



Metodologie metallurgiche e metallografiche

ing. Vittorio Di Cocco

Email: v.dicocco@unicas.it

Sito internet: <http://www.metallurgia.unicas.it>

Tel: 07762994334

Fax: 07762993733

Studio: piano terra, Facoltà di Ingegneria

Orari lezioni:

Martedì 17.00-19.00 Aula 1S.5

Mercoledì 14.00-16.00 Aula 2.2

Giovedì 9.00-11.00 Aula 1S.5

Programma

- Introduzione al corso
- Resistenza alla corrosione
- Leghe non ferrose
- Controlli non distruttivi
- Analisi metallografica
- Identificazione qualitativa di particelle non metalliche secondo normativa UNI.
- Analisi di immagine quantitativa
- Analisi frattografica mediante microscopio elettronico a scansione
- Prove meccaniche
- Richiami di metallurgia. Diagrammi di fase Fe-X, diagrammi CCT, fasi e costituenti strutturali di acciai e ghise.
- Aspetti termodinamici e cinetici della corrosione di leghe ferrose e non ferrose
- Leghe di Al, Cu, Pb, Mg, Sn, Ni, Ti, Mo
- CND: metodologie
- Principi di microscopia ottica ed elettronica
- Preparazione di provini metallografici
- Identificazione di ossidi, nitruri, carburi, solfuri
- Analisi grana cristallina
- Principi di analisi di immagine quantitativa
- Applicazioni al pc
- Principi
- Applicazioni a superfici di frattura a trazione ed a fatica
- Prove di durezza
- Prove di trazione
- Prove di fatica

Leghe ferrose: il sistema Fe-C

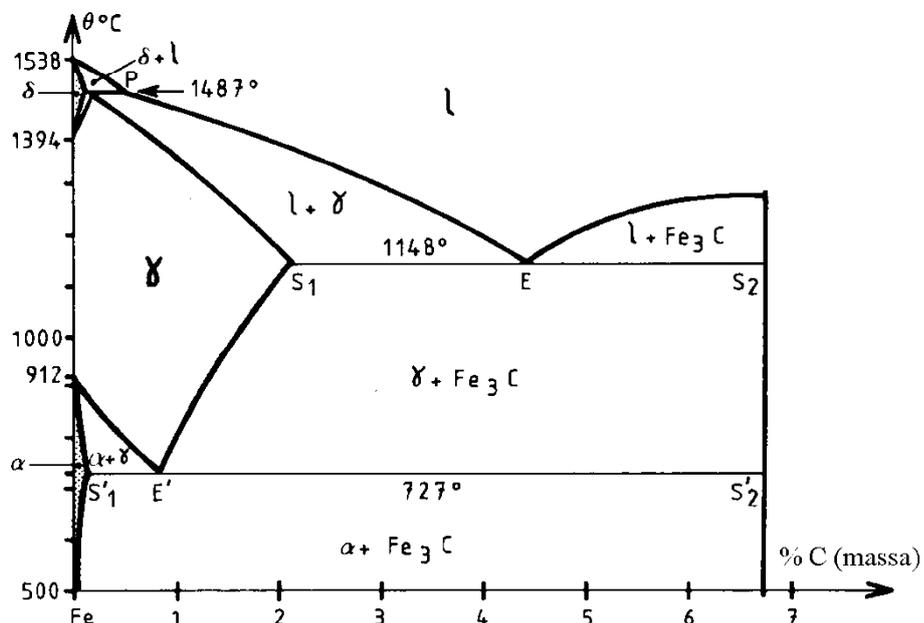


Diagramma di equilibrio metastabile Fe-Fe₃C

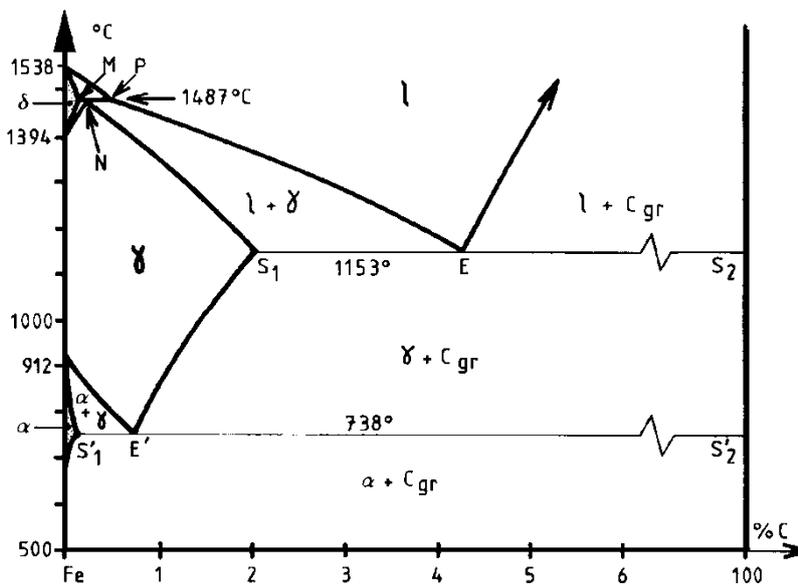
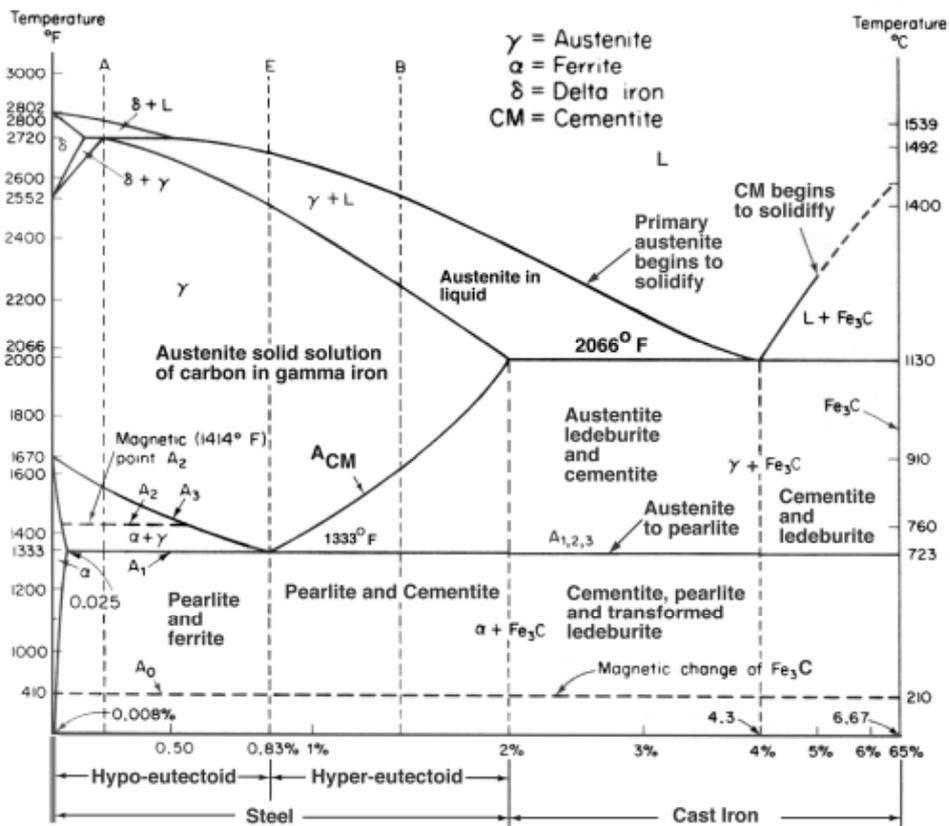
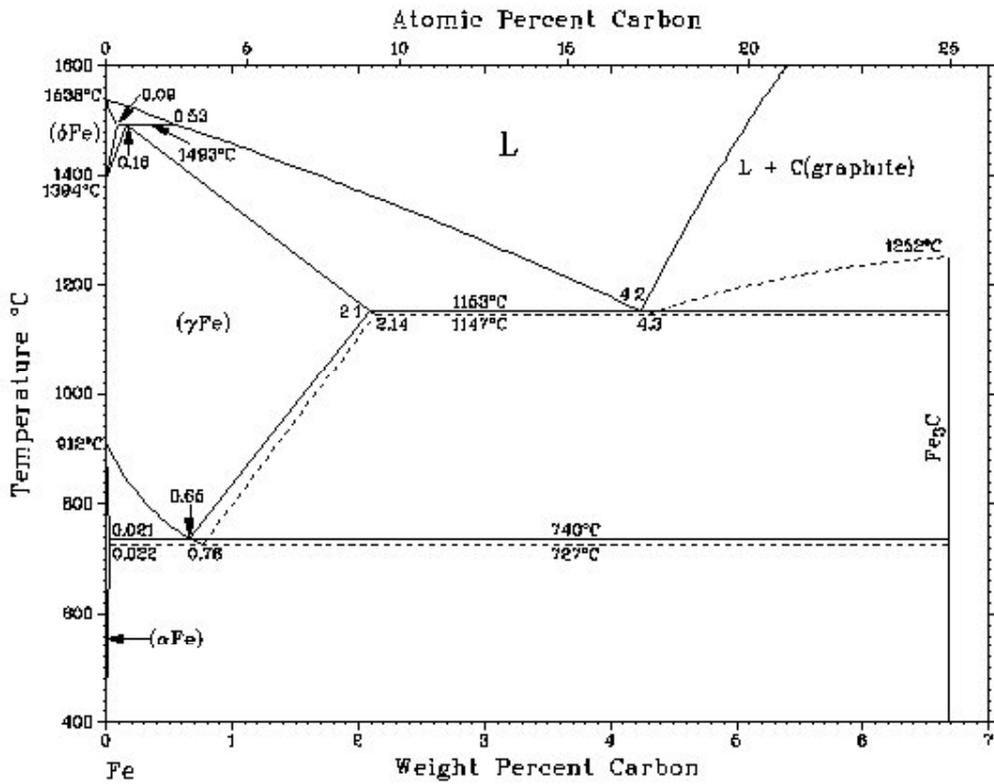


Diagramma di equilibrio stabile Fe-C



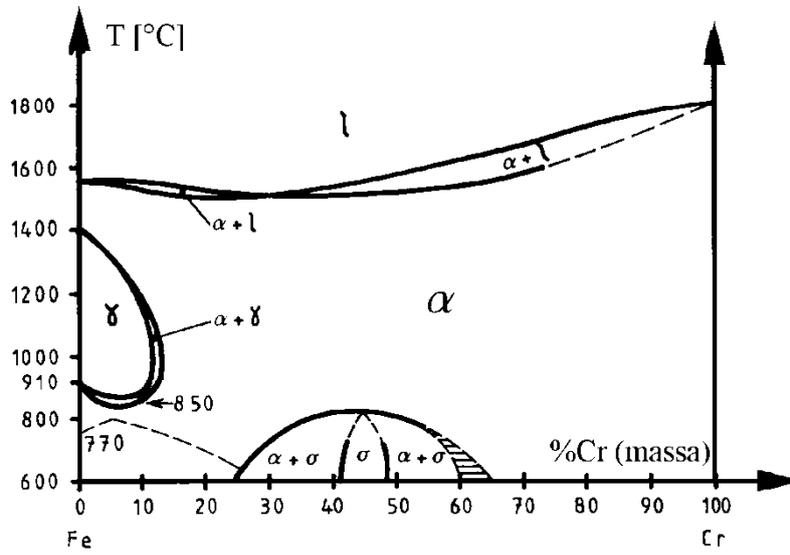


Diagramma di equilibrio Fe-Cr

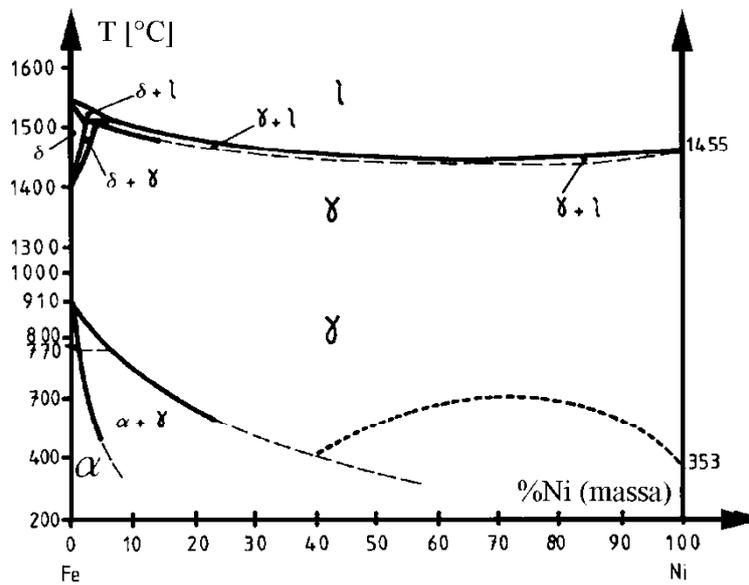
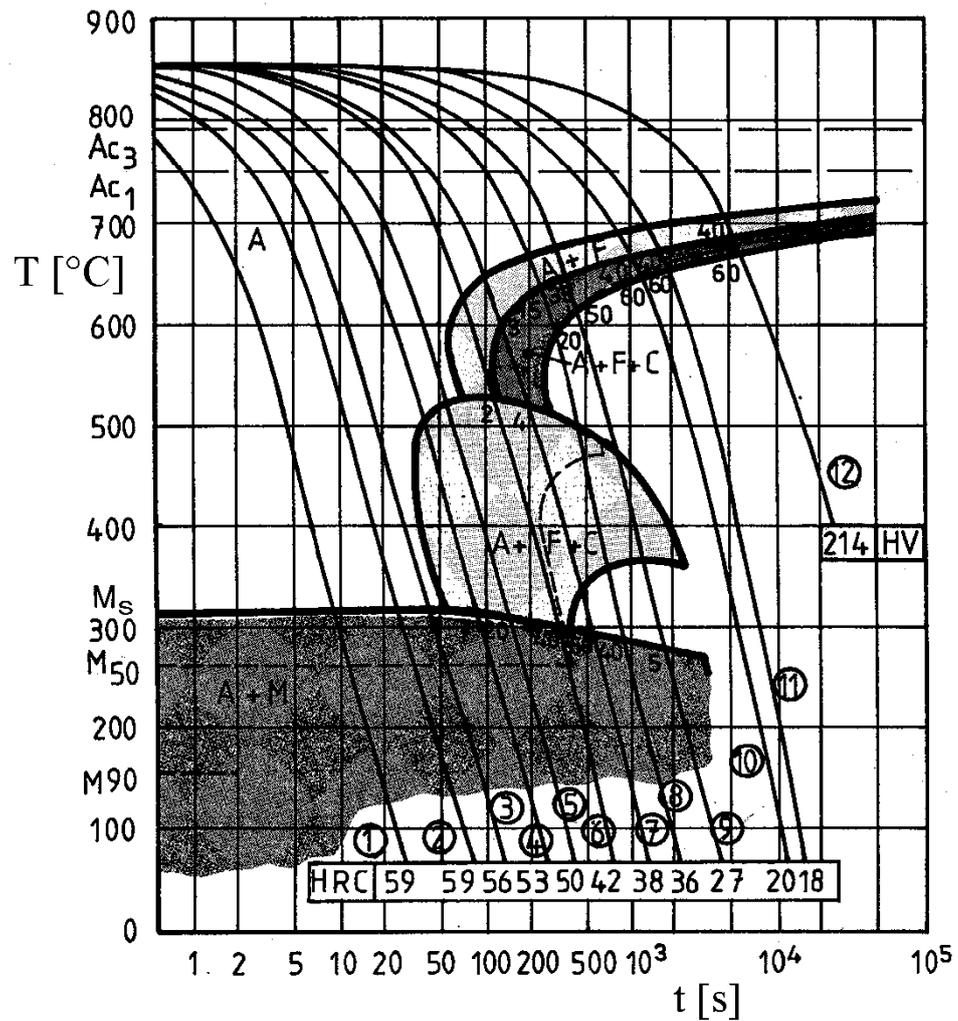


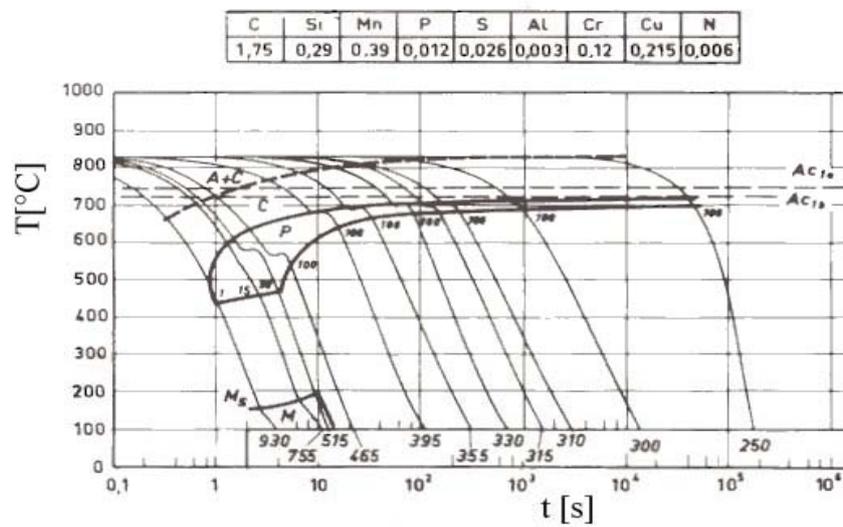
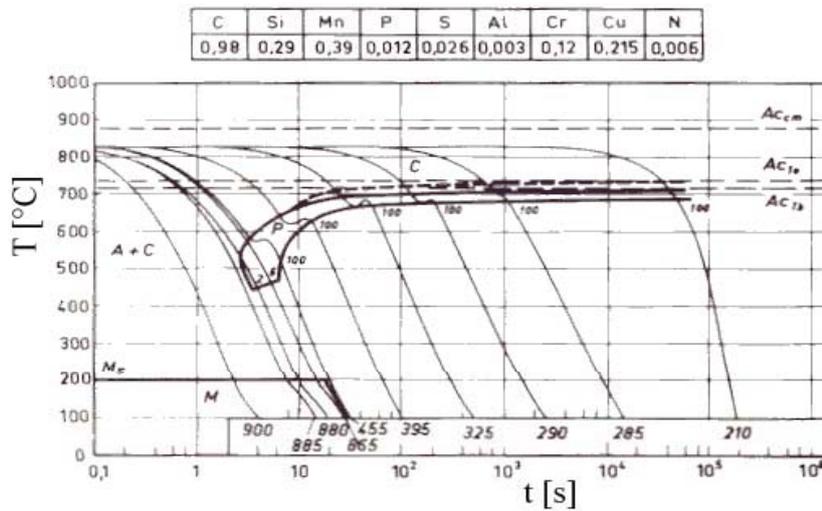
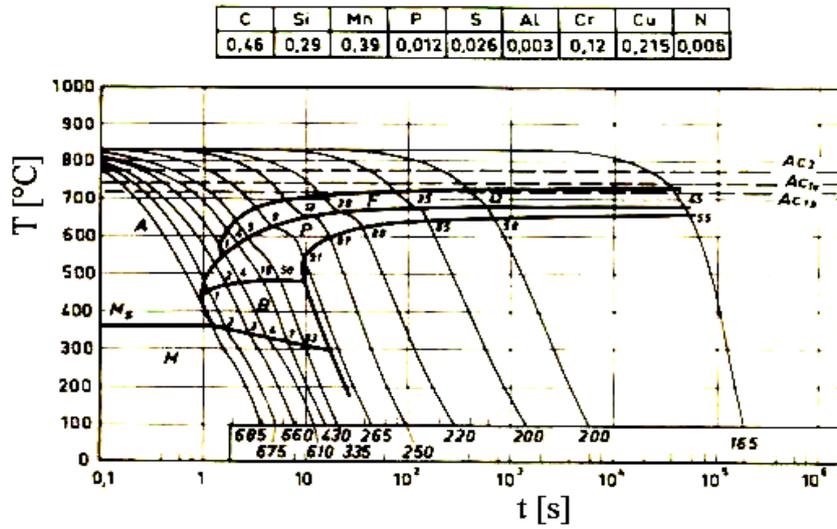
Diagramma di equilibrio Fe-Ni

Diagrammi CCT



%C	%Mn	%Si	%S	%P	%Ni	%Cr	%Mo	%Cu
0.44	0.80	0.31	0.013	0.030	0.46	0.96	0.05	0.18

Influenza del C sul diagramma CCT



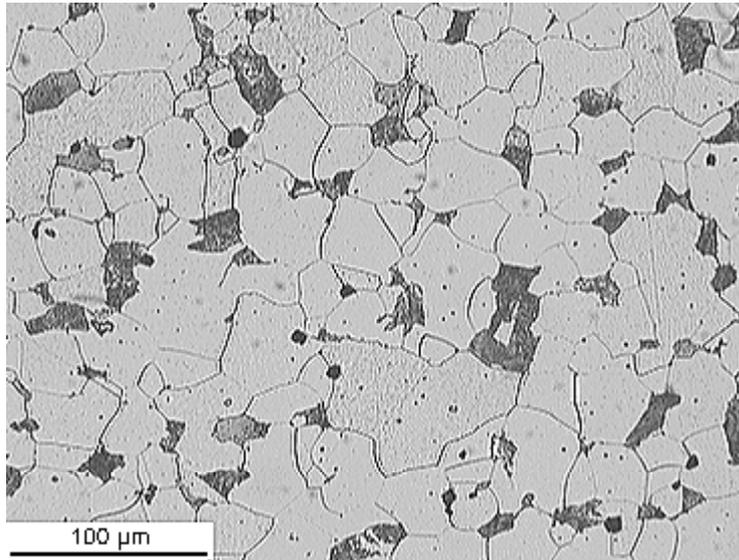
Fasi presenti nelle leghe Fe-C

- **Ferrite α** : soluzione solida interstiziale di C nel ferro α (solubilità max pari a 0.02% a 727°C); il reticolo è CCC;
- **Ferrite δ** : soluzione solida interstiziale di C nel ferro δ (solubilità max pari a 0.1% a 1487°C); il reticolo è CCC;
- **Austenite γ** : soluzione solida interstiziale di C nel ferro γ ; il reticolo è CFC;
- **Martensite**: soluzione solida sovrasatura di C nel ferro a reticolo tetragonale corpo centrato;
- **Cementite (Fe_3C)**: la sua composizione corrisponde ad un tenore del 6.67% in C. Si tratta di un composto interstiziale a maglia ortorombica; è metastabile e tende a decomporsi in ferrite (oppure austenite) e grafite secondo la reazione

