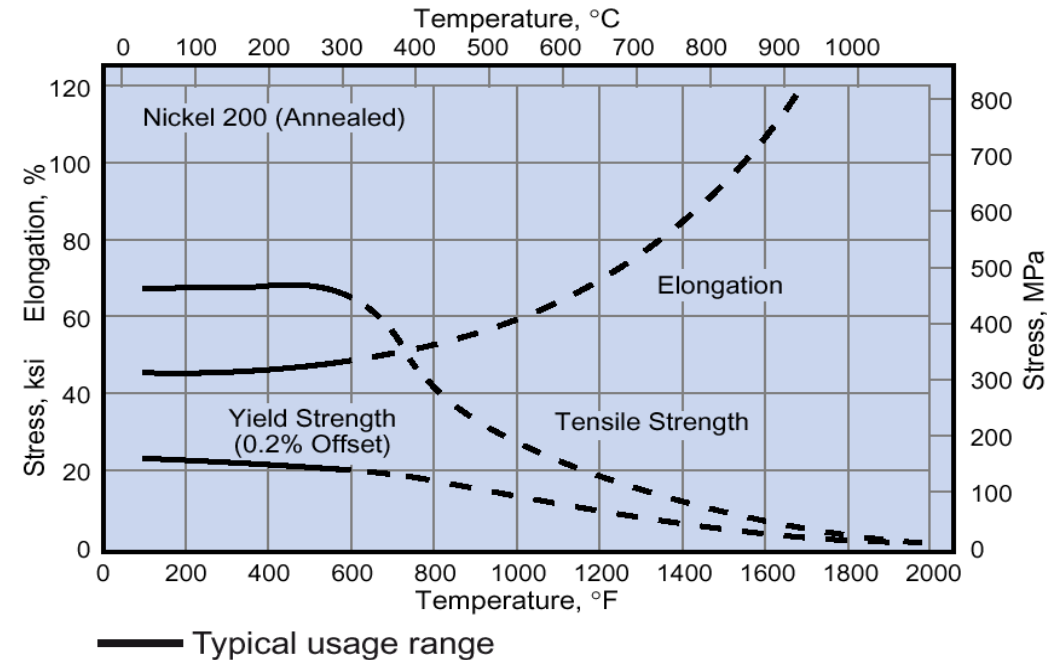
<b>Nichel</b>	Nichel 200 - 201 (C<0.15%-C<0.02%)
<b>Nichel/Rame</b>	Monel 400 (Ni=70%-Cu=30%)
<b>Nichel/Cromo</b>	Nimonic 80A (Ni=76%-Cr=20%) Nimonic 90 (Ni=60%-Cr=20%-Co=16%)
<b>Ferro</b>	Inconel 600 (Ni=75%-Cr=15%-Fe=8%)
<b>Molibdeno/Niobio</b>	Inconel 625 (Ni=60%-Cr=20%-Mo=9%-Nb=3.5%)
<b>Ferro/Molib/Rame</b>	HastelloyG (Ni=45%-Cr=22%-Fe=20%-Mo=7%-Cu=2%)
<b>Ferro/Molib/Cobalto</b>	HastelloyX (Ni=47%-Cr=22%-Fe=18%-Mo=9%-Co=2%)
<b>Nichel/Molibdeno</b>	Hastelloy B(B2) (Ni=60%-Mo=28%-Fe=5%-Co=2.5%)
<b>Cromo</b>	Hastelloy C276 (Ni=54%-Cr=15%-Mo=16%+Fe+Co)
<b>Nichel/Ferro</b>	Invar (Ni=35-50%-Fe=45-65%-Co=4-5%)
<b>Cromo</b>	Incoloy 800(H) (Ni=35%-Fe=45%-Cr=21%-C<0.08%) Incoloy 825 (Ni=42%-Fe=30%-Cr=22%-Mo=3%+Cu)

# Il nickel commercialmente puro

## Nickel 200

- Presenta già **discrete caratteristiche meccaniche** in ambienti fortemente corrosivi.
- Dotato di proprietà ferromagnetiche
- Utilizzato in **apparecchiature di processo**, per preservare la purezza del prodotto, ad esempio nell'industria chimica ed alimentare