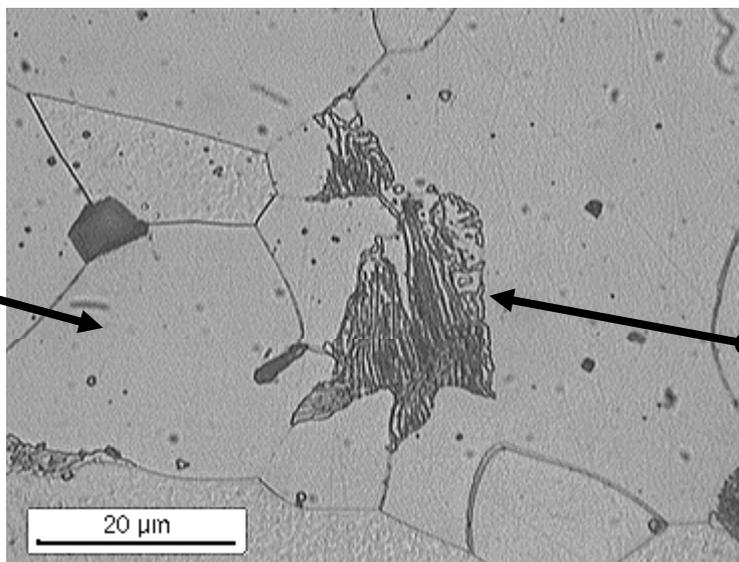


- **Carbonio puro (grafite) C_{gr}** : la solubilità del Fe nel C_{gr} è nulla

Acciaio al C (C= 0.18%)

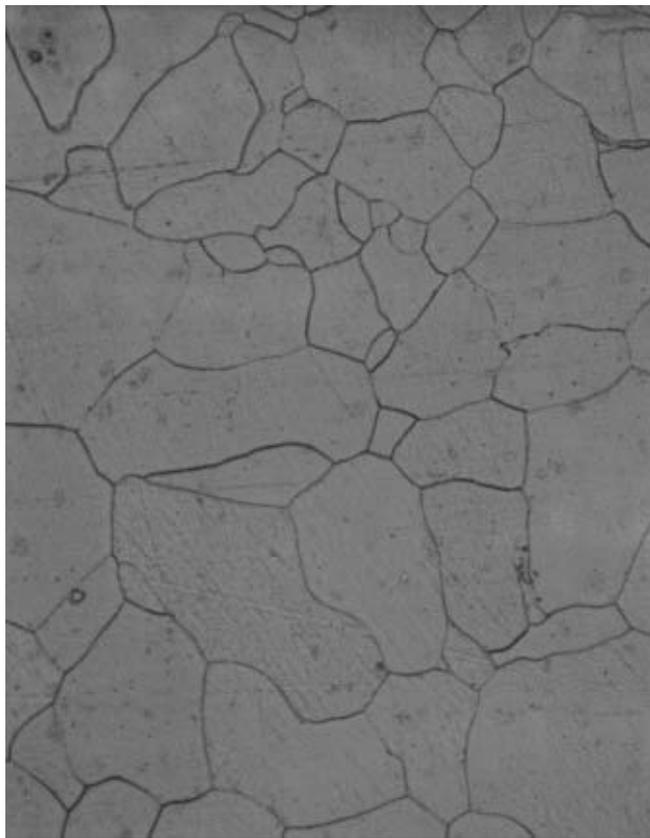


Ferrite

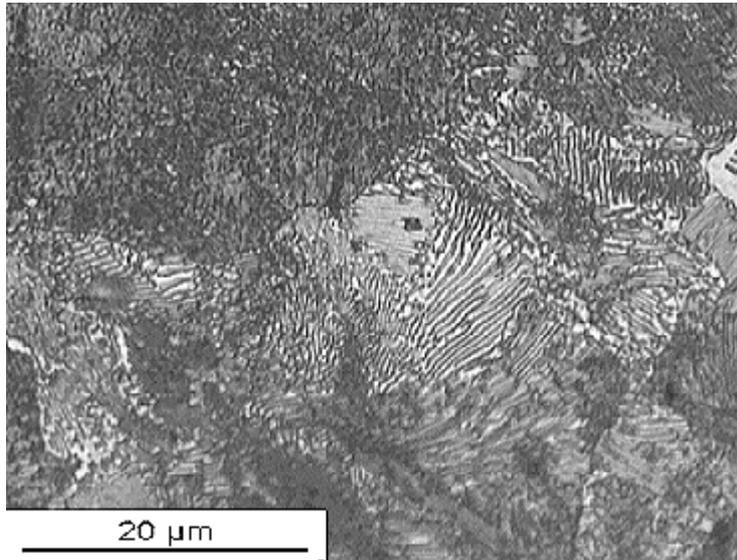


Pearlite

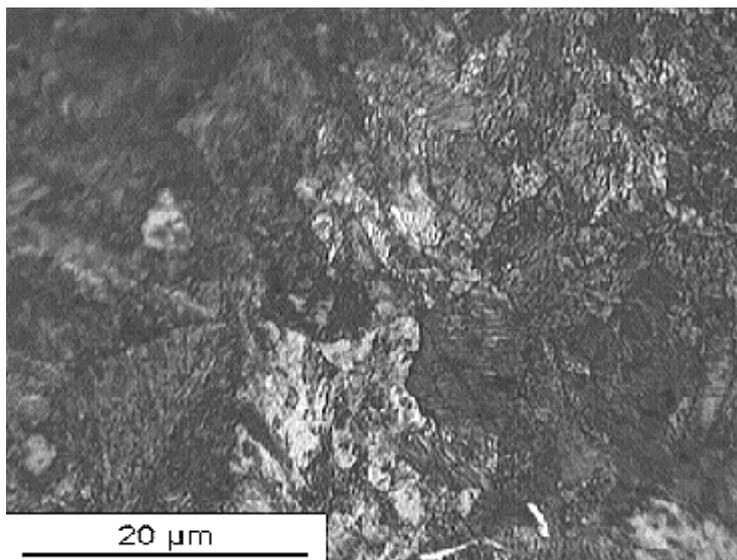
Austenite



Acciaio al C (C= 0.8%)



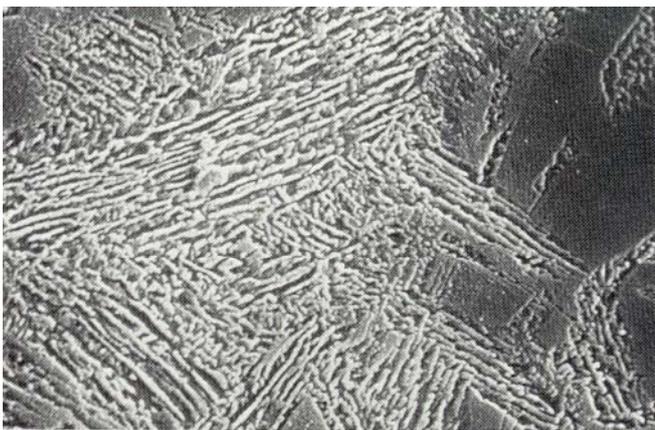
Perlite
grossolana



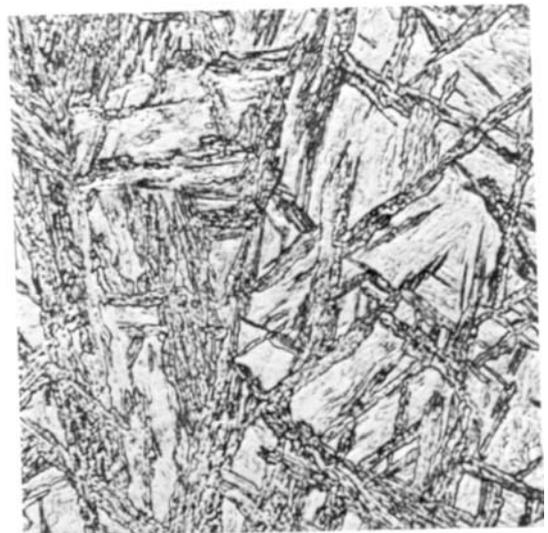
Perlite
fine



Struttura martensitica
(Microscopio ottico x600)

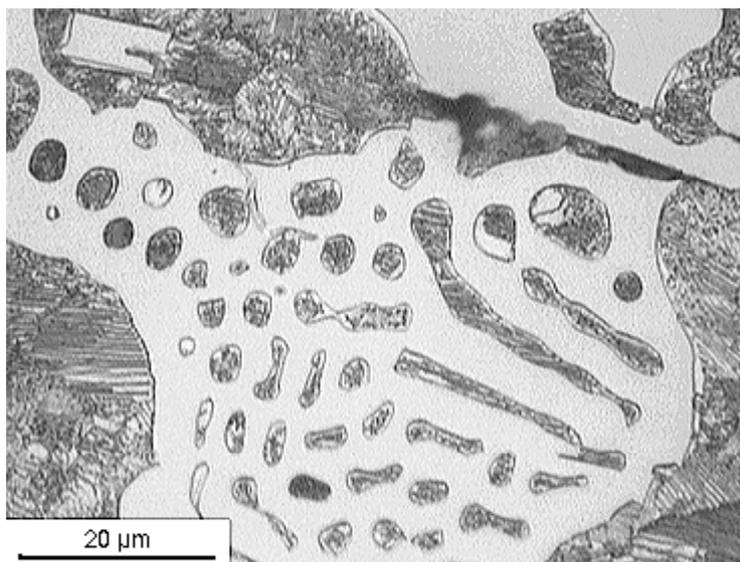
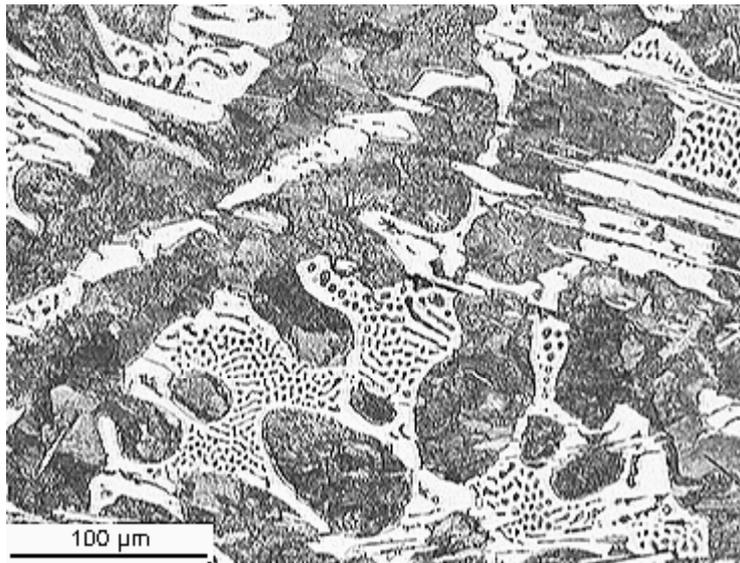


Bainite superiore
e martensite

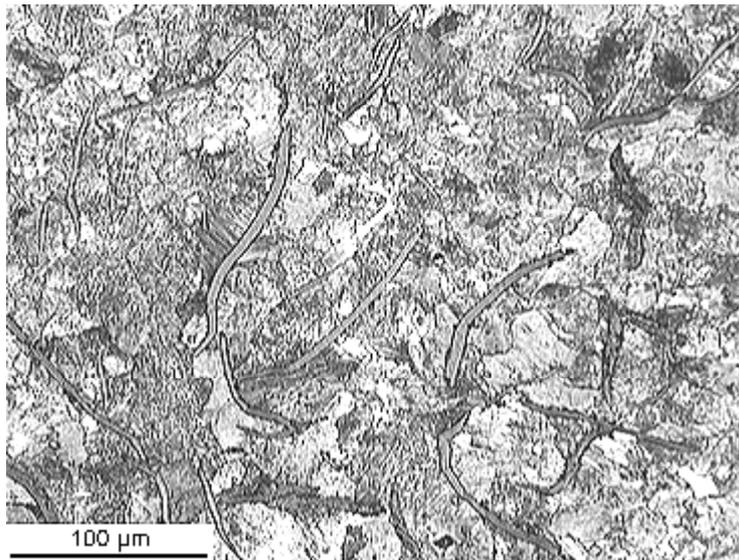


Bainite con
martensite (sfondo)

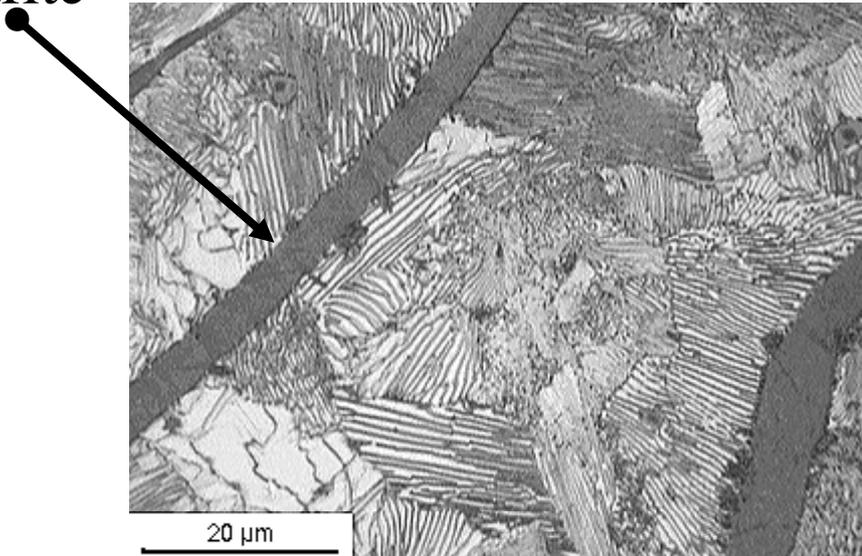
Ghisa bianca
($C=2.8\%$, $Si=1.8\%$)



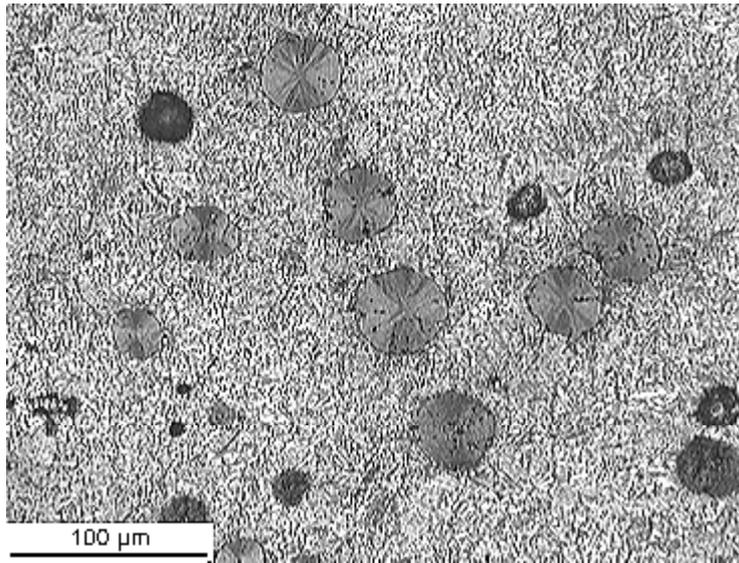
Ghisa grigia lamellare
($C=3.4\%$, $Si=2.5\%$, $P=0.01\%$)



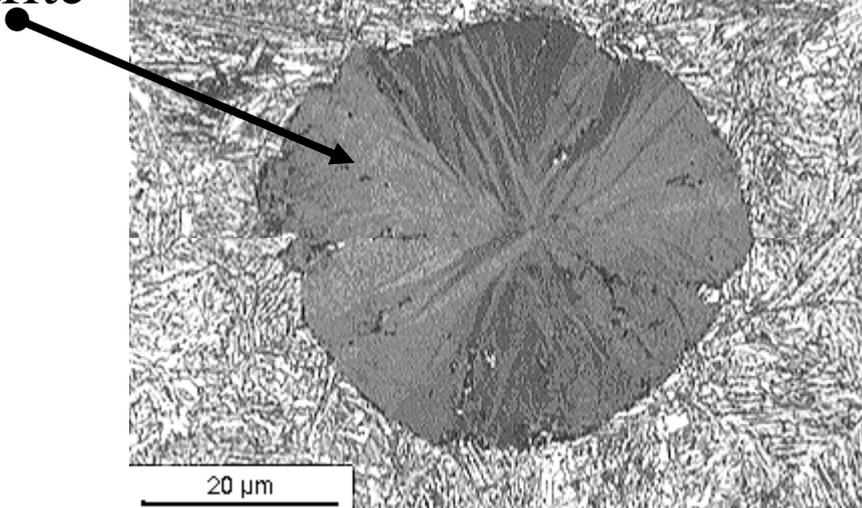
Grafite



Ghisa grigia sferoidale
($C=3.4\%$, $Si=2.5\%$, $P=0.01\%$, $Mg=0.03\%$)



Grafite



Corrosione

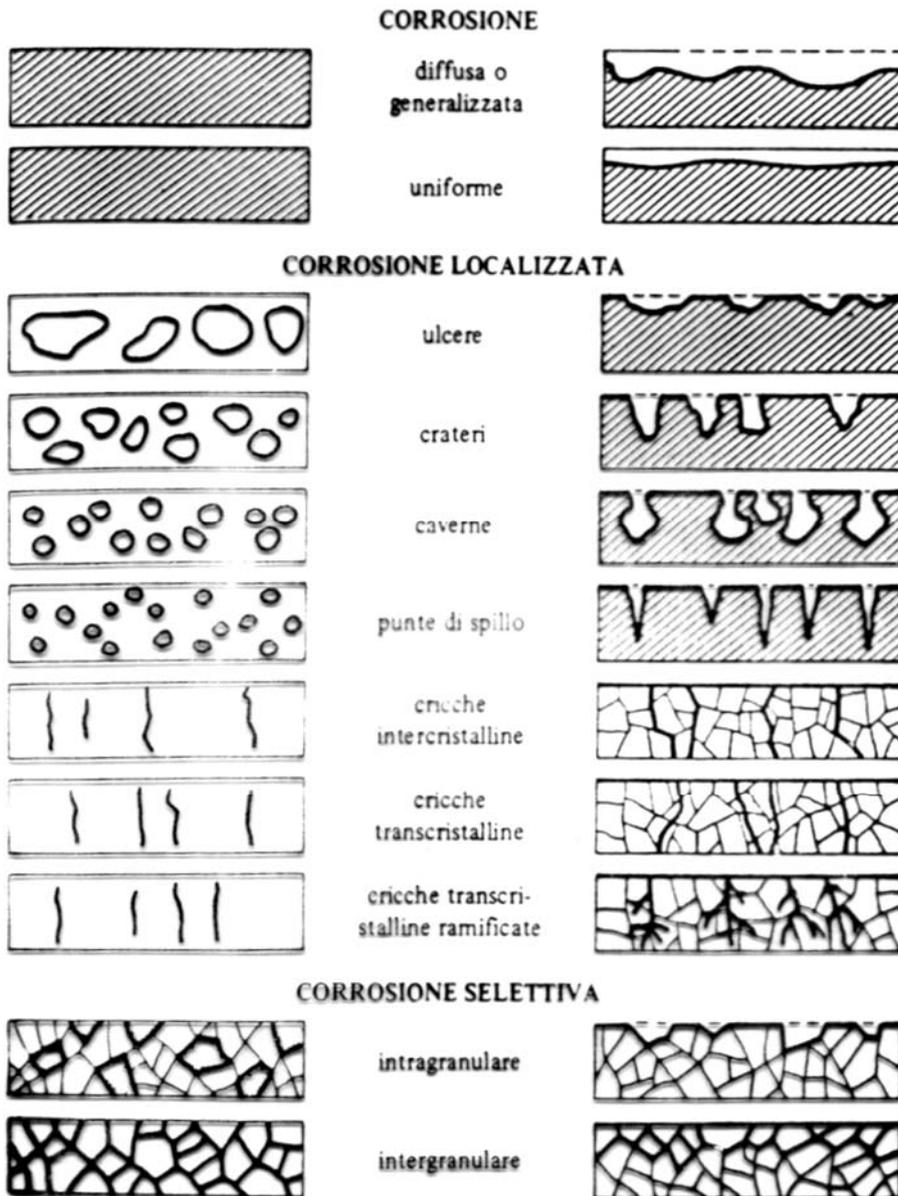
I materiali metallici, a contatto con ambienti aggressivi liquidi o gassosi, tendono a raggiungere uno stato termodinamicamente più stabile. Le reazioni che ne conseguono si manifestano con il fenomeno di corrosione.

Si possono distinguere:

- corrosione chimica (o a secco, oppure ossidazione): si ha in ambienti privi di acqua allo stato di liquido o di vapore, ad alta temperatura
- corrosione elettrochimica (o ad umido): si ha in ambienti che presentano acqua allo stato liquido o di vapore

Nel seguito ci occuperemo prevalentemente della corrosione ad umido, distinguendo la corrosione generalizzata dai vari casi di corrosione localizzata

Morfologie di corrosione



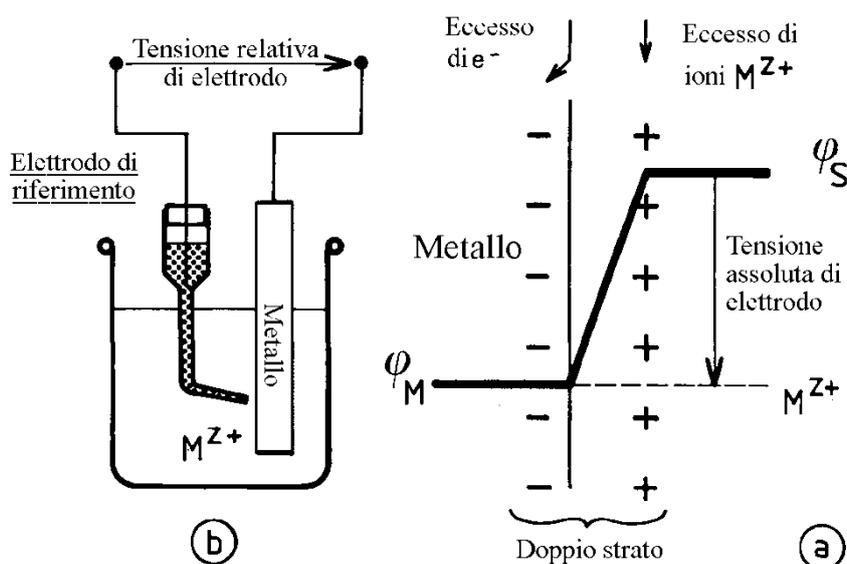
Termodinamica elettrochimica

Un elettrodo è una fase, il più delle volte metallica, in contatto con un elettrolita. L'insieme metallo-soluzione è spesso chiamato elettrodo per estensione.

Esempi:

- 1) Una lamina di rame in contatto con una soluzione di sale rameico costituisce un elettrodo;
- 2) Dell'idrogeno adsorbito su una lamina di platino in contatto con una soluzione acida costituisce un elettrodo;
- 3) Una struttura in acciaio immersa in acqua di mare costituisce un elettrodo.

Nei casi 1) e 2), che fanno intervenire un solo sistema elettrochimico (Cu/Cu^{2+} oppure H_2/H^+), si stabilisce spontaneamente una differenza di potenziale (d.d.p.) fra il metallo e la soluzione denominata **tensione d'elettrodo all'equilibrio**, che è caratteristica del sistema studiato.



Lo **stato di equilibrio** si descrive mediante l'equilibrio elettrochimico:



L'elettrodo primario di riferimento è l'elettrodo ad idrogeno (Standard Hydrogen Electrode):



La tensione d'elettrodo dipende dalla natura del sistema $M|M^{z+}$, dall'attività degli ioni M^{z+} in soluzione e dalla temperatura.

La tensione d'elettrodo è data dalla **equazione di Nerst**. Denominando con ε la tensione relativa di elettrodo, si ha:

$$\varepsilon = \varepsilon_{M/M^{z+}}^0 + \frac{RT}{zF} \ln a_{M^{z+}}$$

Sistema	ε^0 V/SHE	Sistema	ε^0 V/SHE
Au/Au ³⁺	+ 1.5	Pb/Pb ²⁺	- 0.13
Hg/Hg ²⁺	+ 0.8	Sn/Sn ²⁺	- 0.14
Ag/Ag ⁺	+ 0.79	Fe/Fe ²⁺	- 0.44
Cu/Cu ²⁺	+0.34	Zn/Zn ²⁺	- 0.76
H ₂ /H ⁺	0.00	Al/Al ³⁺	- 1.33

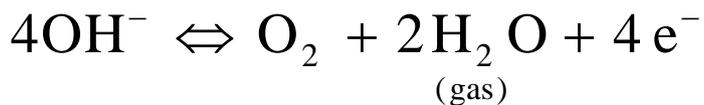
Generalizzazione: per un elettrodo per il quale si ha l'equilibrio



l'equazione di Nerst si scrive

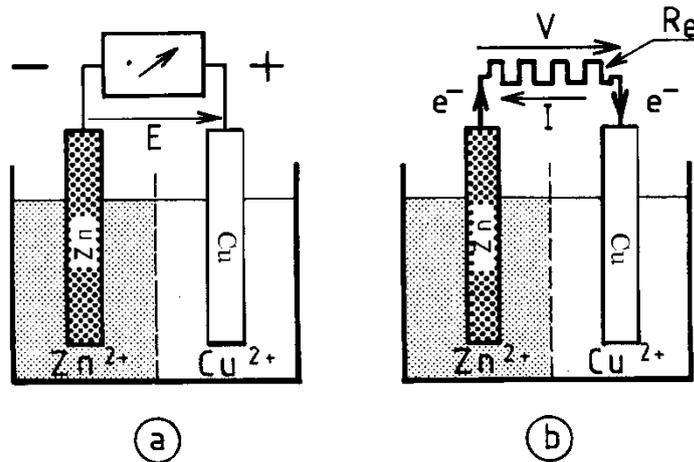
$$\varepsilon = \varepsilon^0 + \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{a_C^c a_D^d \dots}{a_A^a a_B^b \dots} \right)$$

Esempio: per il sistema O_2/OH^- (elettrodo ad ossigeno):



$$\varepsilon = \varepsilon_{OH^-/O_2}^0 + \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{p_{O_2} \text{ (atm)}}{(a_{OH^-})^4} \right)$$

$$\varepsilon = 1.23 + 0.015 \log p_{O_2} - 0.06 \text{ pH} \quad (\text{a } 25^\circ\text{C})$$



$$E = \left(\varepsilon_{\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}} - \varepsilon_{\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}} \right) > 0$$

$$E = \varepsilon_{\text{Cu}/\text{Cu}^{2+}}^0 - \varepsilon_{\text{Zn}/\text{Zn}^{2+}}^0 + 0.03 \log \frac{a_{\text{Cu}^{2+}}}{a_{\text{Zn}^{2+}}}$$

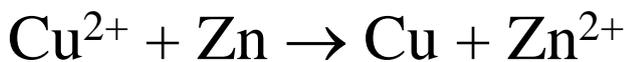
All'elettrodo di Zn ha luogo la reazione



All'elettrodo di Cu ha luogo la reazione



Globalmente si ottiene

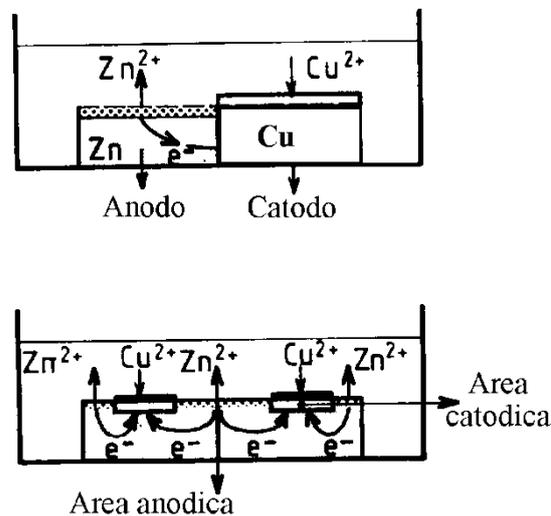


con il rame che si riduce e lo zinco che si ossida.

- L'elettrodo di zinco, ove ha luogo una **ossidazione**, è un **anodo**.
- L'elettrodo di rame, ove ha luogo una **riduzione**, è un **catodo**.

Se si suppone che la resistenza R_e tende ad annullarsi, la cella galvanica è in corto circuito, e V tende anch'esso ad annullarsi.

Questa condizione è, ad esempio, ottenuta considerando un sistema metallico costituito da un pezzo di zinco in contatto con un pezzo di rame, immersi in una soluzione contenente Cu^{2+} e Zn^{2+}



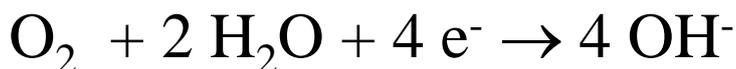
Un sistema metallo-elettrolita in cui si sta sviluppando un fenomeno corrosivo appare quindi come una cella galvanica in corto circuito: le zone anodiche si corrodono ed il metallo subisce una ossidazione. La massa metallica è equipotenziale e, se si può trascurare la caduta ohmica nell'elettrolita, le zone anodiche e catodiche sono caratterizzate da una tensione d'elettrodo comune denominata **tensione di corrosione**

Generalizzando la teoria delle pile localizzate, si può dire che la condizione necessaria perché un metallo si corroda (sistema fornitore di elettroni), è che esista un sistema accettore di elettroni in grado di scambiare elettroni con tale metallo. Tali sistemi accettori esistono in generale negli elettroliti. Nel caso delle soluzioni acquose i più importanti sono:

- La riduzione dei protoni:



- La riduzione dell'ossigeno disciolto



Ad esempio, per una lamina in ferro in contatto con una soluzione acida (a $\text{pH} = 1$), di attività 10^{-6} mol/l in Fe^{2+} , il sistema donatore che può essere preso in considerazione è:

$$\varepsilon_{\text{M}} = -0.44 + 0.03 \log 10^{-6} = -0.62 \text{ V/SHE}$$

Il sistema accettore che può essere preso in considerazione è:

$$\varepsilon_{\text{R}} = 0.00 - 0.06 \text{ pH} - 0.03 \log p_{\text{H}_2} (\text{atm})$$

$$\varepsilon_{\text{R}} = 0.00 - 0.06 \times 1 = -0.06 \text{ V/SHE}$$

(considerando $p_{\text{H}_2} = 1$ atm, pressione di formazione delle bolle di gas).

Quindi in tale caso $\varepsilon_{\text{R}} > \varepsilon_{\text{M}}$, e la corrosione è termodinamicamente possibile ed avverrà secondo la reazione:

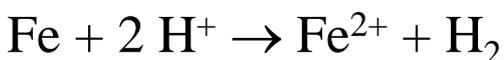
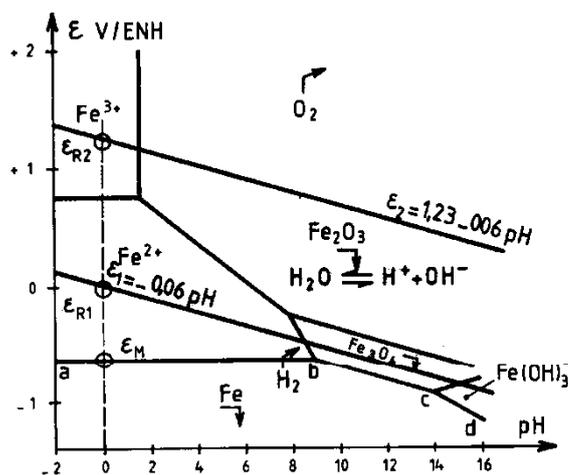


Diagramma di Pourbaix

E' la rappresentazione isotermica della evoluzione $\varepsilon(\text{pH})$ per una composizione determinata, cioè con concentrazioni molari delle specie ioniche in soluzione fissate: è normale scegliere 10^{-6} mol/l per le specie ioniche nei problemi di corrosione (a meno che esse abbiano dei valori sperimentali noti).



- la frontiera **ab** corrisponde all'equilibrio:



in cui $\varepsilon = -0.44 + 0.03 \log[\text{Fe}^{2+}] = -0.62$ V/SHE per $[\text{Fe}^{2+}] = 10^{-6}$ mol/l, indipendentemente dal pH.

- la frontiera **bc** corrisponde all'equilibrio



in cui $\varepsilon = +0.06/8 \log [\text{H}^+]^8 = -0.06$ pH. In questo caso la tensione di equilibrio decresce linearmente con il pH.

Il dominio di stabilità dell'acqua è delimitato dalle seguenti frontiere:

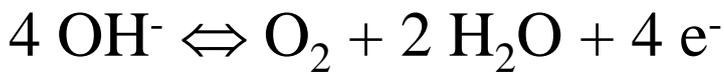
$$\varepsilon_1 = - 0.06 \text{ pH}$$

$$\varepsilon_2 = 1.23 - 0.06 \text{ pH}$$

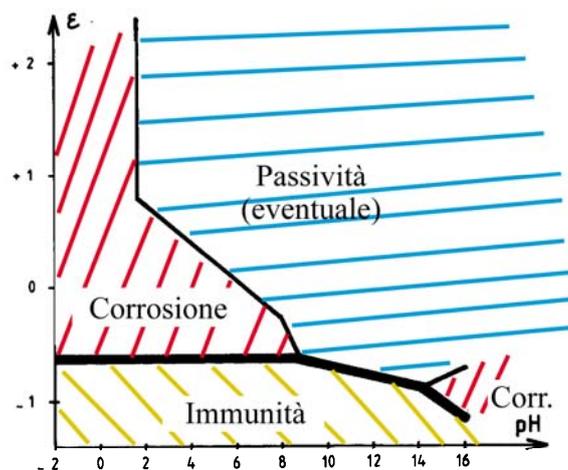
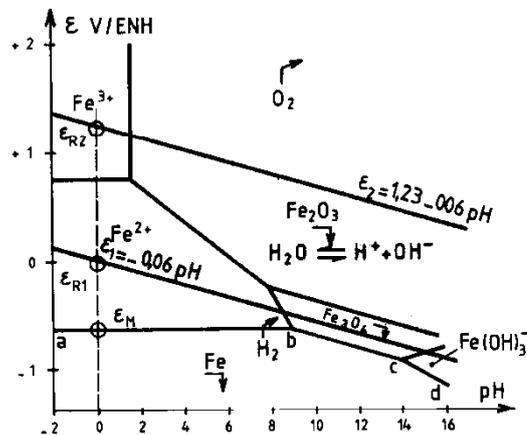
corrispondenti rispettivamente agli equilibri:



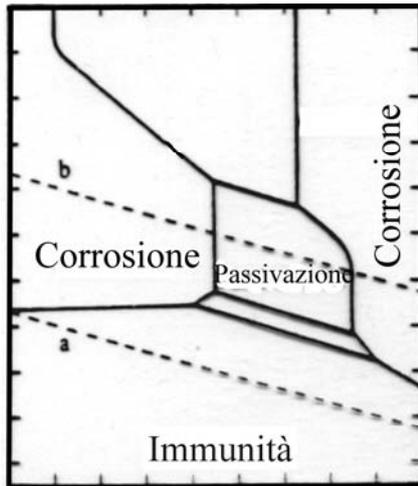
$$p_{\text{H}_2} = 1 \text{ atm}$$



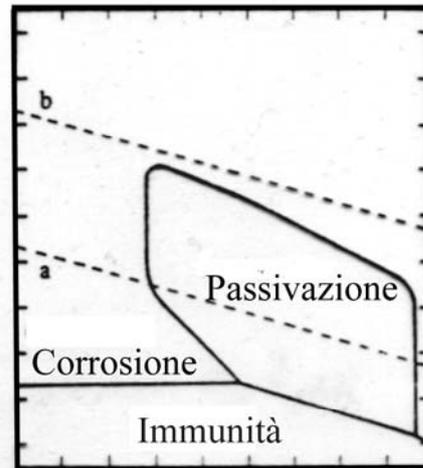
$$p_{\text{O}_2} = 1 \text{ atm}$$



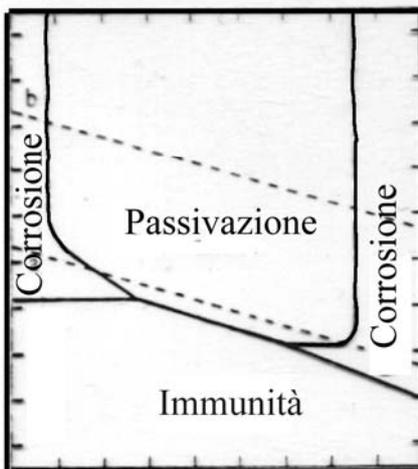
Diagrammi di Pourbaix per diversi metalli puri



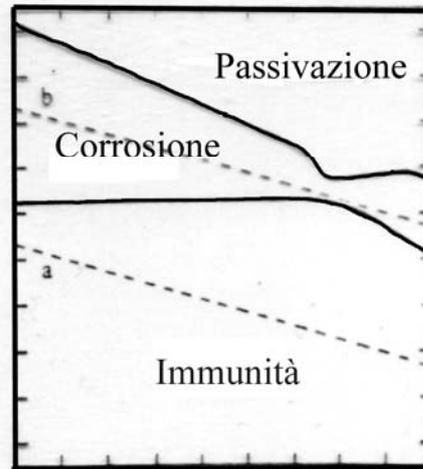
Cu



Cr

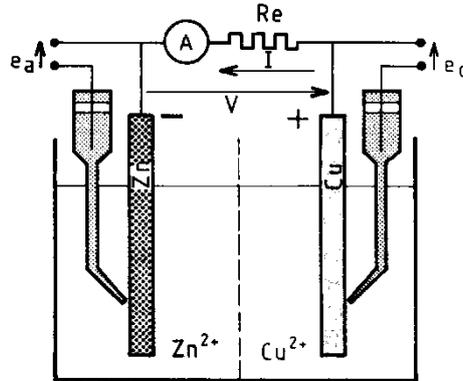


Sn



Ag

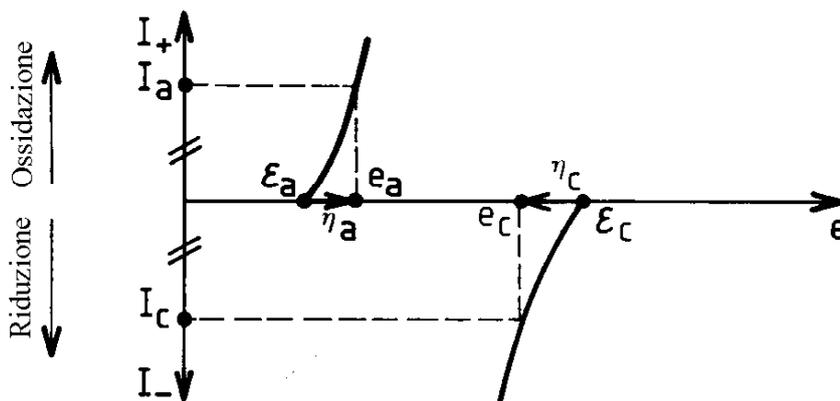
Sovratensioni. Relazioni di Tafel



- e_c ed e_a sono differenti dalle tensioni di equilibrio ε_c ed ε_a a corrente nulla.

- e_c ed e_a dipendono dalla corrente che passa attraverso la cella.

Le curve $e_c(I)$ ed $e_a(I)$ sono le curve di polarizzazione anodica e catodica.



Si introduce spesso la **sovratensione** η , definita come:

$$\eta = e_{I \neq 0} - e_{I=0}$$

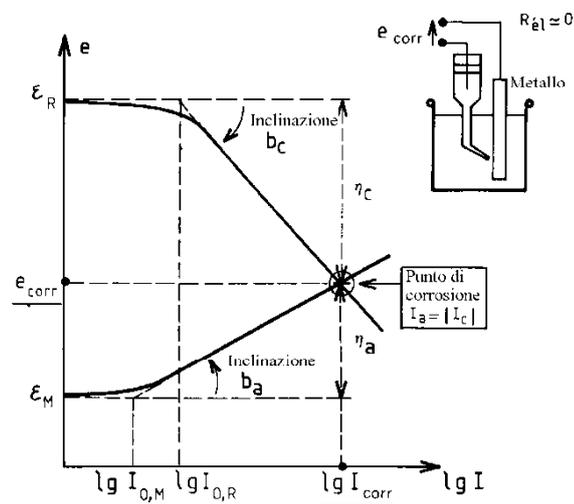
La sovratensione anodica $\eta_a = e_a - \varepsilon_a$ è sempre positiva.

La sovratensione catodica $\eta_c = e_c - \varepsilon_c$ è sempre negativa.

Le curve di polarizzazione saranno ben descritte anche da $\mu_c(I)$ ed $\mu_a(I)$

$$\eta_a = b_a \log \frac{I}{I_{0,a}}$$

$$\eta_c = b_c \log \frac{I}{I_{0,c}}$$



Esempio: per la reazione di riduzione dei protoni:



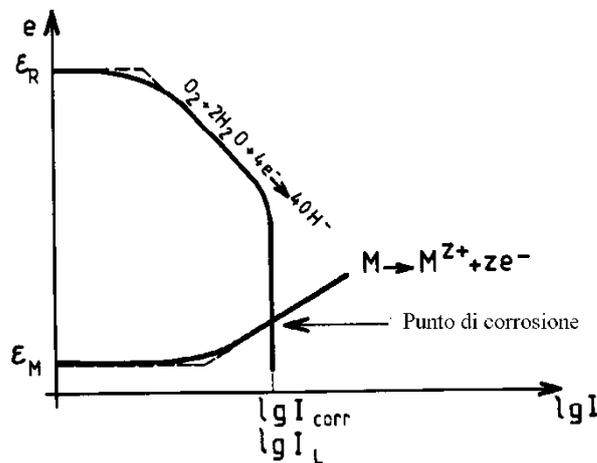
$$b_c = - 0.12 \text{ V}$$

$I_0 = 10^{-13} \text{ A cm}^{-2}$ sul Pb e $10^{-3} \text{ A cm}^{-2}$ sul Pt.

In effetti in certi casi le correnti sono limitate da fenomeni di trasporto per diffusione delle specie chimiche reagenti. Le curve di polarizzazione sono allora caratterizzate da una corrente I_L detta corrente limite la cui intensità è proporzionale alla concentrazione della specie che diffonde nell'elettrolita.