– Ni + Co	99.0 min
– Fe	0.40 max
– Mn	0.35 max
– Cu	0.25 max
– C	0.15 max
– S	0.01 max
– Si	0.35 max

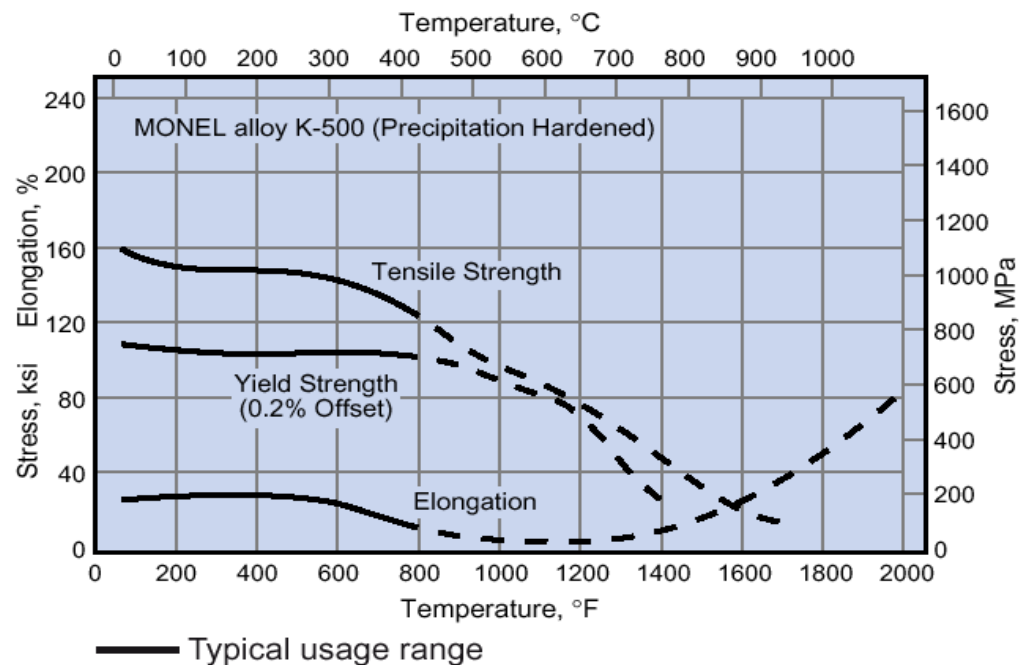
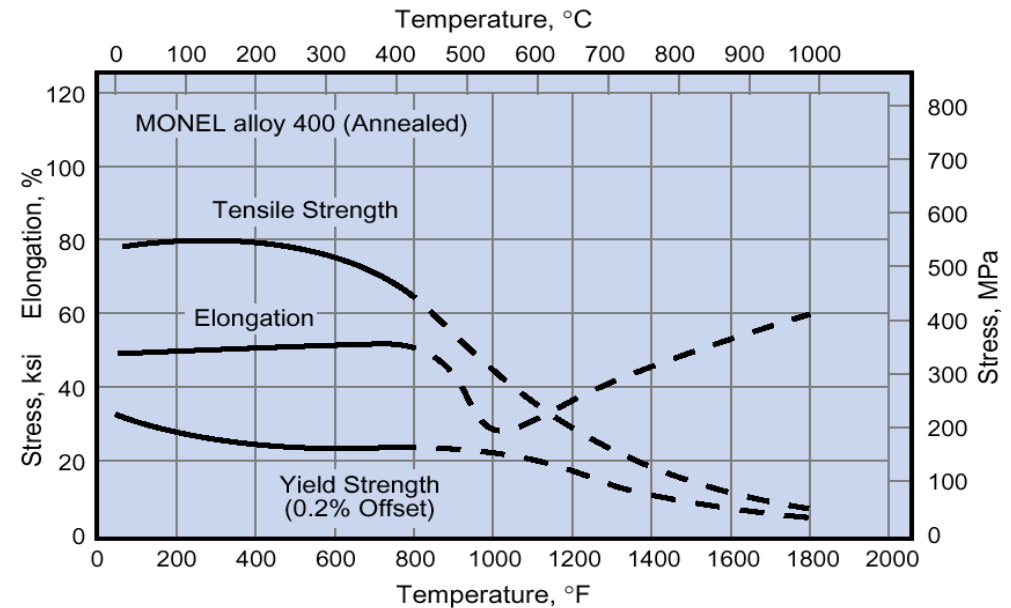