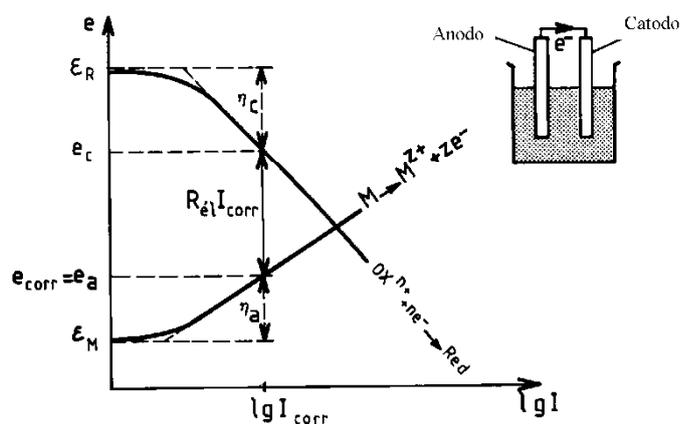
Diagrammi di Evans

Il diagramma di Evans di un sistema sotto corrosione è la rappresentazione nel piano e - $\lg I$ oppure e - I delle curve di polarizzazione anodica (ossidazione del metallo) e catodica (riduzione dell'accettore di elettroni), quest'ultima riportata nel semi piano anodico.



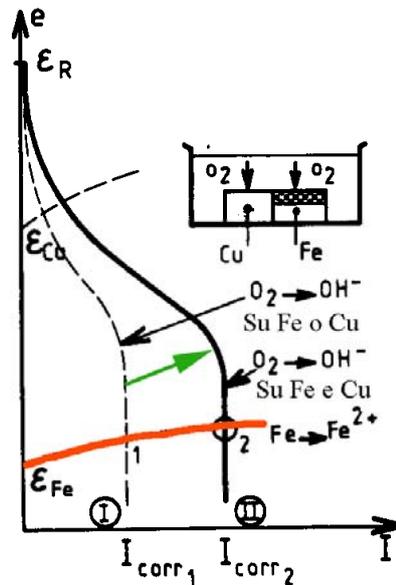
Se si considera il caso di una sola reazione di ossidazione ed una sola reazione di riduzione (elettrodo doppio) si ha che $V \rightarrow 0$ e che:

$$\varepsilon_R - \varepsilon_M = \eta_a + |\eta_c| + R_{el} I_{corr}$$
 ove R_{el} è la resistenza elettrica dell'elettrolita.

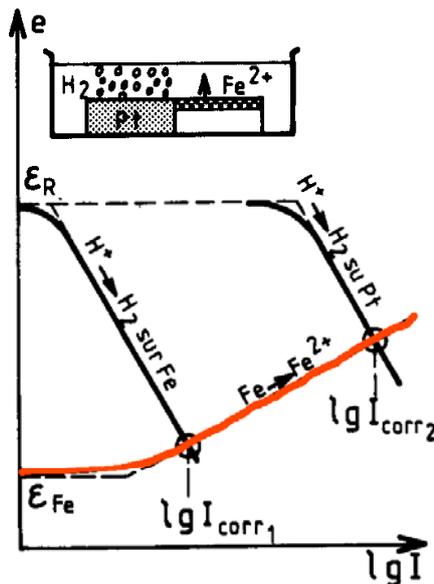


Sistemi polielettrodici

Due aree uguali di Fe e Cu sono in contatto elettrico e sono bagnate da una soluzione neutra areata nella quale l'ossidante è l'O₂ disciolto.

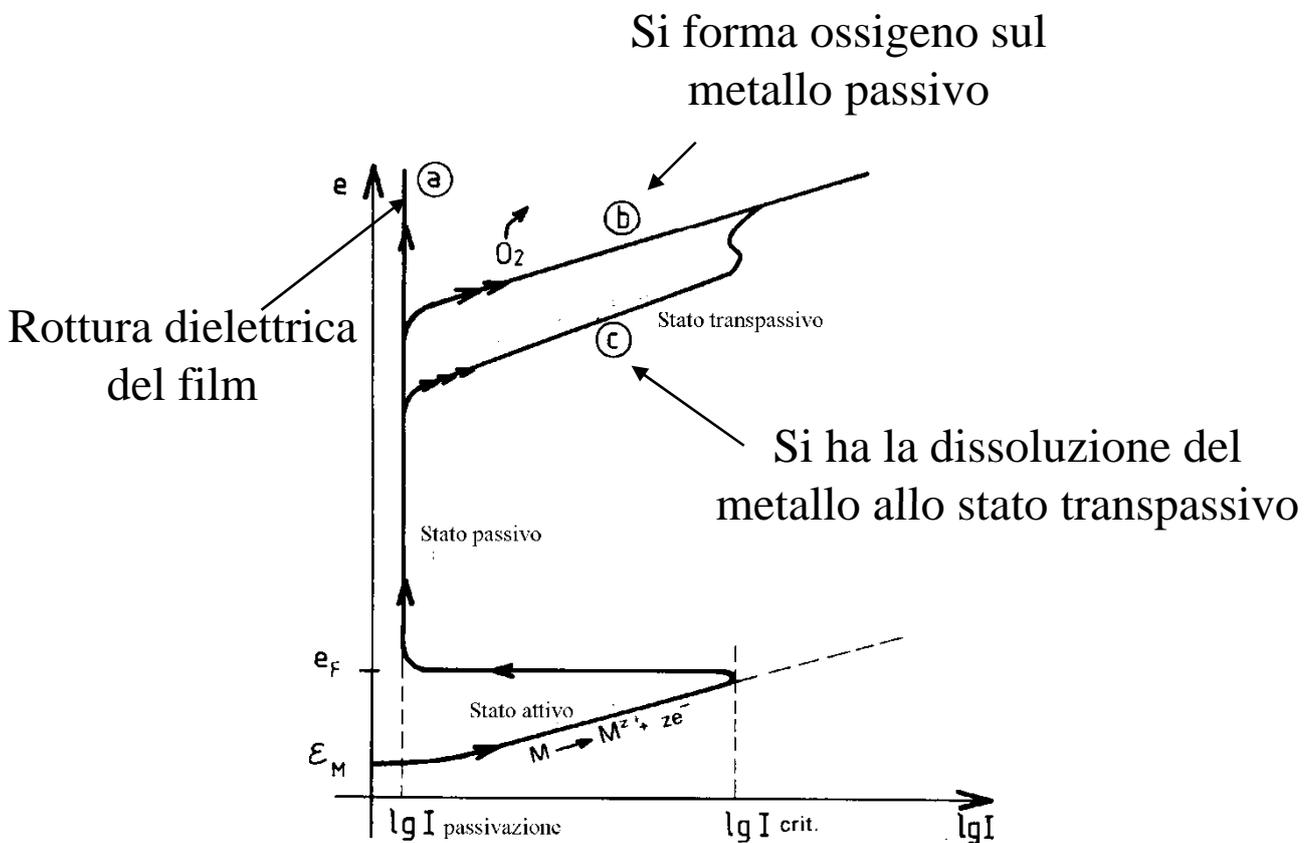


Due aree uguali di Fe e di Pt sono in contatto elettrico e sono bagnate da una soluzione acida. La reazione di riduzione è quella dei protoni.



Fenomeni di passivazione

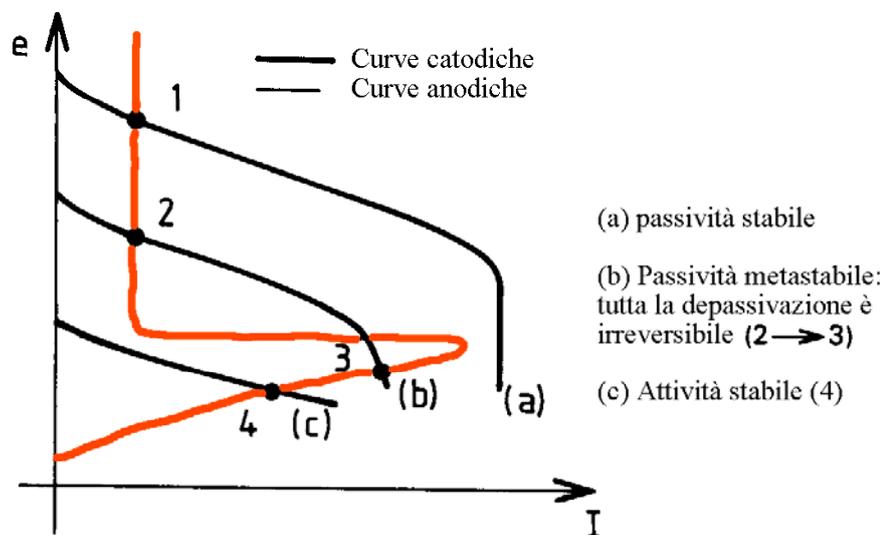
La passivazione di un metallo comporta la trasformazione di una superficie attiva in via di corrosione in una quasi inattiva, grazie alla formazione di uno strato di passivazione



Passivazione chimica

Per portare un metallo nel suo dominio di passivazione si può utilizzare un potenziostato che impone al metallo un valore di tensione opportuno. Si può anche utilizzare un ossidante in condizioni tali che il punto di corrosione del sistema sia nel dominio di passivazione del metallo: la corrosione avverrà quindi ad una velocità estremamente bassa corrispondente a I_{passiv} . In tale caso è necessario che $\varepsilon_R > e_F$ e I abbia potuto raggiungere il valore I_{crit} prima di fissarsi a I_{passiv} .

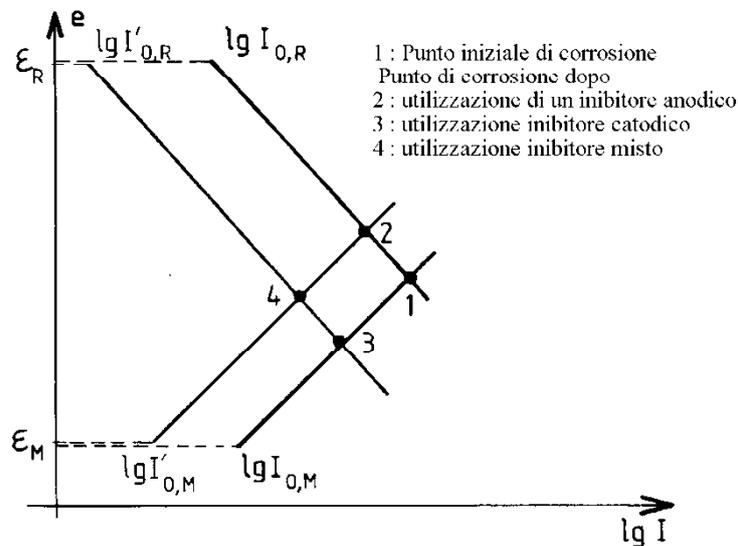
Metallo	$e_F^0 / \text{SHE}(\text{V})$	Ossidanti	$e_R^0 / \text{SHE}(\text{V})$
Fe	+ 0.58	H_2CrO_4	+ 1.28
Ni	+ 0.36	HClO_4	+ 1.28
Cr	-0.22	HNO_3	+0.93
Ti	-0.24	H_2SO_4	+0.13



Metodi di protezione contro la corrosione

- Metodi cinetici: permettono di agire direttamente sui parametri cinetici: densità di corrente di scambio anodica e catodica $I_{0,a}$ e $I_{0,c}$, coefficienti di Tafel anodici e catodici b_a e b_c , aree anodiche e catodiche S_a e S_c . In tale categoria possono essere ricordati:
 - l'impiego degli **inibitori**;
 - l'impiego dei **rivestimenti**;
 - in una certa misura, la **passivazione anodica**.
- Metodi termodinamici: essi consistono nel diminuire $\varepsilon_R - \varepsilon_M$, fino addirittura a rendere tale differenza negativa. Si possono citare in tale categoria:
 - la **scelta del metallo**;
 - la **protezione catodica**, che permette di posizionare il metallo nella sua zona di immunità.

Impiego di inibitori



Impiego di rivestimenti

Si possono distinguere:

- Rivestimenti metallici, ottenuti per:
 - elettrolisi (Zn, Ni, Cr, Cu, Cd, ...)
 - immersione (Zn, Sn, Al)
 - diffusione di un elemento di lega (Zn, Al)
 - placcatura, su prodotti piani durante la laminazione a caldo (saldatura per diffusione). Sono placcati anche su acciaio al carbonio: acciai inossidabili, ottone, nickel, cupro-nickel, rame,
- Rivestimenti non metallici
 - pitture, vernici contenenti eventualmente degli inibitori di corrosione;
 - smalti, vetri;
 - materie plastiche, gomme;
 - fosfatazione;
 - ossidazione anodica (Al) oppure chimica (Mg).

Protezione anodica

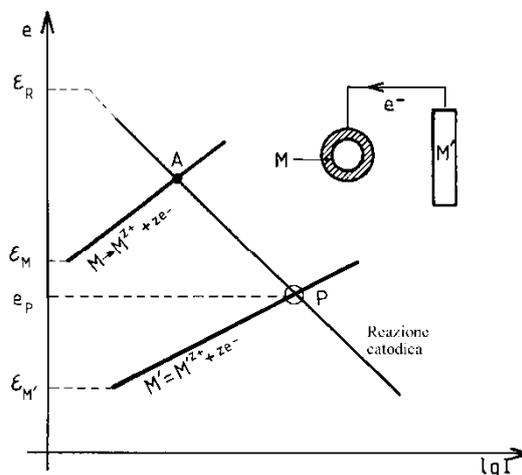
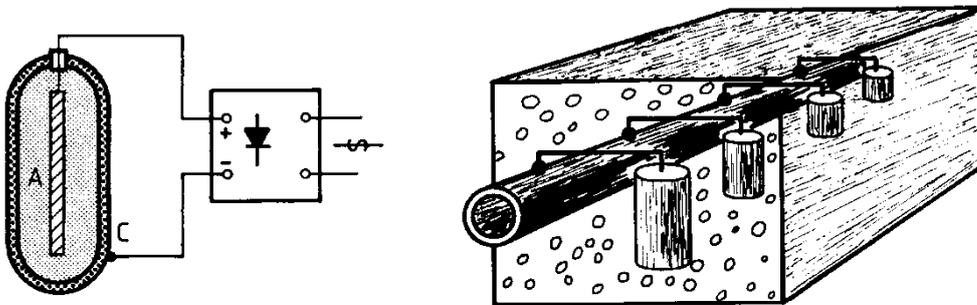
Essa consiste nell'aumentare la tensione metallo-ambiente in modo da portarlo nella sua zona di passivazione.

- L'impiego di **catodi statici**, convenientemente distribuiti sulla struttura da proteggere e costituiti da metalli più nobili.
- L'impiego di un **potenziostato** che porta la struttura al di sopra della tensione di Flade e la mantiene fra i due limiti di passivazione.

Protezione catodica

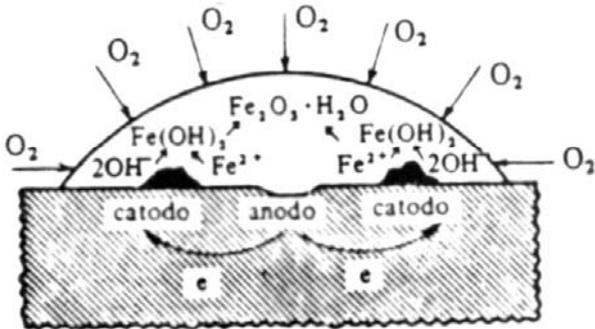
Essa consiste nell'abbassare la tensione metallo-ambiente in modo da portarla nella zona di immunità.

- Protezione catodica per **corrente imposta**, utilizzando un generatore esterno di f.e.m. regolabile ed un anodo ausiliario;
- Protezione catodica con **anodo sacrificale**. In questo caso la f.e.m. necessaria è ottenuta dalla differenza fra la tensione media della coppia di corrosione e la tensione propria (e più negativa) di un anodo, detto sacrificale.

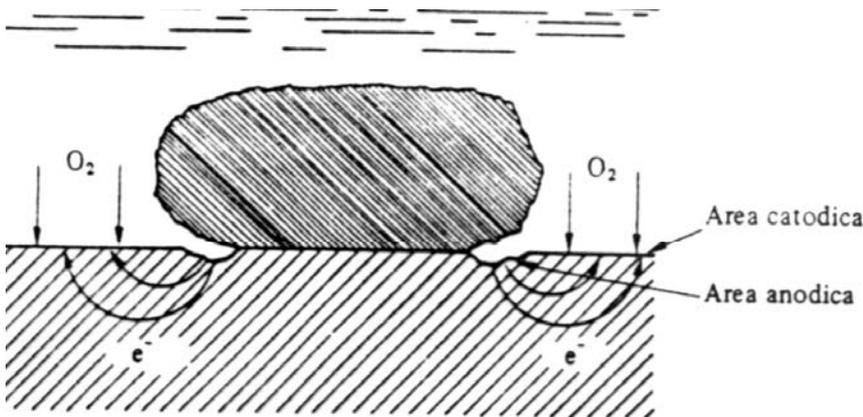


Corrosione localizzata

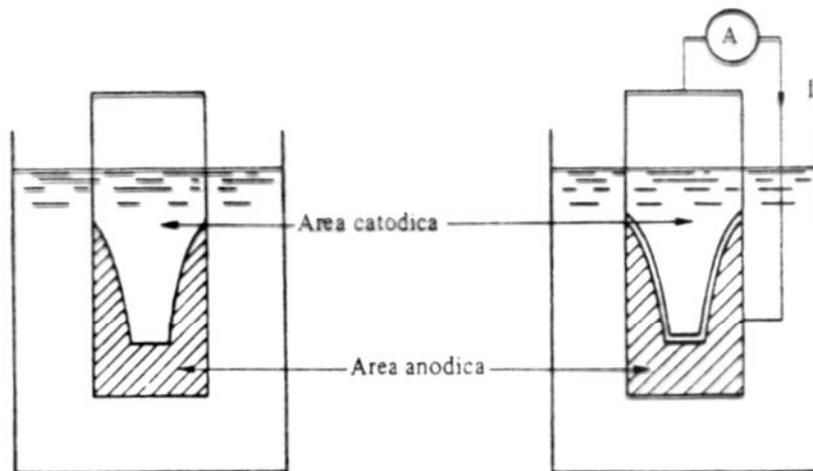
Corrosione per aereazione differenziale



Corrosione sotto goccia



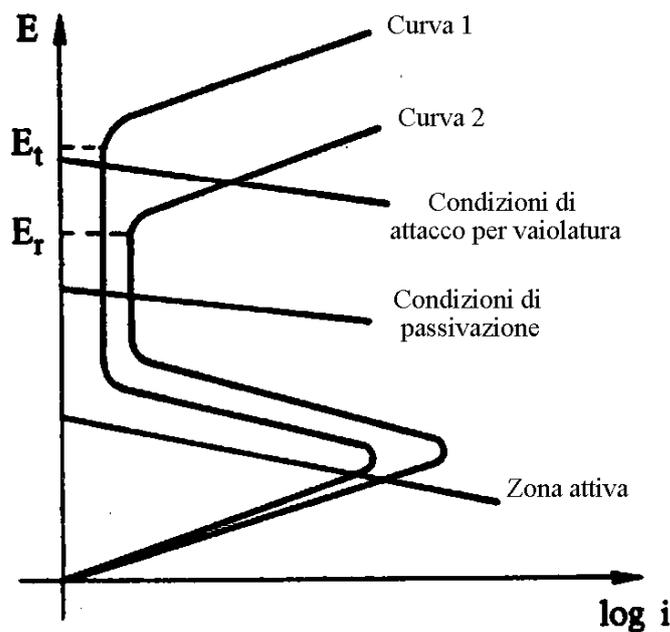
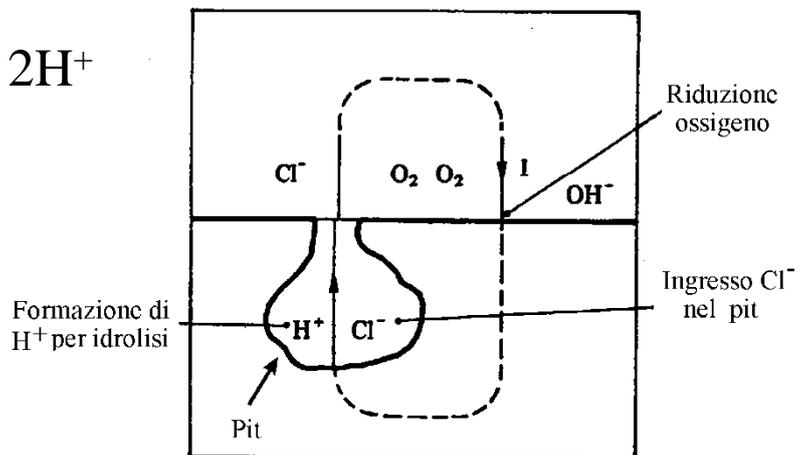
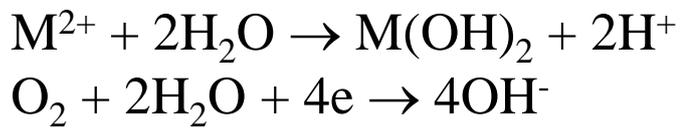
Corrosione sotto schermo



Vaiolatura (pitting)

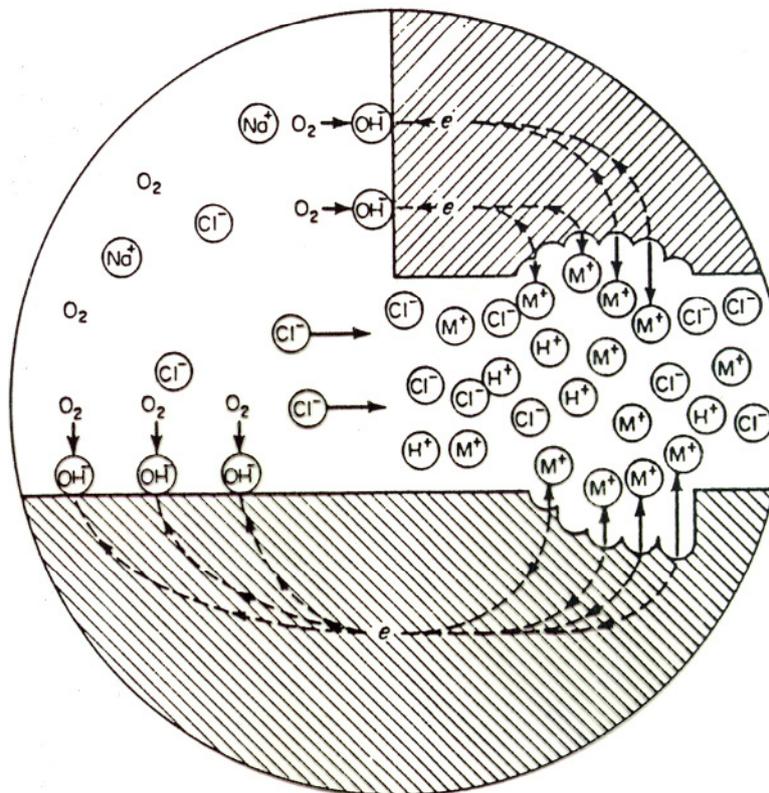
E' una forma di corrosione estremamente insidiosa e può avere luogo solo se si verificano contemporaneamente le seguenti condizioni:

- Metallo attivo-passivo
- Ambiente ossidante
- Presenza di ioni alogenuri (Cl^- , F^- ...)



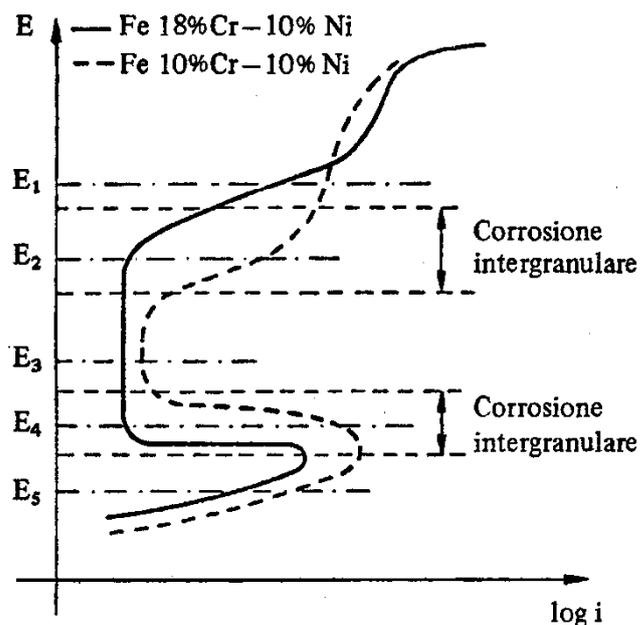
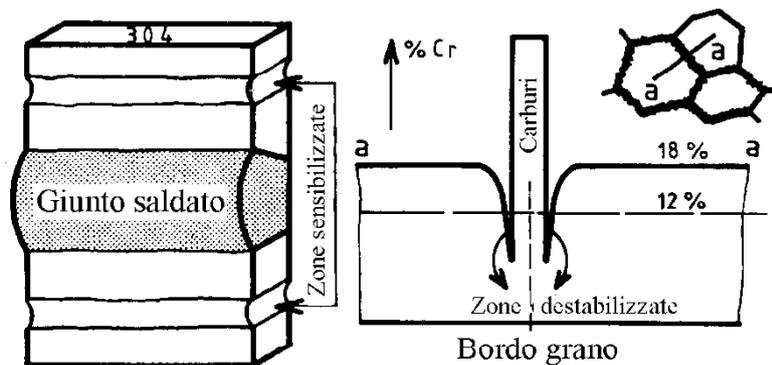
Corrosione interstiziale (crevice)

Tale forma di attacco corrosivo localizzato si ha nel caso in cui l'ambiente penetra in interstizi (0.025-0.1 mm) delle superfici di leghe metalliche passivabili (intagli, saldature porose, collegamenti filettati...).



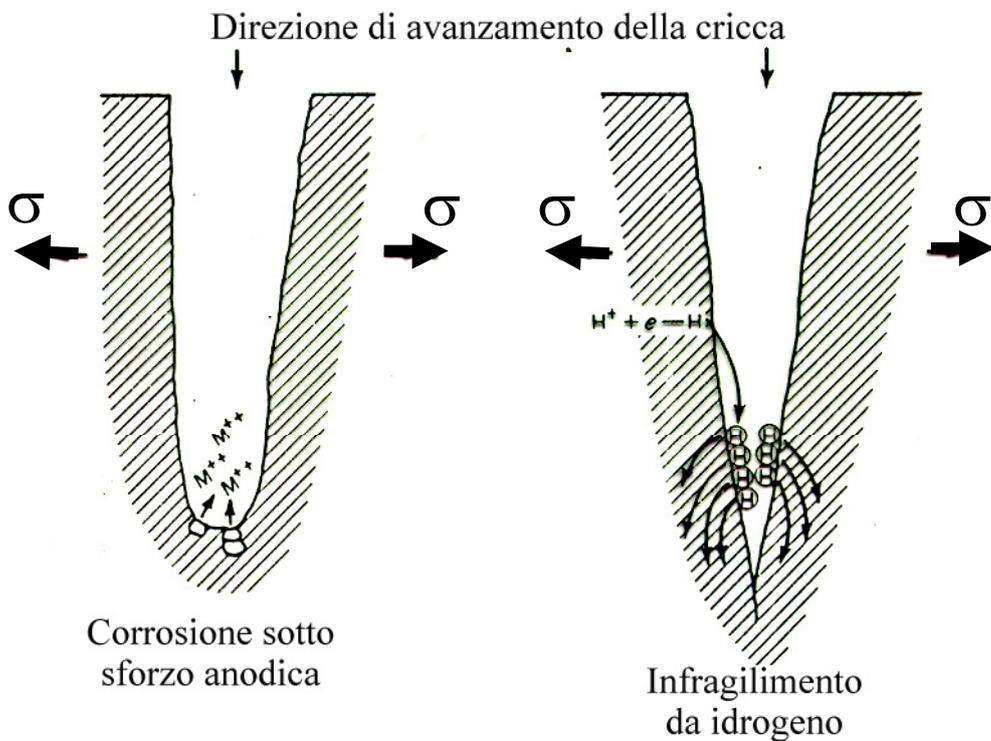
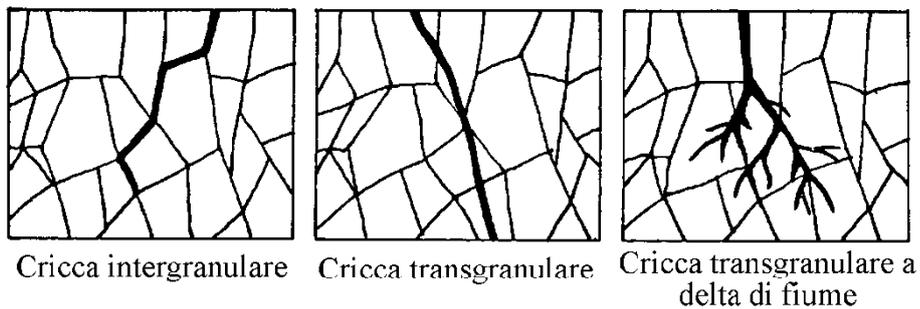
Corrosione intergranulare

- Forma di corrosione tipica degli acciai inossidabili austenitici
- Si ha in seguito alla sensibilizzazione del metallo (permanenza per tempi più o meno lunghi a 600-700°C)
- La sensibilizzazione di un acciaio consiste nella precipitazione a bordo grano di carburi di Cr in quantità tale che il tenore di Cr libero scende al di sotto del limite di inossidabilità del 12%.
- E' un problema tipico dei giunti saldati in corrispondenza della ZTA



Corrosione sotto sforzo

La corrosione sotto sforzo ha luogo nei casi in cui ambienti blandamente aggressivi, oppure completamente non aggressivi, interagiscono con uno stato di sollecitazione, con la formazione di cricche che possono evolvere fino alla rottura del pezzo.



Leghe di Al

Alluminio puro (99.996%)

$T_f = 660^\circ\text{C}$

$R_m = 45 \text{ MPa}$ (ricotto)

$R_{p0.2} = 15 \text{ MPa}$ (ricotto)

$A\% = 48$ (ricotto)

$HB = 16$ (ricotto)

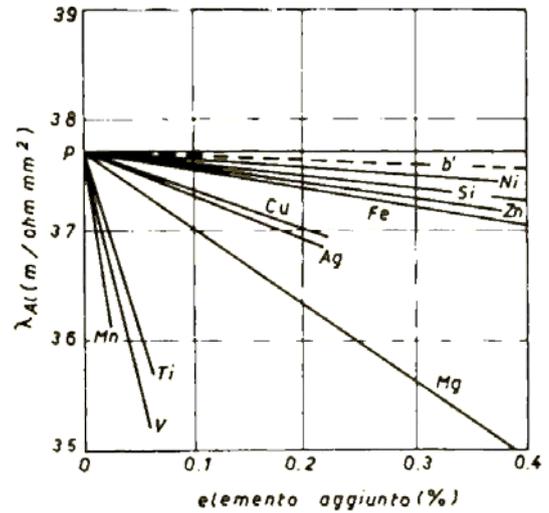
$R_m = 110 \text{ MPa}$ (incrudito)

$R_{p0.2} = 106 \text{ MPa}$ (incrudito)

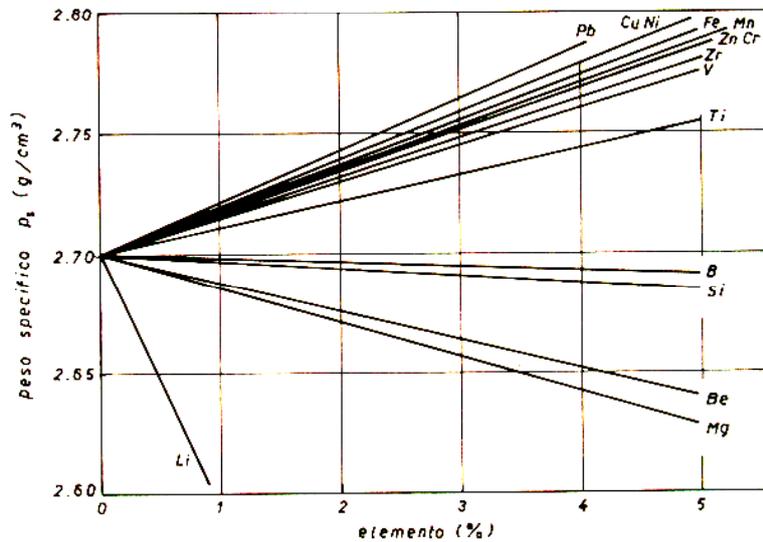
$A\% = 6$ (incrudito)

$HB = 27$ (incrudito)

$E = 67 \text{ GPa}$

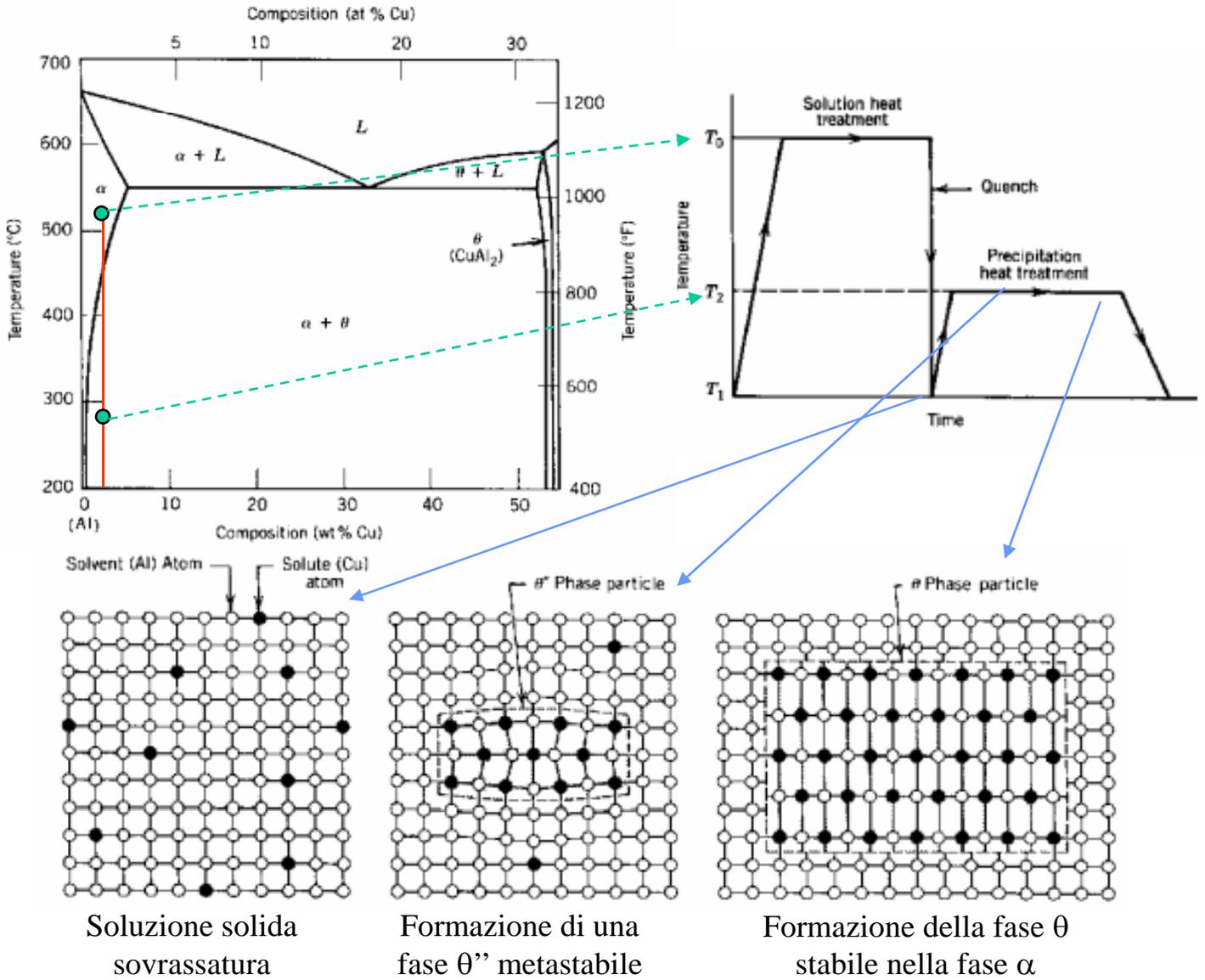


Effetto degli elementi di lega sulla conducibilità elettrica

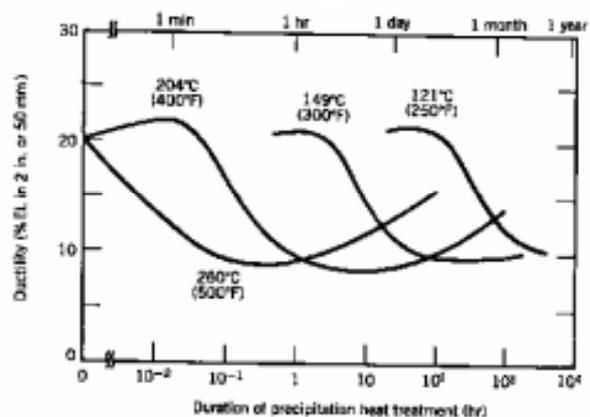
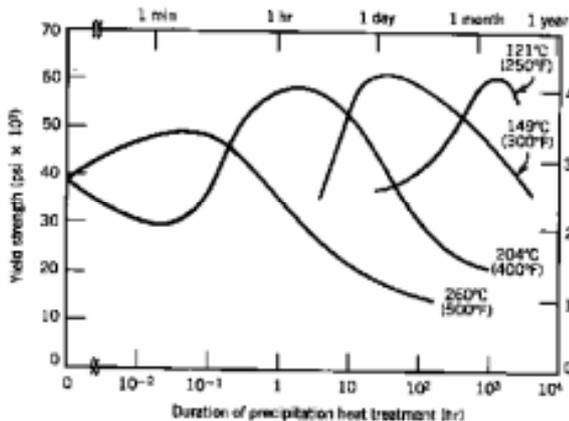


Effetto degli elementi di lega sul peso specifico dell'Al

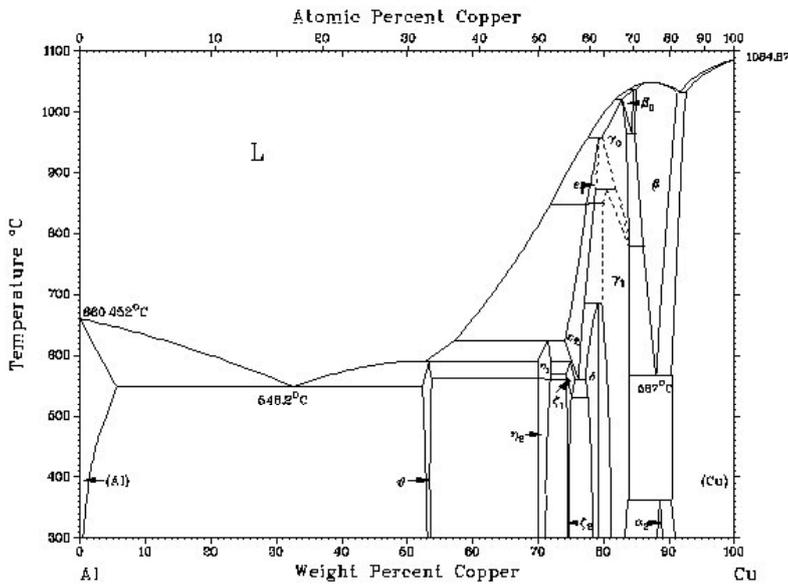
Leghe di Al: meccanismo di rafforzamento



La resistenza meccanica e la durezza aumentano grazie alla formazione di una nuova fase all'interno della fase originaria, mentre la duttilità diminuisce

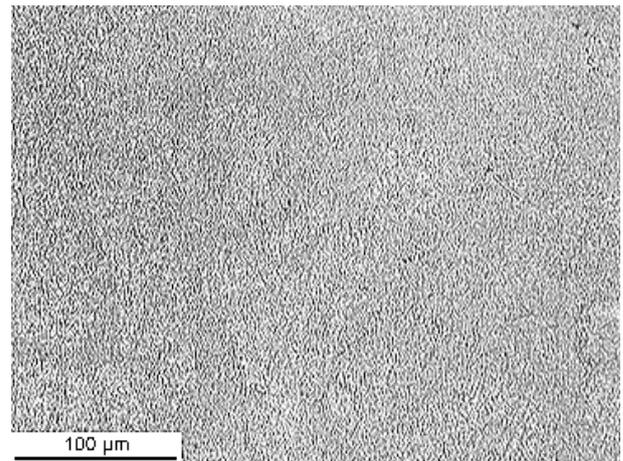
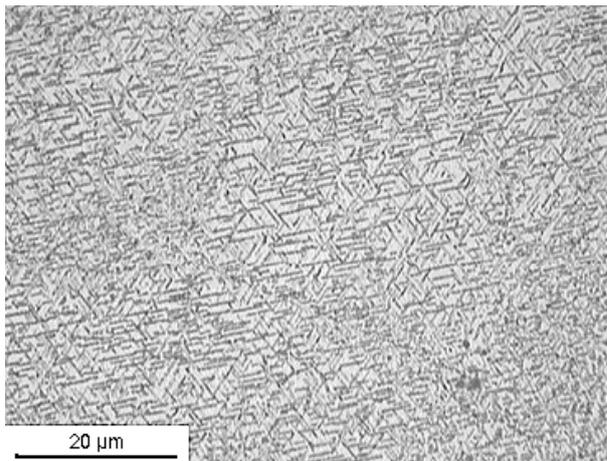


Al-Cu

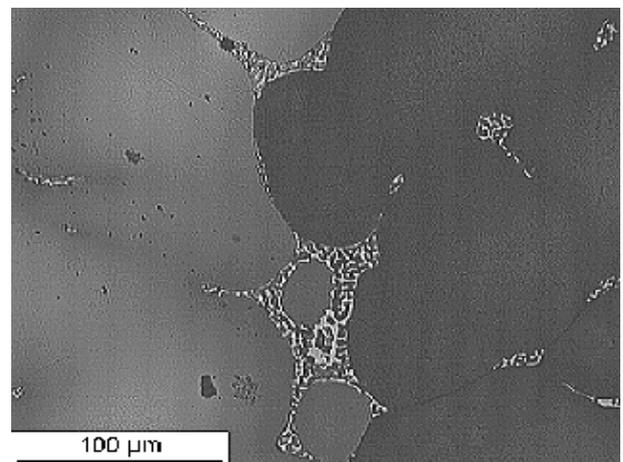
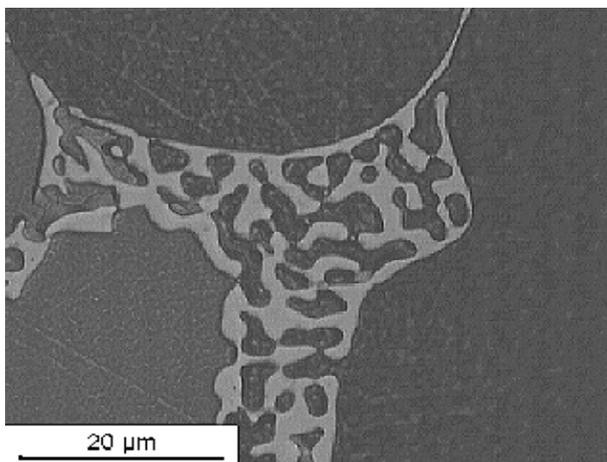