# Leghe nickel - rame

## Monel<sup>®</sup> Alloy 400

- Lega ad alta resistenza, con eccellente resistenza alla corrosione in vari ambienti (come acqua mare, acido idrofluoridrico, solforico)
- Usata nel settore navale, della dissalazione, per impianti chimici (valvole, corpi pompa, fittings, heat exchangers)

– Ni +Co	63.0 min
– Cu	28.0 – 34.0
– Fe	2.5 max
– Mn	2.0 max
– Si	0.5 max
– C	0.3 max
– S	0.024 max

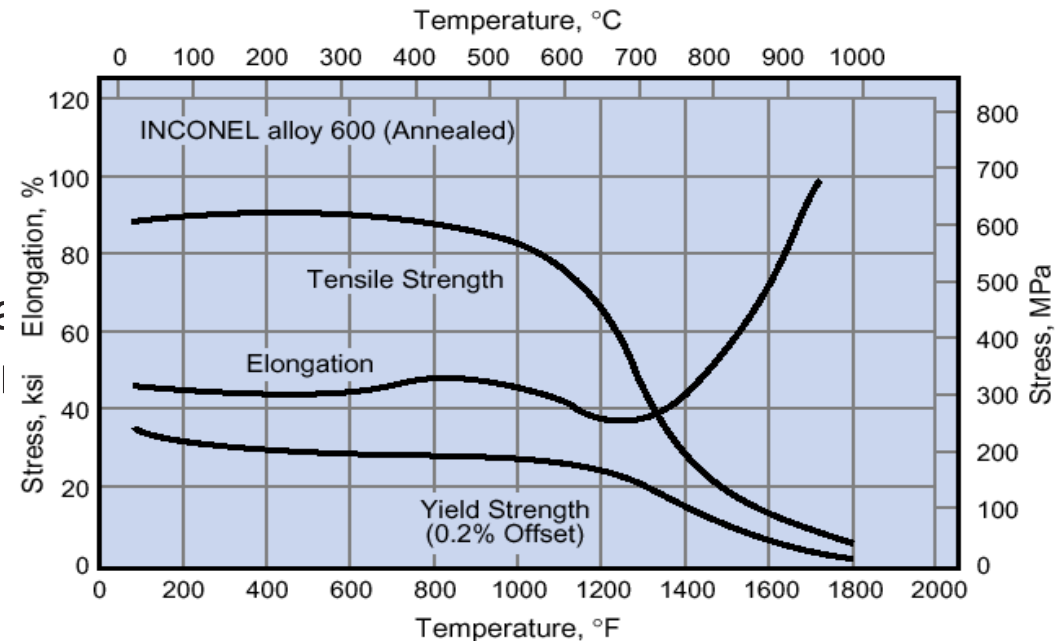


# Leghe nickel - cromo - ferro

## Inconel® Alloy 600

- Buona resistenza **all'ossidazione ad alta temperatura** ed alla tensocorrosione da cloruri
- Impiegata in forni, nell'industria chimica ed alimentare, nel settore nucleare, per elettrodi di raffinazione

– Ni+Co	72.0 min
– Cr	14.0 – 17.0
– Fe	6.0 – 10.0
– Mn	1.0 max
– Si	0.5 max
– Cu	0.5 max
– C	0.15 max
– S	0.015 max