- Innalza R ed $R_{p0.2}$ con un massimo al 6% (420 e 270 MPa rispettivamente)
- A% diminuisce
- peggiora resistenza alla corrosione

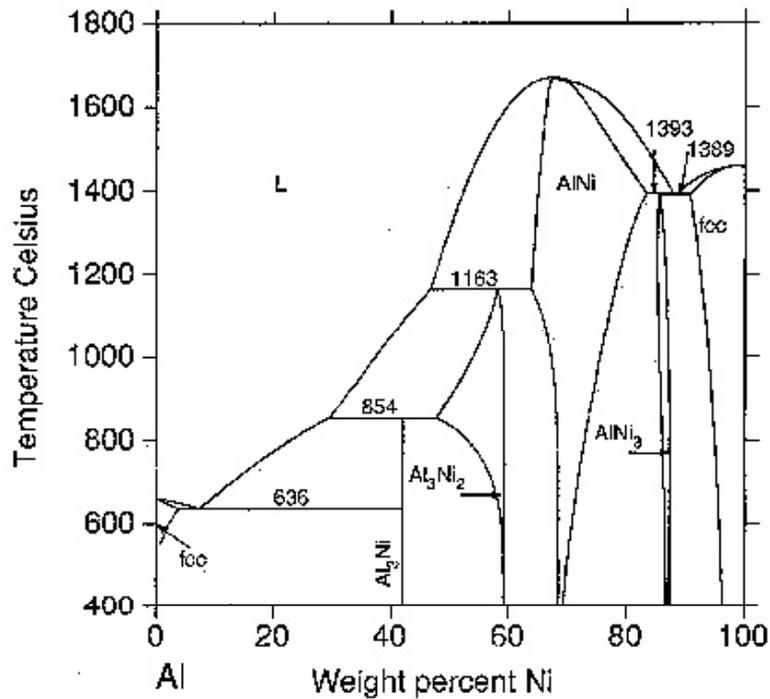
Al - 4% Cu invecchiato



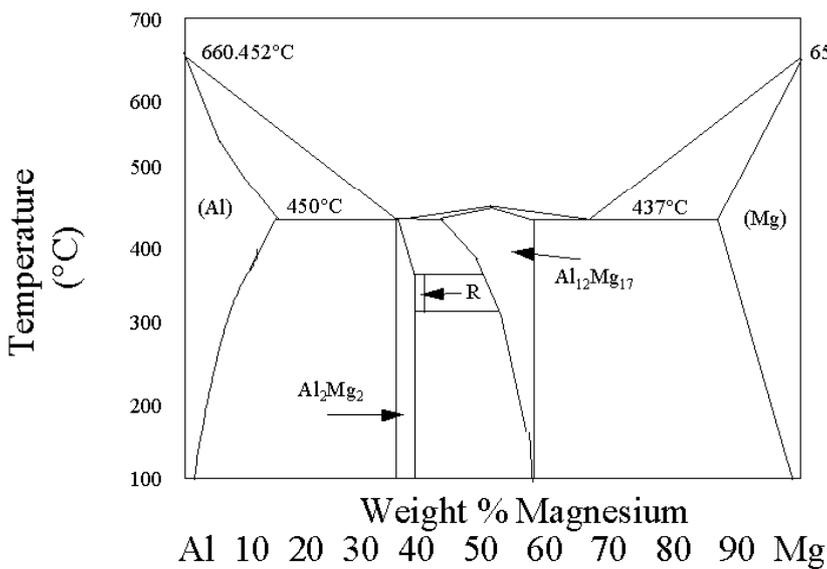
Al - 4% Cu sovrainvecchiato



Al-Ni

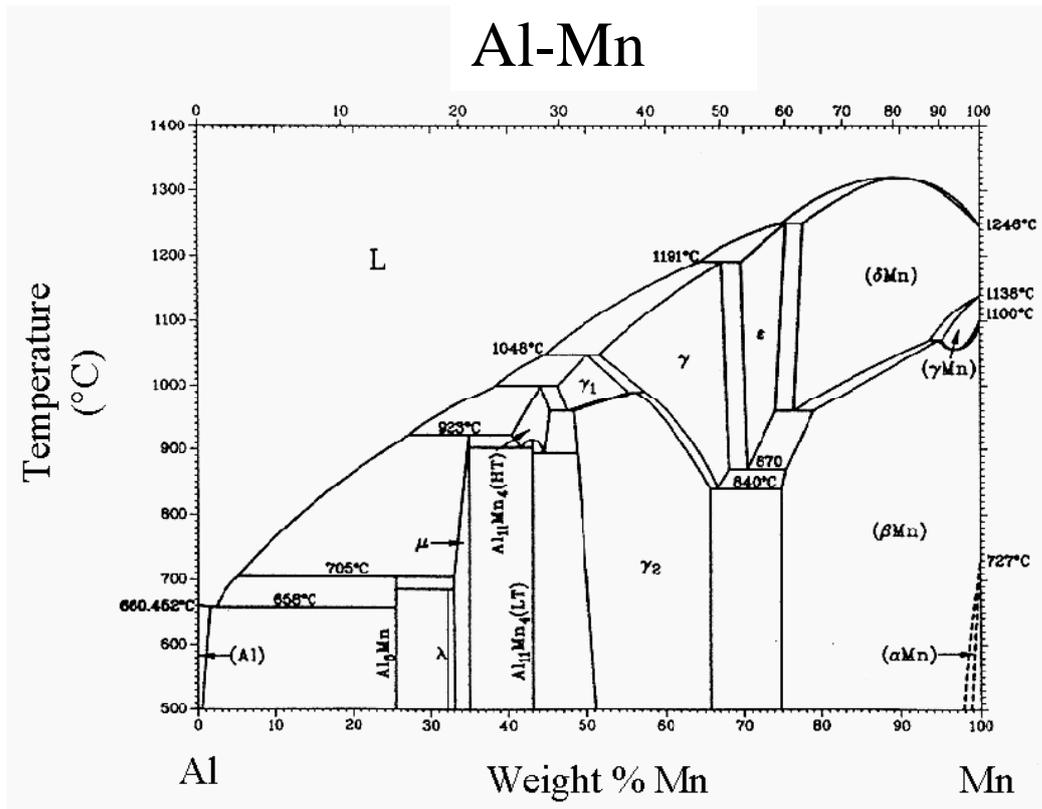


Al-Mg

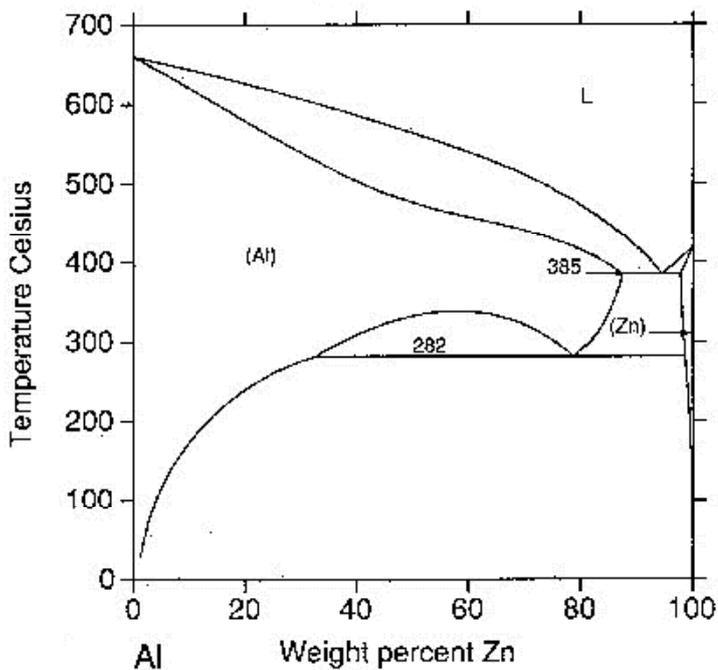


- Abbassa peso specifico
- Aumenta dilatazione termica
- Diminuiscono conduttività elettrica e termica
- R ha un massimo per circa il 14%

Al-Mn

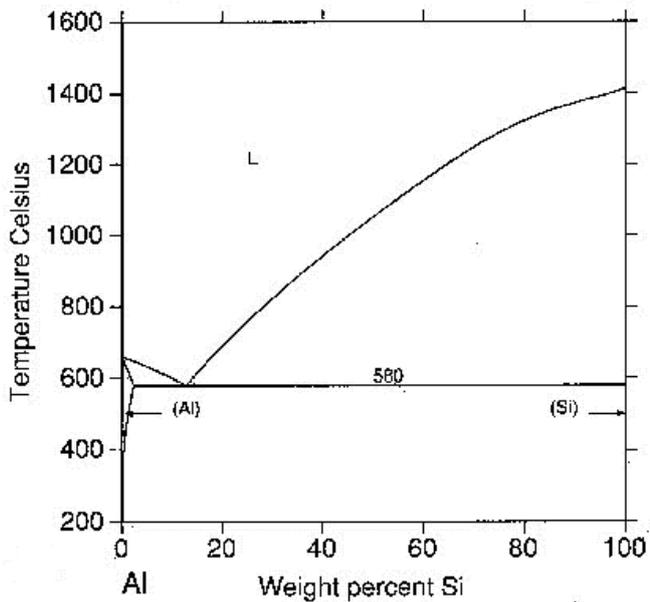


Al-Zn



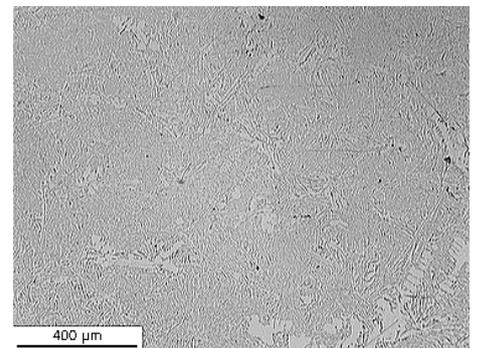
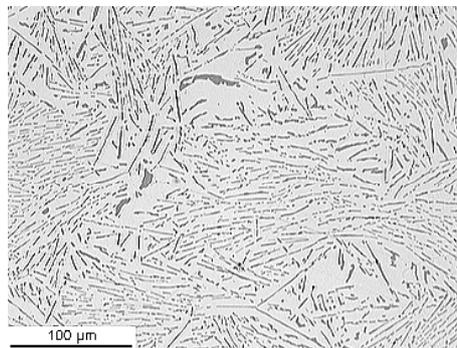
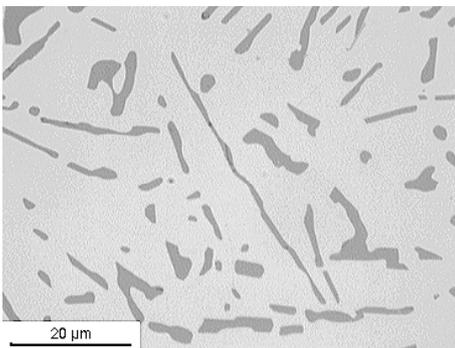
- E' uno degli elementi più efficiente nel migliorare le caratteristiche tensili, ma le rende suscettibili alla corrosione atmosferica ed a quella sotto sforzo

Al-Si

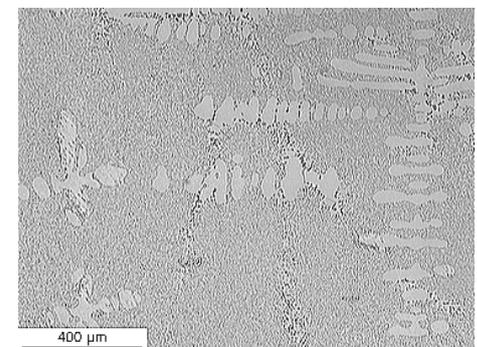
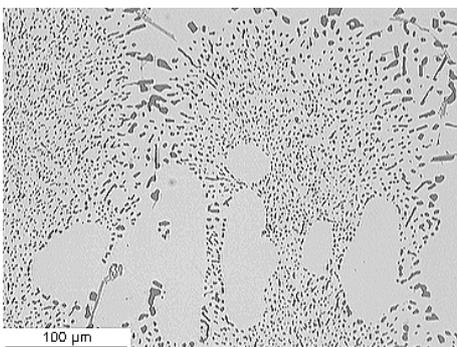
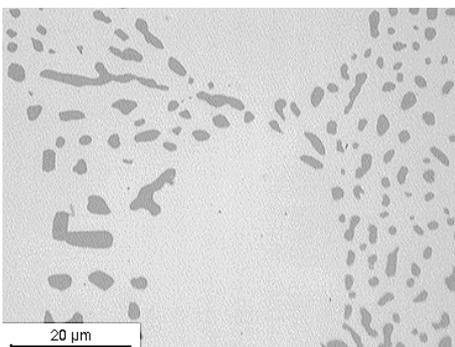


- Migliora fluidità della lega
- Diminuisce il peso specifico e la conduttività termica
- R aumenta leggermente
- La resistenza alla corrosione è migliore di quella delle leghe Al-Cu, ma peggiore di quella delle leghe Al-Mg

Al – 12,7% Si (prossimo all'eutettico)



Al – 12,7% Si – 0,02% Sr



Leghe industriali di Al

Designazione

Sono contraddistinte in numeri di quattro cifre, ove la prima indica la “famiglia” di appartenenza:

- 1000: alluminio nei differenti titoli di purezza commerciale
- 2000: leghe Al-Cu
- 3000: leghe Al-Mn
- 4000: leghe Al-Si
- 5000: leghe Al-Mg
- 6000: leghe Al-Mg-Si
- 7000: leghe Al-Zn

In tale designazione, dopo il numero a 4 cifre, si possono avere le lettere T oppure H seguite da un numero di una o due cifre, a seconda che la lega sia per trattamento termico o per incrudimento

Le leghe di Al possono essere distinte in leghe da lavorazione plastica e leghe da fonderia, per la produzione di getti.

<i>Denom.</i>	<i>Cu</i>	<i>Si</i>	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>	<i>Altri</i>	<i>R_{p0.2} [MPa]</i>
6060	---	0,4	0,5	0,1	---	145
2024	4,4	0.3	1,5	0,6	Fe<0,5	290
7075	1,6	---	2,5	0,2	Ti<0,2	480

Leghe di Cu

Rame elettrolitico rifuso (99.9%)

$T_f = 1083^\circ\text{C}$

$R_m = 23 \text{ MPa}$ (ricotto)

$R_{p0.2} = 7 \text{ MPa}$ (ricotto)

$A\% = 50$ (ricotto)

$HB = 40$ (ricotto)

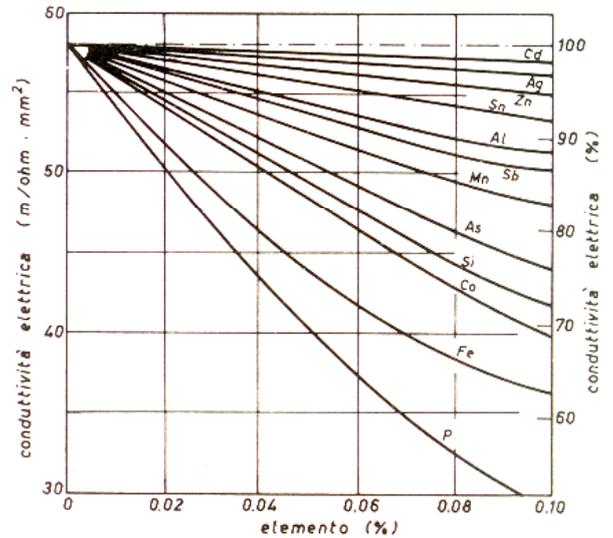
$R_m = 50 \text{ MPa}$ (incrudito)

$R_{p0.2} = 31 \text{ MPa}$ (incrudito)

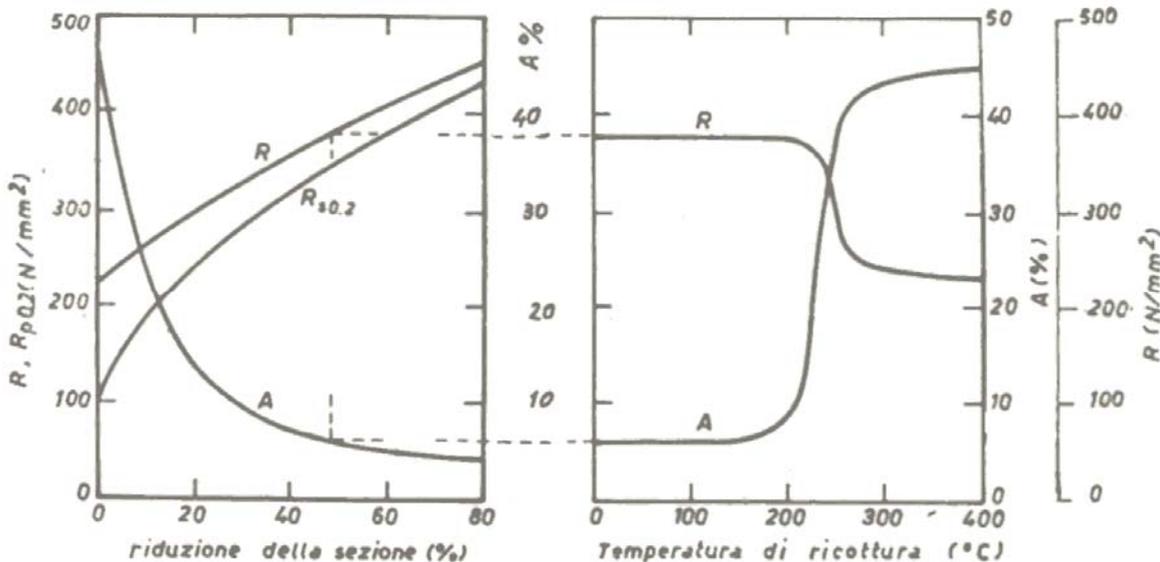
$A\% = 8$ (incrudito)

$HB = 80$ (incrudito)

$E = 125 \text{ GPa}$



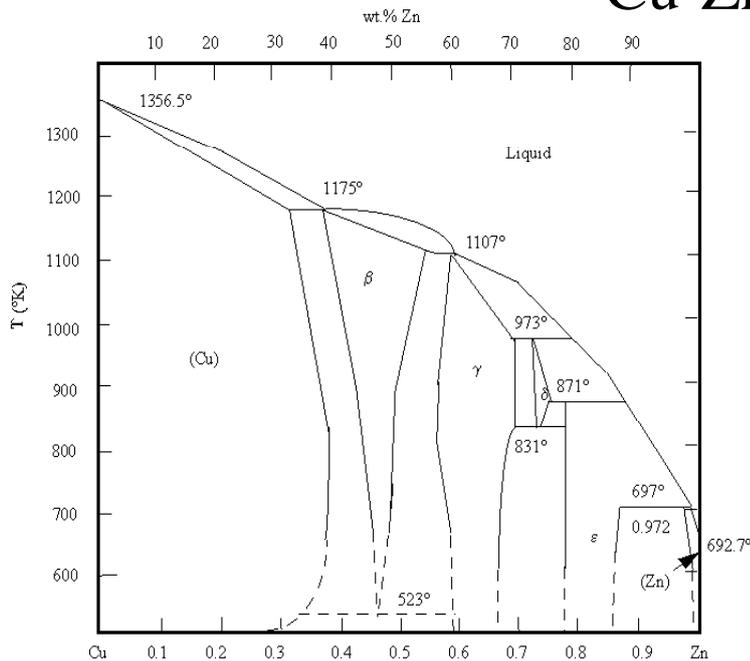
Effetto degli elementi di lega sulla conducibilità elettrica



Influenza dell'incrudimento sulle caratteristiche meccaniche del Cu

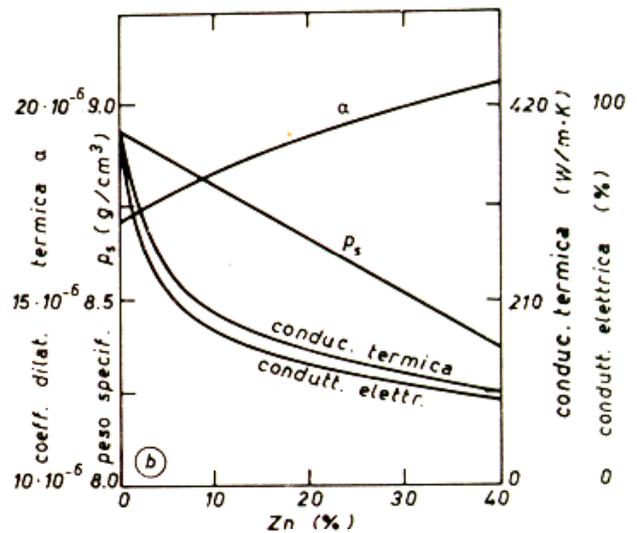
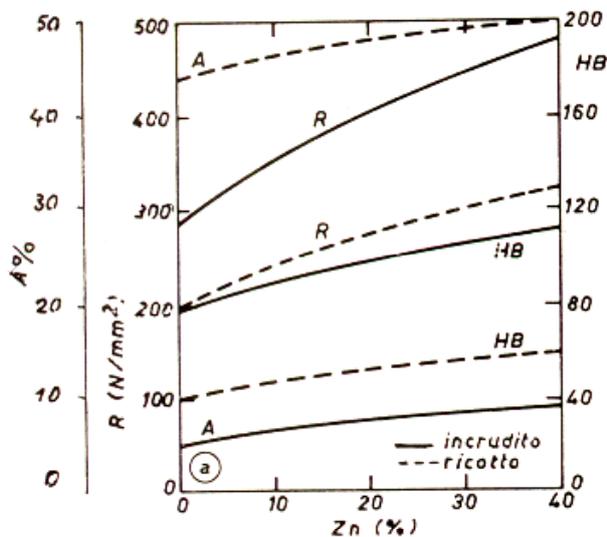
Influenza del trattamento di ricottura sulle caratteristiche meccaniche del Cu

Cu-Zn



Danno luogo a tre soluzioni solide α , β , γ . Esse sono i costituenti strutturali degli **OTTONI**:

- Soluzione solida α : è duttile e malleabile sia a caldo che a freddo; la malleabilità diminuisce con il crescere del tenore di Zn;
- Soluzione solida β : fragile e non lavorabile a freddo; duttile e malleabile a caldo;
- Soluzione solida γ : fragile e non lavorabile sia a freddo che a caldo



- Ottoni del primo titolo, od *ottoni alfa* ($Zn < 36\%$), sono adatti alla lavorazione a freddo (imbutitura e stampaggio)
- Ottoni del secondo titolo, od *ottoni alfa-beta* ($36 < \%Zn < 45$), sono lavorabili a caldo

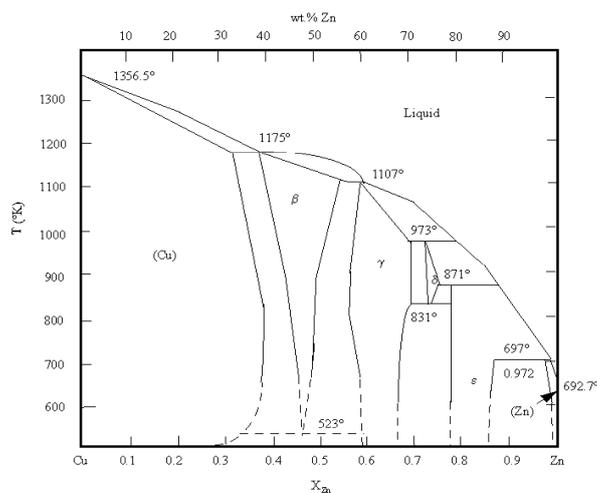
A volte viene aggiunto del Pb (2-3 %), completamente insolubile, in analogia con gli acciai.

$E = 105 \text{ GPa}$

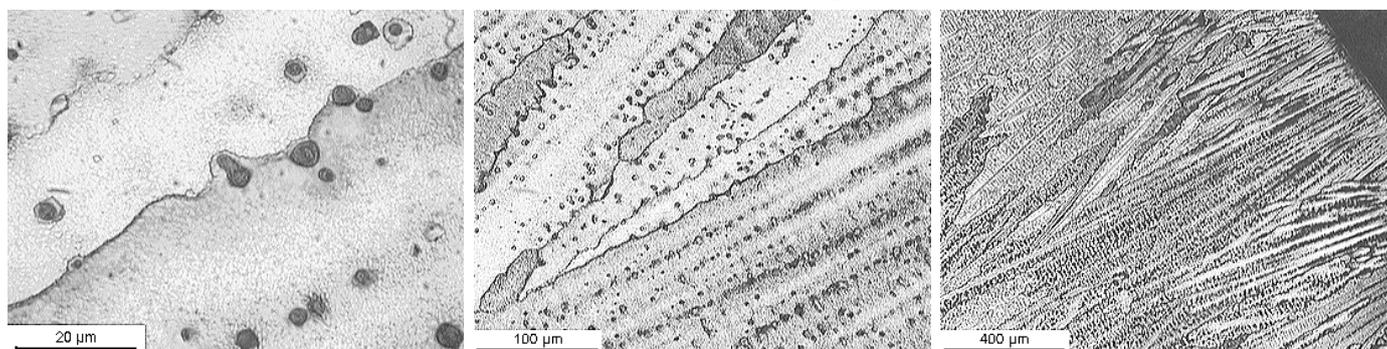
Intervallo di solidificazione esteso (rischio di liquazioni).

Resistenza alla corrosione analoga al rame puro.

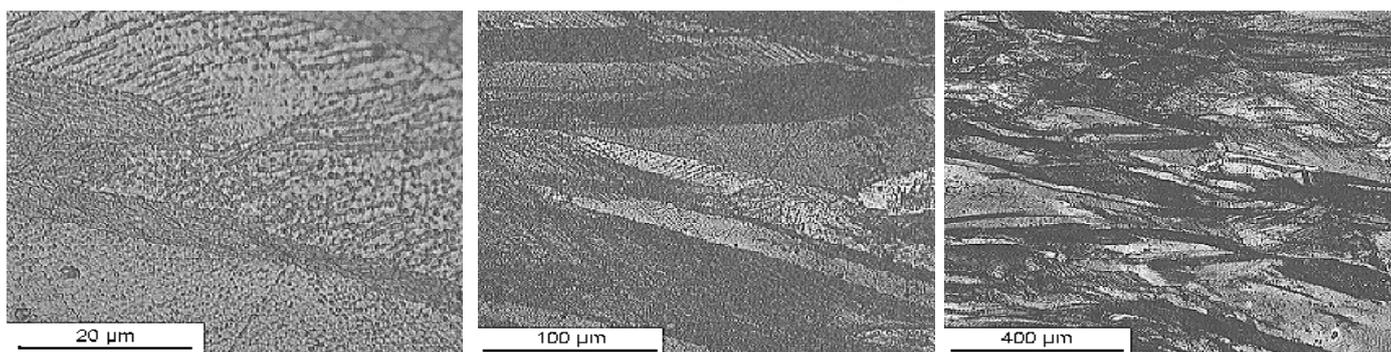
Cu-Zn



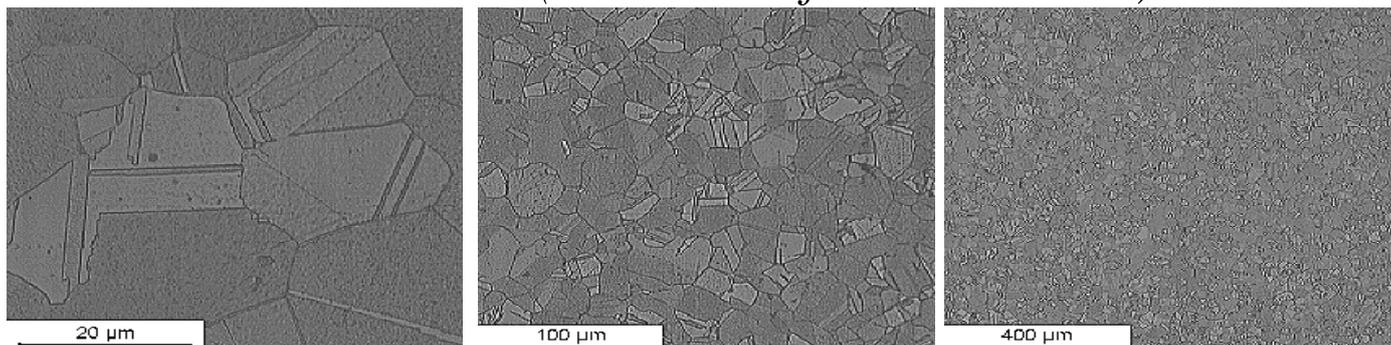
Cu – 30% Zn (getto)



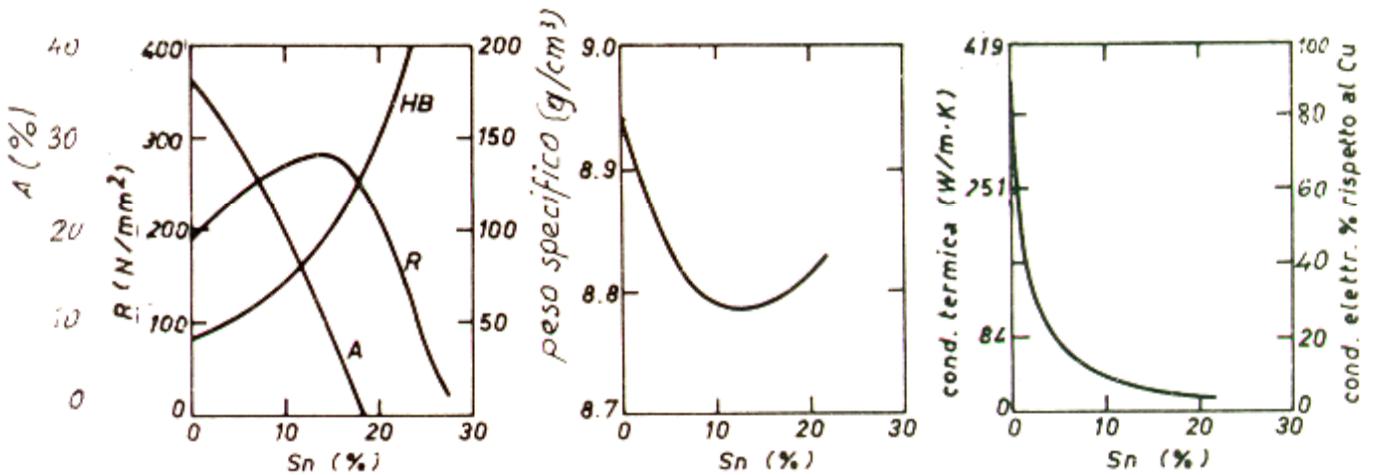
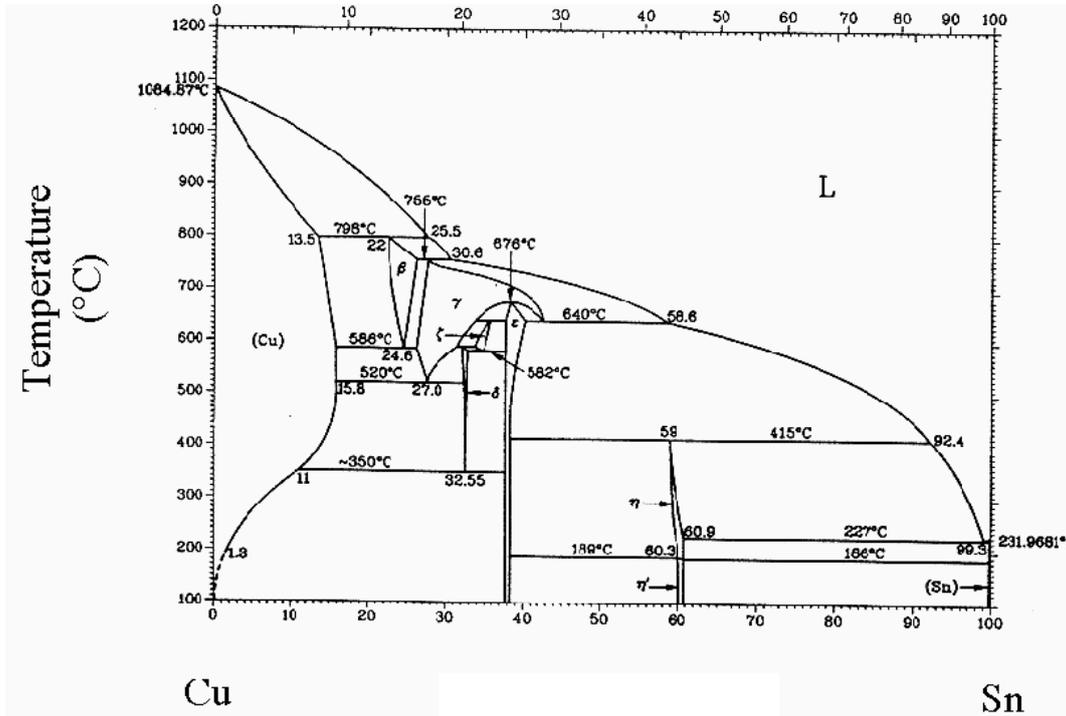
Cu – 30% Zn (incrudito a freddo)



Cu – 30% Zn (incrudito a freddo e ricotto)



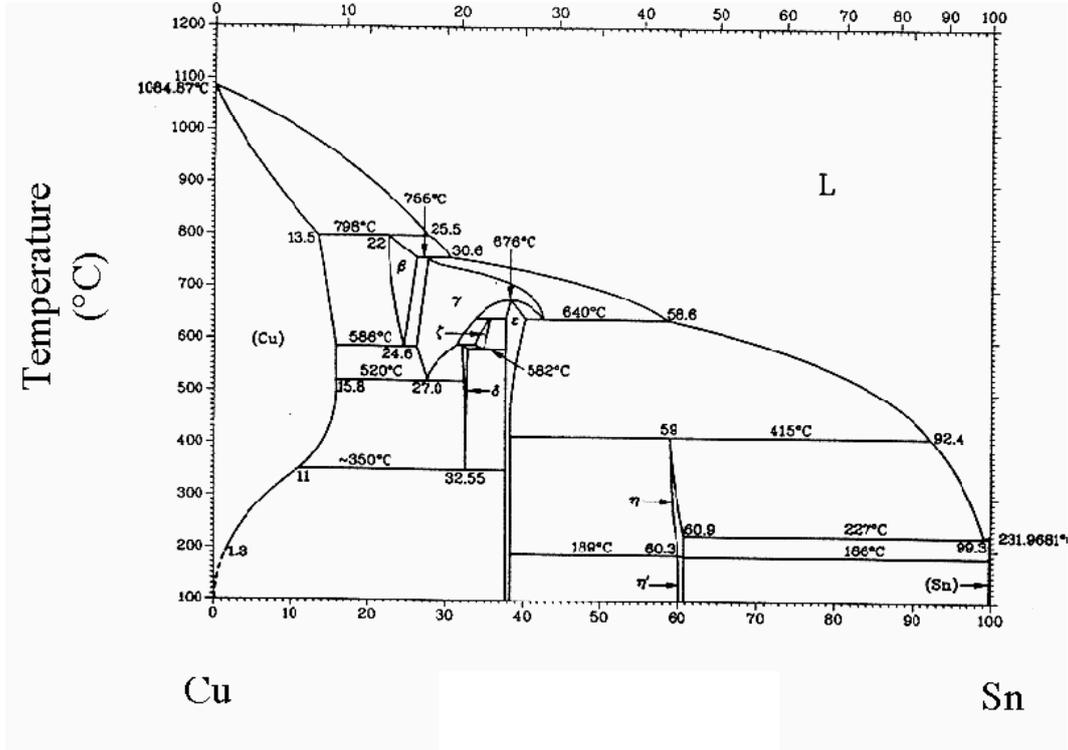
Cu-Sn



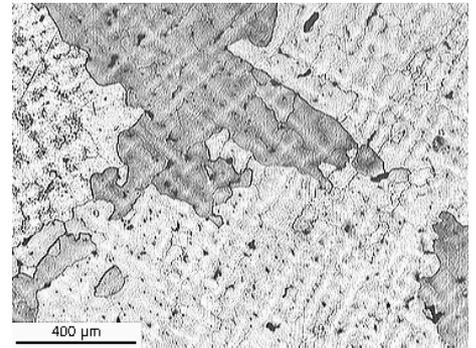
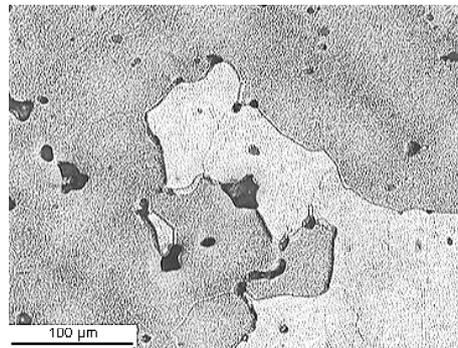
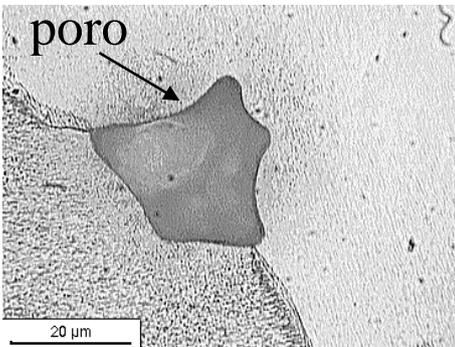
L'aggiunta di Sn aumenta la durezza, le proprietà elastiche e la resistenza in misura maggiore dello Zn ma ne abbassa maggiormente la malleabilità e la duttilità.

Particolarmente elevata è la resistenza alla corrosione dei bronzi allo stagno che giustifica il largo uso che veniva una volta fatto nelle costruzioni navali o per manufatti in contatto con atmosfere corrosive anche a elevata temperatura, o con liquidi corrosivi (soluzioni acide, petrolio ...)

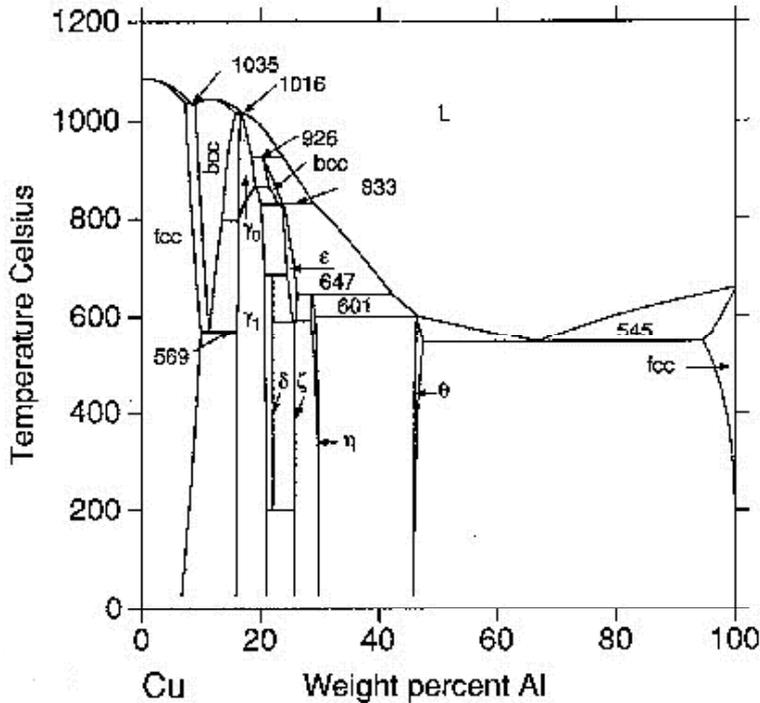
Cu-Sn



Cu - 4% Sn

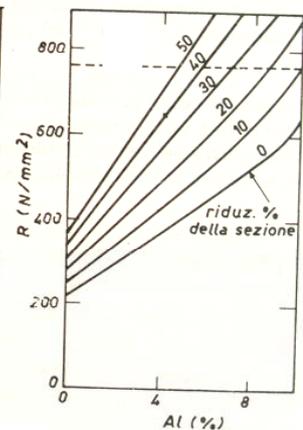
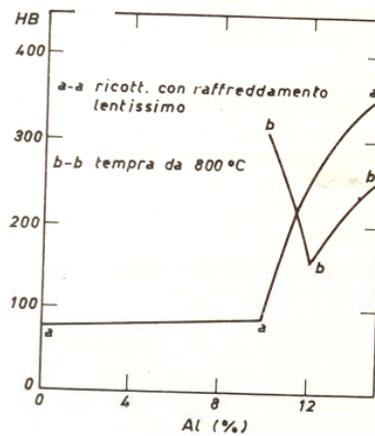
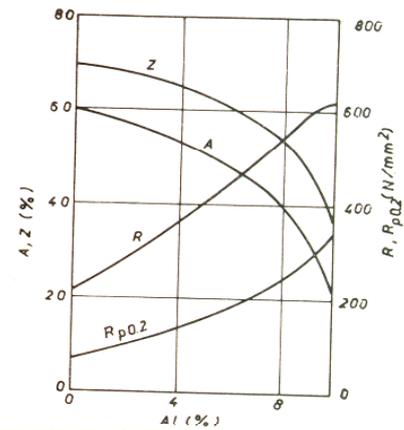
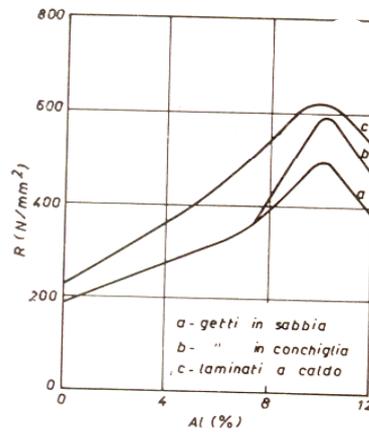


Cu-Al

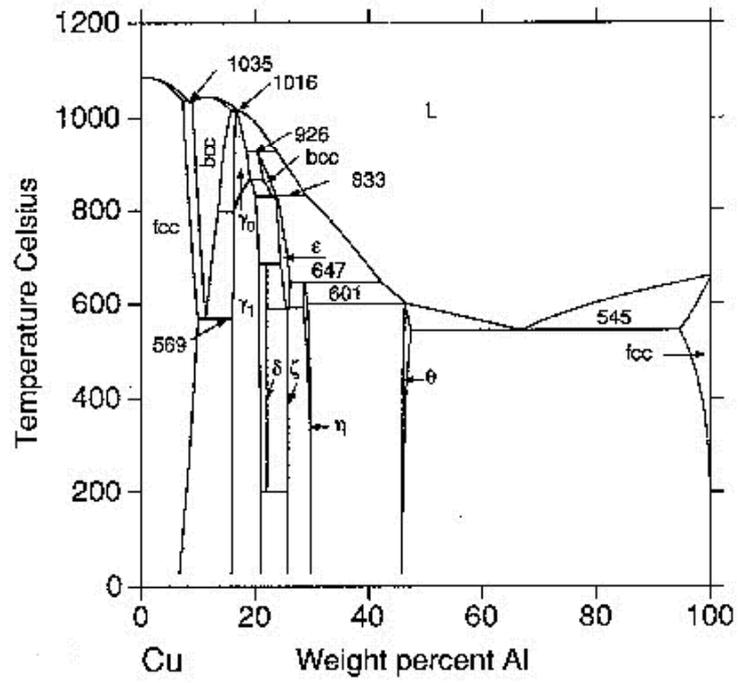


L'aggiunta di Al fino all'11% comporta un aumento fortissimo della durezza e della resistenza meccanica. Possono essere utilizzate sia allo stato di getto che dopo lavorazione plastica. Sopra il 10% di Al appare la fase γ dura ma fragilissima