# Leghe nickel - molibdeno - cromo

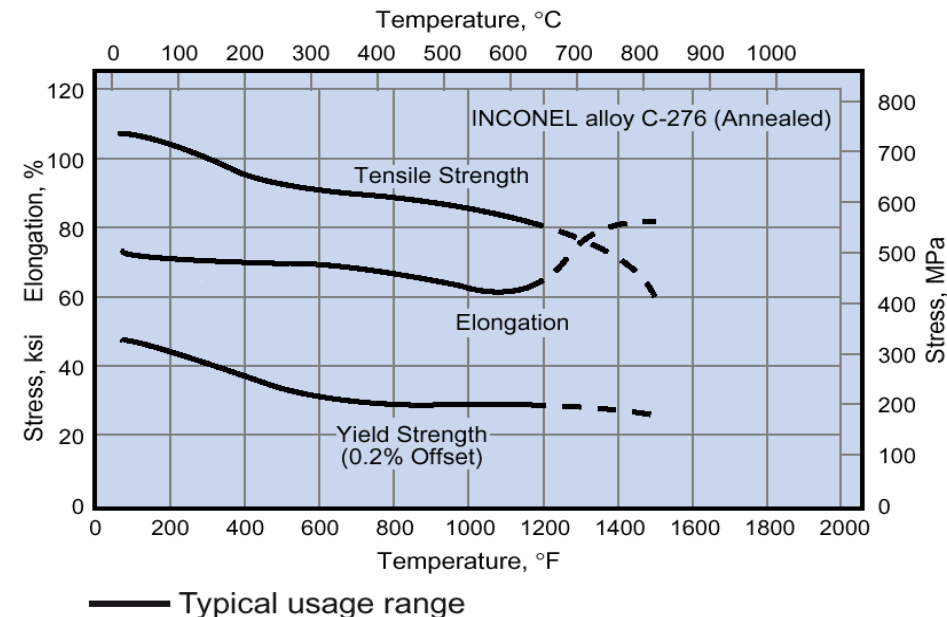
## Hastelloy C276<sup>®</sup> Alloy

- E' una lega con **eccellente resistenza alla corrosione** in ambiente riducenti o ossidanti ed alla corrosione localizzata
- Notevoli caratteristiche tensili (790 e 355 MPa di Rm ed Rs, a T ambiente)
- Eccezionale **duttilità** (61% a T ambiente)

– Cr	16
– Mo	16
– Fe	5
– W	4
– Co	2.5 max
– Mn	1 max
– V	0.35 max
– Si	0.08 max
– C	0.01 max
– Ni	balance



Impiego di leghe tipo C276 per componenti del veivolo F15

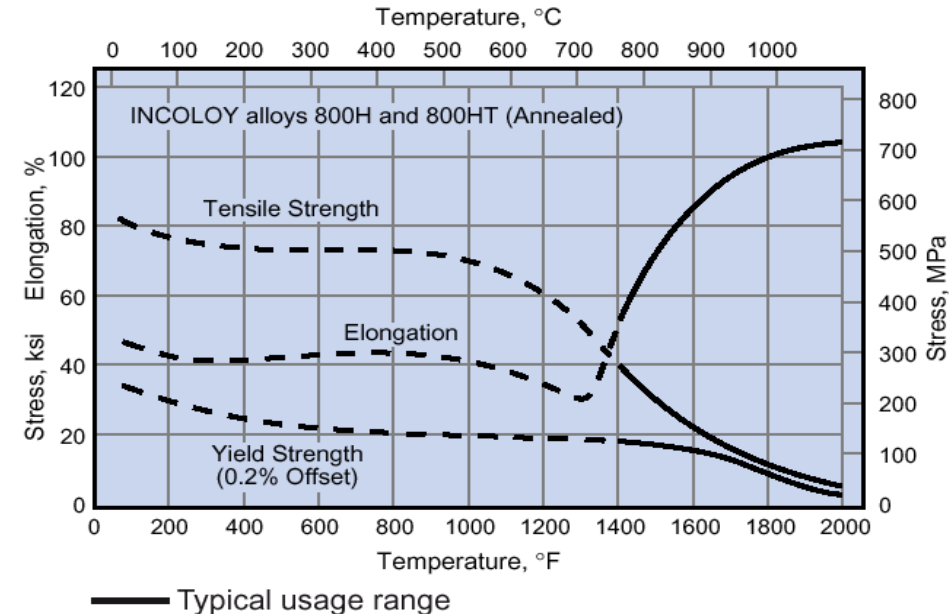


# Leghe nickel - ferro - cromo

## Incoloy 800H<sup>®</sup> Alloy

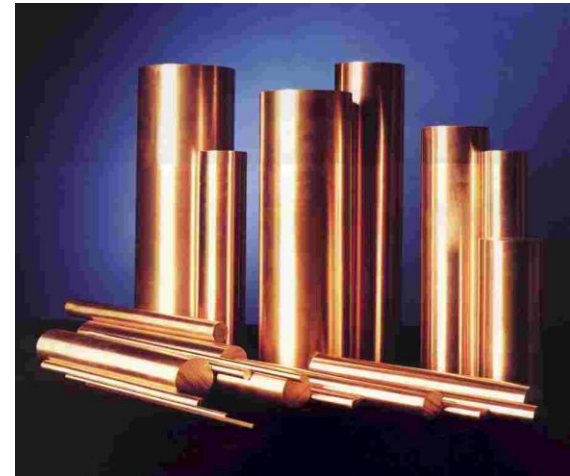
- E' una lega con **eccezionali caratteristiche** ad alta T e resistenza allo scorrimento viscoso
- Tenori controllati di C, Al e Ti
- Spesso utilizzata allo stato **ricotto ad alta T**
- Utilizzata in impianti chimici e petrolchimici di processo, per la produzione dell'energia, forni, impianti per trattamenti termici

– Fe	39.5 min
– Ni	30.0 – 35.0
– Cr	19.0 – 23.0
– C	0.05 – 0.10
– Al	0.15 – 0.60
– Ti	0.15 – 0.60
– Al+Ti	0.30 – 1.20



## Leghe di rame

	UNS Number	Composition
Coppers		
Coppers	C10100-C15760	> 99% Cu
High-copper alloys	C16200-C19600	> 96% Cu
Brasses		
Brasses	C20500-28580	Cu-Zn
Leaded brasses	C31200-C38590	Cu-Zn-Pb
Tin brasses	C40400-C49080	Cu-Zn-Sn-Pb
Bronzes		
Phosphor bronzes	C50100-C52400	Cu-Sn-P
Leaded phosphor bronzes	C53200-C54800	Cu-Sn-Pb-P
Copper-phosphorus and copper-silver-phosphorus alloys	C55180-CS5284	Cu-P-Ag
Aluminum bronzes	C60600-C64400	Cu-Al-Ni-Fe-Si-Sn
Silicon bronzes	C64700-C66100	Cu-Si-Sn
Others		
Other copper-zinc alloys	C66400-C69900	
Copper-nickels	C70000-C72950	Cu-Ni-Fe
Nickel silvers	C73200-C79900	Cu-Ni-Zn



## Leghe di rame

Trovano applicazione laddove si richiede buona resistenza a corrosione (soprattutto in **ambiente acquoso**) a temperature inferiori a 260° C per le limitazioni nella resistenza meccanica a caldo.

Soffrono la presenza di **idrogeno solforato** ( $T > 150^\circ \text{C}$ ) ed **ammoniaca** e, pertanto, la loro applicazione deve essere valutata attentamente.

I tipici meccanismi di danno sono il **pitting**, la **tenso-corrosione da ammoniaca** e la **dealligazione** (dezincificazione)

Sono molto sensibili alla velocità del fluido (fenomeni di **impigement corrosion**) in particolare in acqua mare ed in presenza di cloruri: ogni lega è caratterizzata da una massima velocità di flusso in acqua mare.



# Leghe di titanio

UNS	ASTM	Trade name
R50250	1	Unalloyed Ti
R50400	2	Unalloyed Ti
R50550	3	Unalloyed Ti
R60700	4	Unalloyed Ti
R56400	5	Ti-6Al-4V
	6	Ti-5Al-2.5Sn
R52400	7	Ti-0.15Pd
R56320	9	Ti-3Al-2.5V
	10	Ti-11.5Mo-6Zr-4.5Sn
R52250	11	Ti-0.15Pd
R53400	12	Ti-0.3-Mo-0.8Ni
	13	Ti-0.5Ni-0.05Ru
	14	Ti-0.5Ni-0.05Ru
	15	Ti-0.5Ni-0.05Ru
R52402	16	Ti-0.05Pd
R52252	17	Ti-0.05Pd
R56322	18	Ti-3Al-2.5V-0.05Pd
R58640	19	Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo
R58645	20	Ti-3Al-8V-6Cr-4Zr-4Mo-0.05Pd
R58210	21	Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.25Si
	23	Ti-6Al-4V ELI*
	24	Ti-6Al-4V-0.05Pd
	25	Ti-6Al-4V-0.5Ni-0.05Pd
	26	Ti-0.1Ru
	27	Ti-0.1Ru
	28	Ti-3Al-2.5V-0.1Ru
	29	Ti-6Al-4V-0.1Ru



## Leghe di titanio

Trovano maggiore applicazione nel petrolchimico, meno in raffineria (circuiti H<sub>2</sub>O mare e condensatori di testa servizi corrosivi).

In generale il titanio viene utilizzato in applicazioni a **temperature inferiori a 260°** (se è presente idrogeno la T non deve essere superiore a 170° C per evitare fenomeni di infragilimento).

Sono materiali assai resistenti a corrosione da cloruri in fase acquosa (acqua mare e salmastra), solfuri e anidride solforosa.

Problemi corrosivi possono presentarsi in ambienti acidi (basso pH), soprattutto in presenza di depositi (“crevice corrosion”).

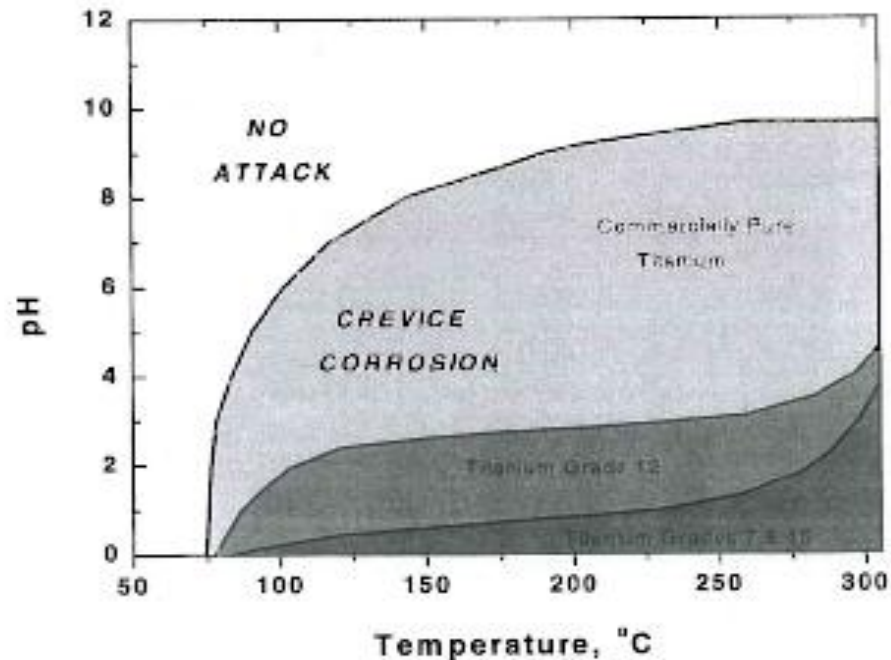
Utilizzate in raffineria prevalentemente le leghe di titanio del tipo **grado 2** (non legato) e, raramente, **grado 12** (legato con Ni e Mo).

!!! Attenzione alla possibilità di infragilimento per **T > 75°C** in ambienti corrosivi (sour water stripper e impianti rig ammine) !!!



## Leghe di titanio

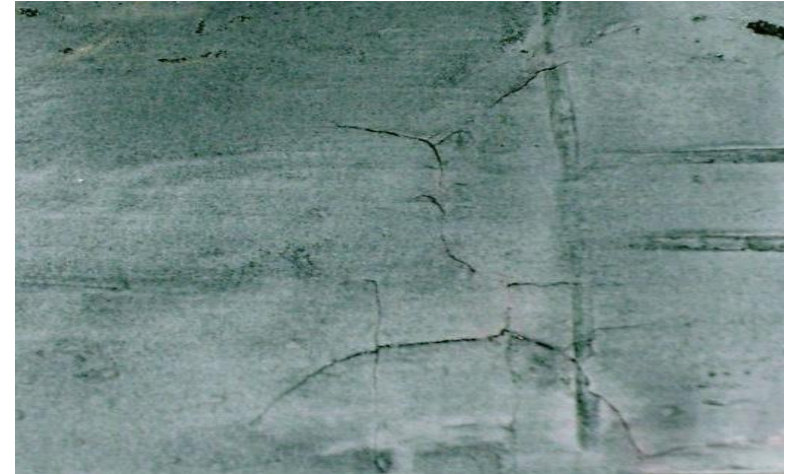
Limite di **temperatura e pH** per l'innesco di corrosione interstiziale su diverse leghe di Titanio in una soluzione tipo "brine" areata.



# **La riparazione mediante saldatura**

# Introduzione

- Le operazioni di riparazione si possono svolgere:
  - Per risolvere difetti di saldatura realizzati **durante la fabbricazione**
  - Per risolvere difetti conseguenti **all'esercizio** di un componente



Componente saldato in acciaio bassoalegato, controllo MT in fase di collaudo



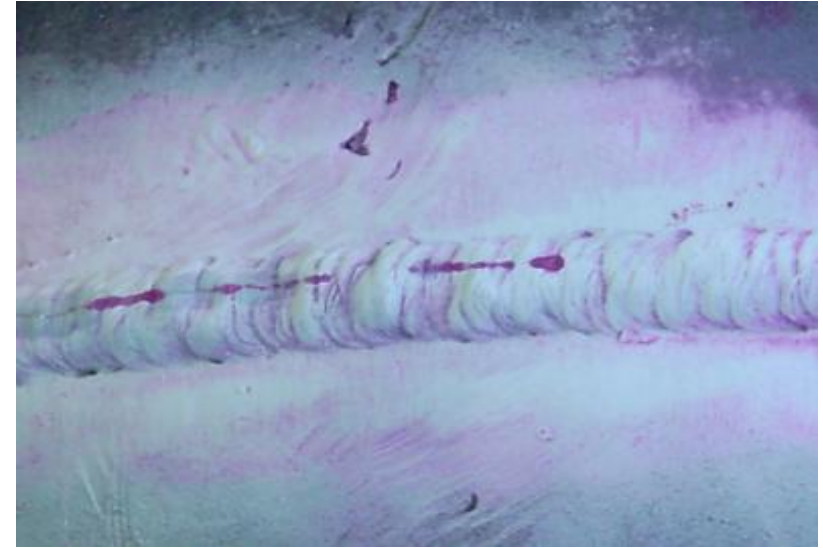
Cricca di fatica in struttura di carpenteria (ponte)



Cricca a freddo, acciaio Cr-Mo, controllo PT

# Difetti di fabbricazione

- I difetti di saldatura vengono generalmente riparati applicando le **stesse tecniche (processo, materiali, parametri) utilizzate durante la fabbricazione**.
- Nel caso di **piccoli difetti** rilevati direttamente dal saldatore/operatore la riparazione viene eseguita direttamente tramite molatura ed eventuale ripristino.
- Nel caso di **difettosità più complesse**, è necessario l'intervento del “welding coordinator”, che coordina le seguenti fasi:
  - Caratterizzazione del difetto
  - Scelta della tipologia di intervento
  - Riparazione
  - Verifica dell'efficacia dell'intervento.



Porosità allineate – acciaio basselgato - controllo PT

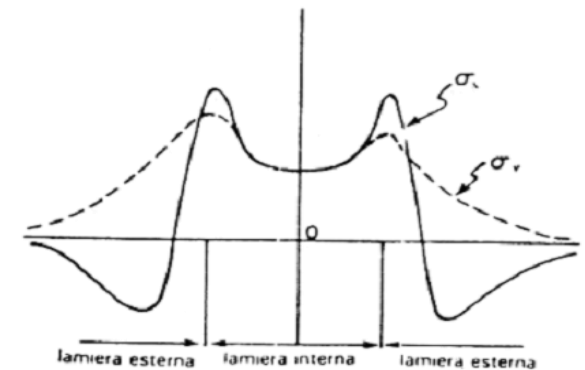
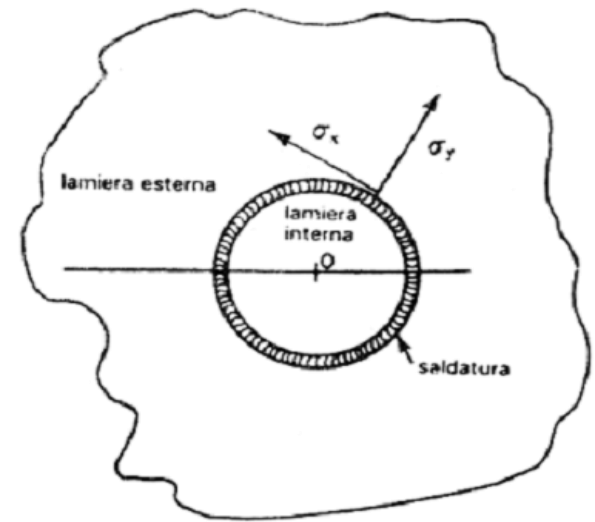


Porosità allineate – inclusioni di tungsteno - controllo RT



# Difetti di esercizio

- In occasione di attività di ispezione eseguite su componenti saldati o metallici in genere, si può verificare il caso in cui siano individuate difettosità di vario genere, a cui può seguire la necessità di eseguire **riparazioni mediante saldatura**.
- Tali operazioni presentano molto spesso notevole criticità:
  - **posizioni** di saldatura e disponibilità limitata di apparecchiature
  - severe condizioni di **vincolo**
  - non è sempre possibile realizzare sui componenti riparati **trattamenti termici** di distensione (PWHT) e/o rinvenimento
- Conseguentemente, è richiesta la stesura di **specifiche di saldatura**, con indicazioni precise sulle modalità operative (rimozione, saldatura e controllo finale)



Tipica distribuzione delle tensioni di ritiro nella saldatura di un inserto

# Principi generali – Fasi operative

- **Caratterizzazione del difetto**
  - Dimensioni (estensioni e profondità)
  - Metallurgia (tipo di materiale e suo stato)
  - Analisi delle cause di rottura (failure analysis)
  - Analisi documentale della storia del componente (solo per componenti già eserciti)
- Scelta della **tipologia di intervento**, e redazione della relativa documentazione
  - Riparazione per **asportazione del difetto e ripristino con saldatura**
  - Riparazione per **asportazione di una parte e saldatura di un inserto**
- **Preparazione** del componente all'esercizio
  - Verifica dell'efficacia dell'intervento
  - Ripristino, per quanto possibile, delle proprietà iniziali del componente

# Trattamenti post saldatura

- Le riparazioni sono interventi che spesso si effettuano su **componenti già in opera o montati e talvolta già eserciti**.
  - Ciò esclude quasi sempre la possibilità di effettuare un trattamento termico di distensione-rinvenimento sull'intero componente: ciò esclude la possibilità di distendere le saldature
  - Il trattamento termico localizzato ha efficacia come solo rinvenimento metallurgico
- Trattamenti alternativi: **pallinatura** - soprattutto nel caso di riparazioni esposte al rischio di tenso-corrosione ("stress corrosion"),
  - operazione simile alla sabbiatura, ma eseguita con sfere di acciaio al Carbonio Mn aventi diametro opportuno.
  - rilassamento delle tensioni di ritiro a causa della deformazione plastica provocata dall'urto delle sfere di acciaio
  - E' consigliabile eseguire una "qualifica" del processo di pallinatura con esame visivo e macrografico dei campioni per individuare i parametri (distanza ugello-piastra, diametro dell'ugello, velocità di pallinatura e pressione dell'aria nel polmone della sabbiatrice) che garantiscano una profondità di penetrazione non eccessiva.

# Preparazione del giunto all'esercizio

- Su tutte le **saldature di riparazione** dovranno essere eseguiti l'esame Visivo, Magnetoscopico e con Liquidi Penetranti e, se richiesto dalla complessità della struttura, l'esame radiografico (potrebbe essere necessario eseguire tali controlli 48 ore dall'esecuzione del giunto).
- I **criteri di accettabilità** da considerarsi per la saldatura sono generalmente gli stessi considerati per la costruzione del componente.
- Durante le successive **ispezioni** successive dovrà essere considerato che, qualora non sia stato effettuato trattamento termico, l'inserto può risultare sollecitato da stati tensionali di entità anche notevoli: controlli più approfonditi.