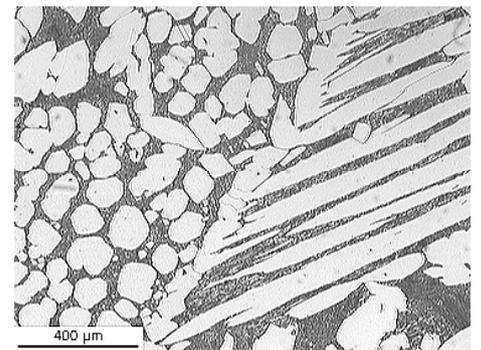
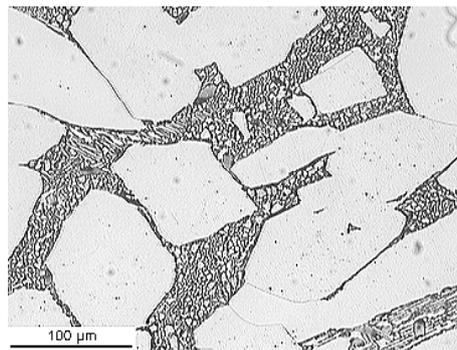
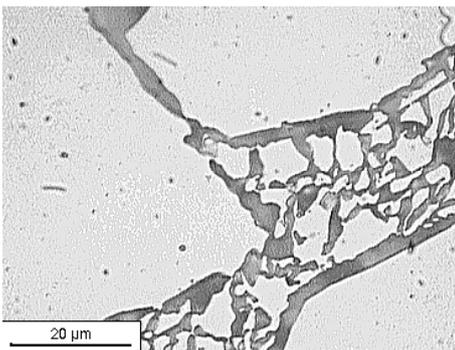
Sono caratterizzati da una elevata resistenza alla ossidazione e da una buona resistenza meccanica a caldo (fino oltre i 700°C)



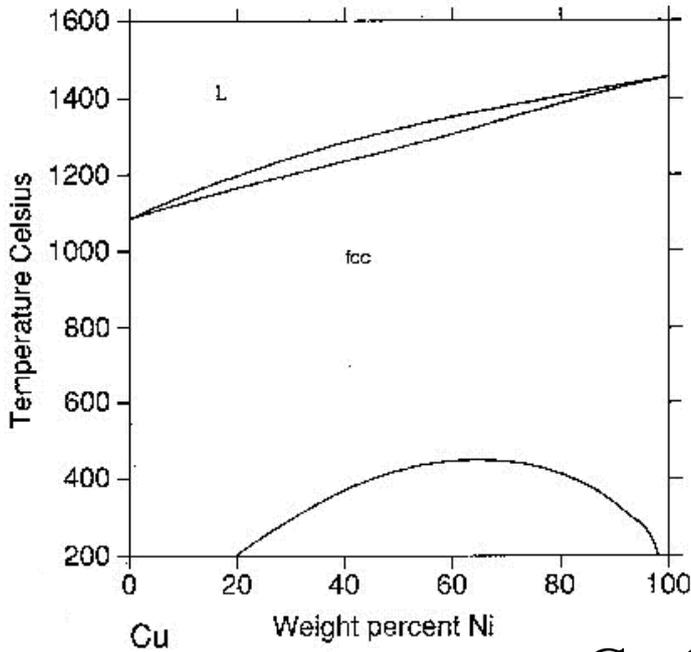
Cu-Al



Cu - 10% Al

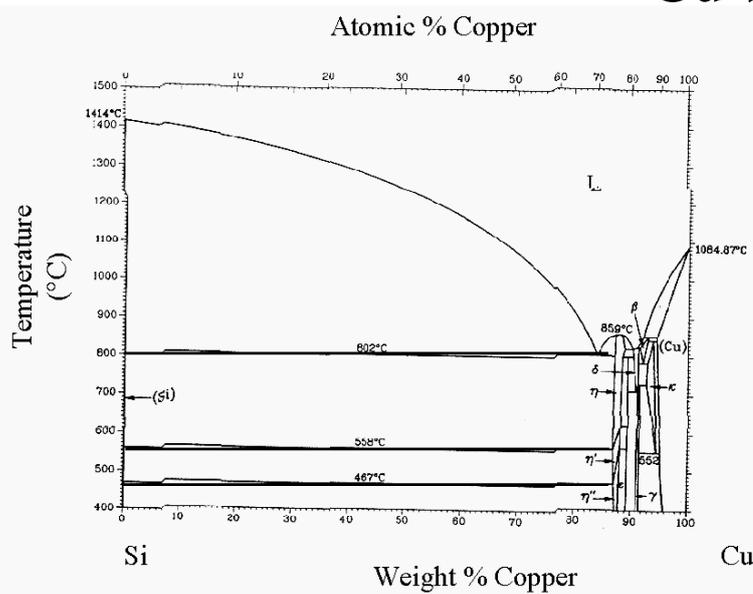


Cu-Ni

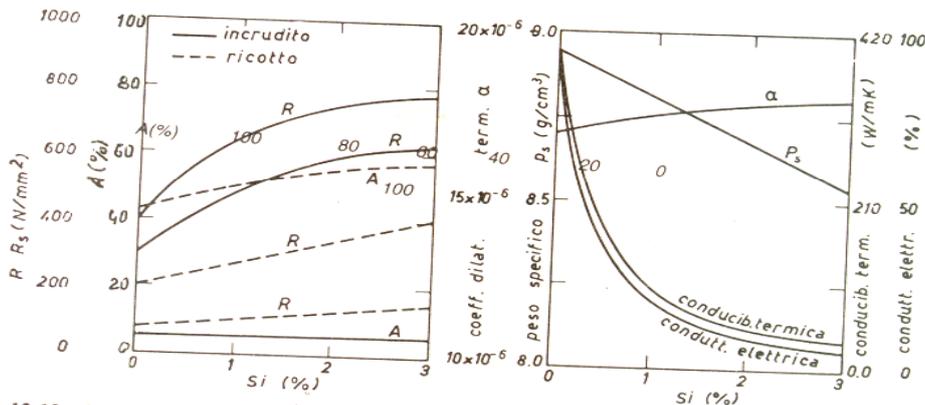


Denominate anche cupro-nichel (Ni < 30%), hanno una durezza ed un R_m che aumentano con il tenore di Ni, con la duttilità simile a quella del Cu e buona resistenza alla corrosione (specialmente in ambienti marini)

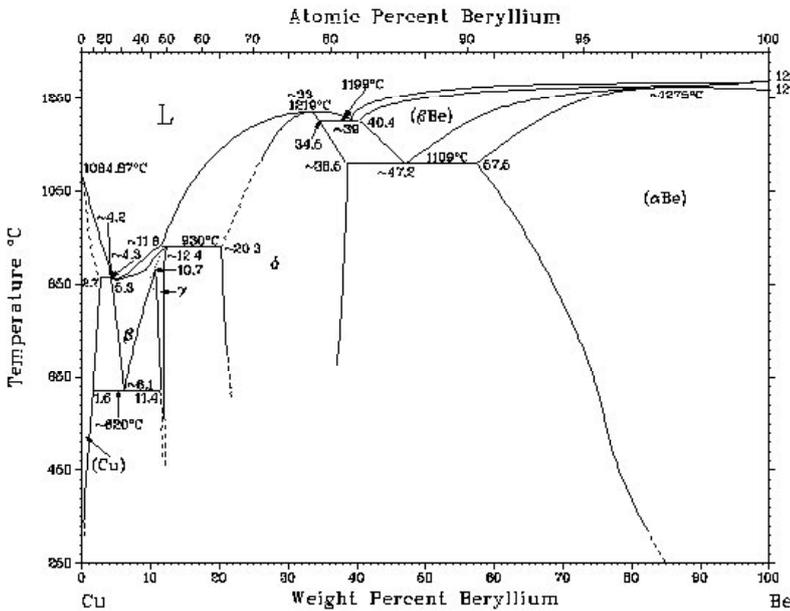
Cu-Si



Si usano solo leghe con un tenore massimo del 3,5% e, quindi, non sono possibili trattamenti termici. Le proprietà sono le stesse della soluzione solida α , ma con una enorme capacità di incrudimento per lavorazione a freddo



Cu-Be

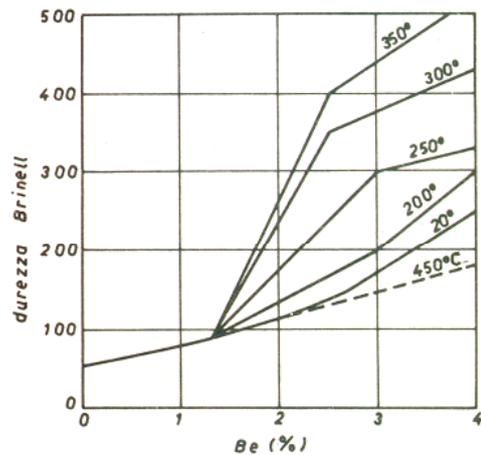


E' possibile raggiungere elevatissime caratteristiche meccaniche (le maggiori raggiungibili con leghe di Cu). Be = 2-3%

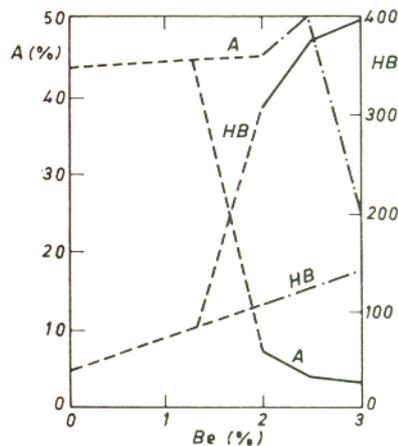
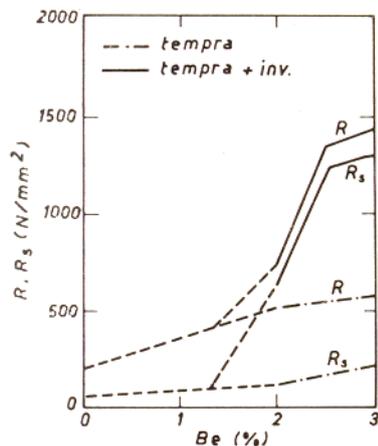
Tali caratteristiche si ottengono mediante tempra (ottenendo la soluzione solida α sovrasatura, duttile e malleabile) seguita da un rinvenimento con precipitazione dispersa della fase γ

Il ciclo di lavorazione dei bronzi al Be è il seguente:

- tempra di soluzione
- lavorazione a freddo (trafilatura, laminazione...)
- invecchiamento artificiale



Influenza della temperatura di invecchiamento sulla durezza



Leghe industriali di Cu

- OTTONE: lega Cu-Zn (Cu > 50%) con altri elementi a volte aggiunti
- BRONZO: lega Cu-Sn (Cu compreso fra 84 e 78%) con altri elementi a volte aggiunti (Zn, Pb, Ni, allora il Cu arriva fino al 65%)
- Bronzi all'alluminio (CUPROALLUMINIO), Bronzi al berillio, Bronzi al silicio

Si parlerà quindi di:

- Ottoni comuni
- Bronzi comuni e speciali
- Bronzi all'alluminio (Cuproalluminio)
- Bronzi al nichel (Cupronichel)
- Leghe speciali del rame

Ottoni comuni

<i>Cu</i>	<i>Zn</i>	<i>Altri</i>	R_m [MPa]	<i>A%</i>	<i>HB</i>
58	40	<1,6	550	5	140
			380	25	90
67	33	<0,4	460	10	145
			260	25	48
90	10	<0,3	260	45	50
			420	5	120

Bronzi per getti

<i>Cu</i>	<i>Sn</i>	<i>Altri</i>	R_m [MPa]	A%	<i>HB</i>
88	12	---	260	9	85
80	10	<i>Pb=10</i>	200	9	65
88	10	<i>Zn=2</i>	260	13	75

Bronzi all'alluminio

<i>Cu</i>	<i>Al</i>	<i>Altri</i>	R_m [MPa]	A%	<i>HB</i>
93	5,5		340	45	80
			440	25	115
79	10		605	12	140
			685	10	170

Bronzi al nichel

<i>Cu</i>	<i>Ni</i>	<i>Altri</i>	R_m [MPa]	A%
89	10	<i>Fe=1,3</i>	300	30
68	31	<i>Mn=1</i>	380	35

Leghe speciali del rame

<i>Cu</i>	<i>Altri</i>
96	<i>Si=3; Mn=1</i>
97	<i>Si=0,7; Ni=2</i>
98	<i>Be=2</i>

Leghe di Pb

$$T_f = 325^\circ\text{C}$$

$$R_m = 14 \text{ MPa} \quad (\text{getti})$$

$$R_s = 10 \text{ MPa} \quad (\text{getti})$$

$$A\% = 40 \quad (\text{getti})$$

$$\text{HB} = 4 \quad (\text{getti})$$

$$R_m = 19 \text{ MPa} \quad (\text{lamiere})$$

$$R_s = 12 \text{ MPa} \quad (\text{lamiere})$$

$$A\% = 50 \quad (\text{lamiere})$$

$$E = 17 \text{ GPa}$$

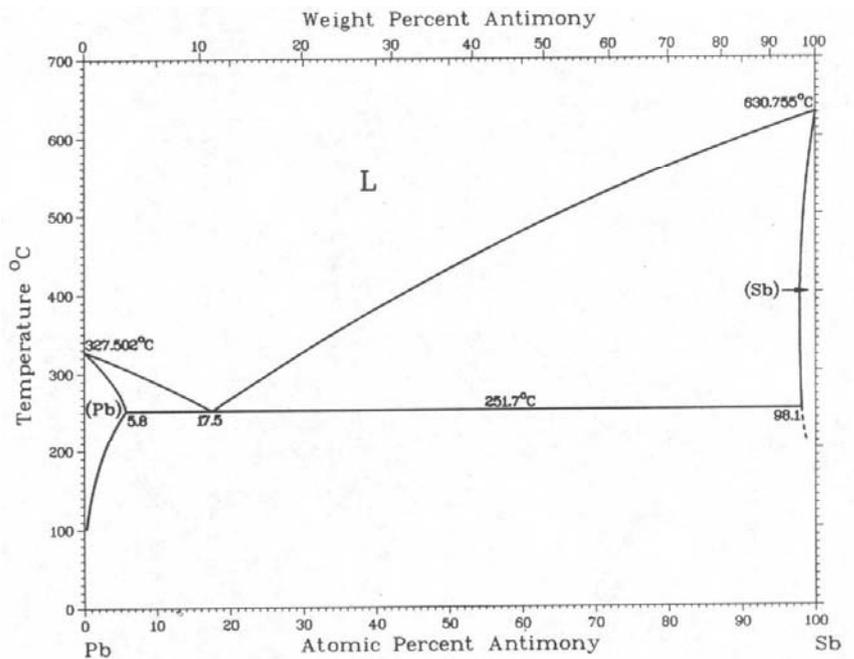
Date le sue pessime proprietà meccaniche, non migliorabili sensibilmente mediante trattamenti termici, in quanto la sua temperatura di ricristallizzazione è inferiore alla temperatura ambiente, ma solo mediante aggiunte di elementi di lega quali ad esempio il Ca, trova impieghi grazie a:

- Peso specifico elevato;
- Elevata resistenza alla corrosione;
- Elevata resistenza alla penetrazione di radiazioni;
- Elevata lavorabilità
- Costo ridotto

Pb-Sb

Hanno caratteristiche simili al Pb puro, ma con una resistenza superiore

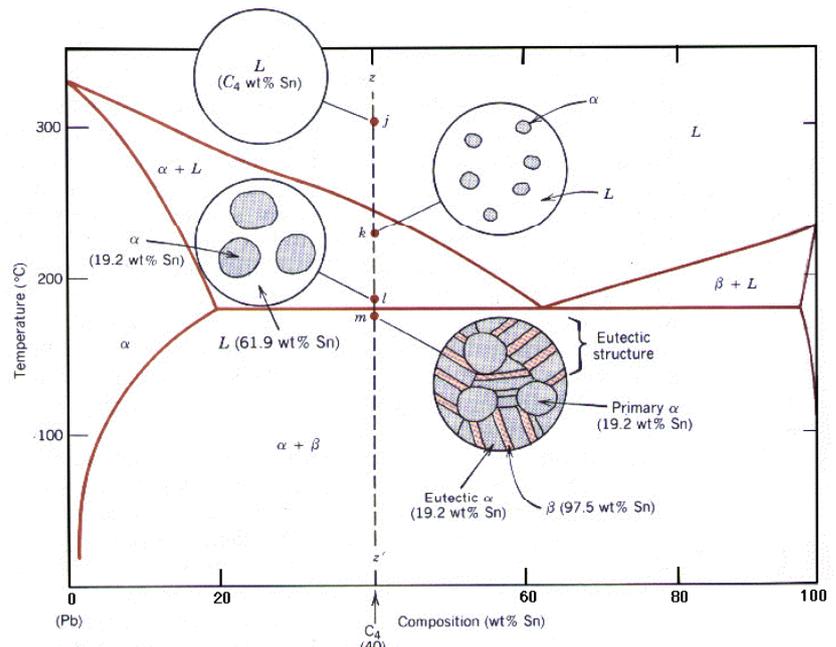
Pb	Sb	Sn	R_m [MPa]
99	1	---	21
96	4	---	28
94	6	---	29
92	8	---	33
91	9	---	53



Pb-Sn

L'applicazione tipica di queste leghe è per la saldatura. Da sottolineare l'importanza della lega eutettica col 63% di Sn che fonde a 183°C

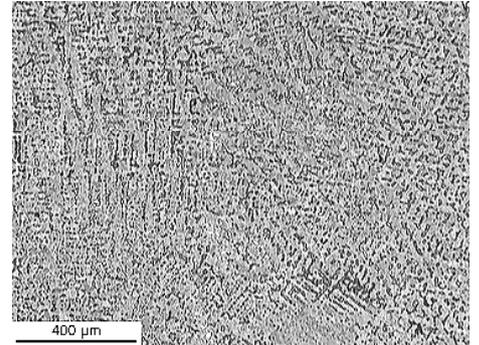
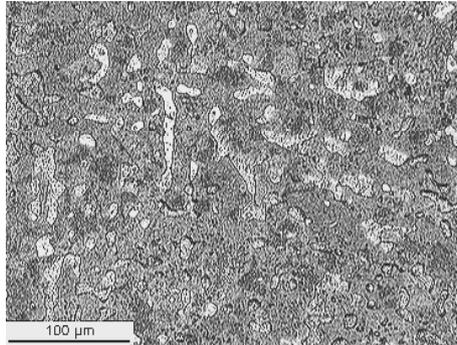
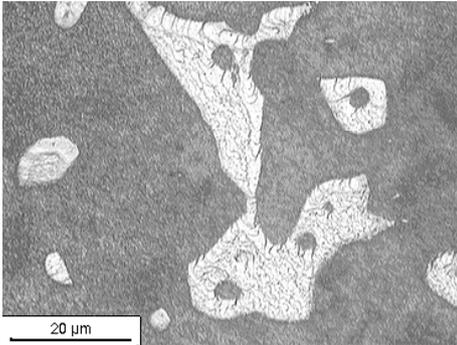
Pb	Sb	Sn	R_m [MPa]
95	---	5	24
80	---	20	41
37	---	63	53
30	---	70	48



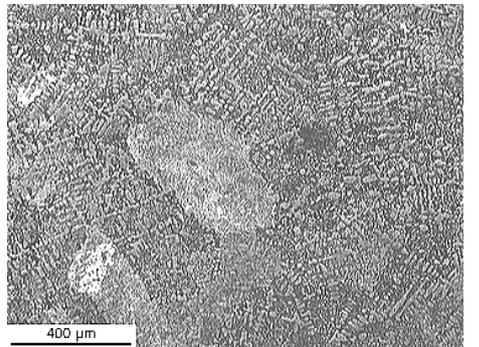
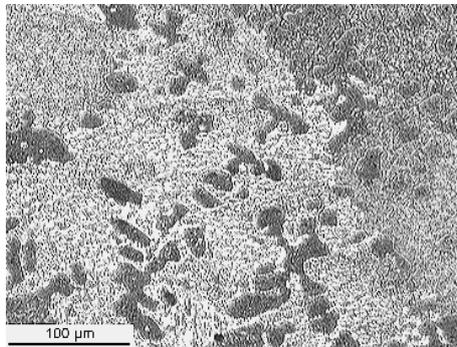
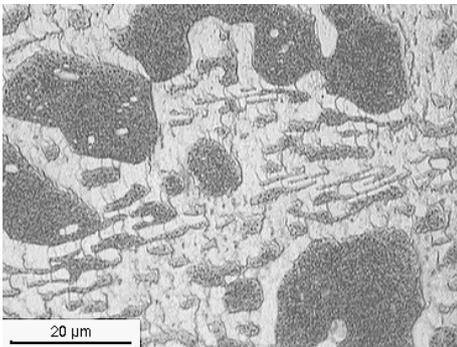
Pb-Sb-Sn o leghe antifrizione

Pb	Sb	Sn	R_m [MPa]	A%	Particolarmente adatte per cuscinetti molto carichi e resistono bene anche a temperature relativamente elevate ($T < 150^\circ\text{C}$)
85	10	5	70	5	
75	15	10	70	4	
83	13	1	70	1,5	

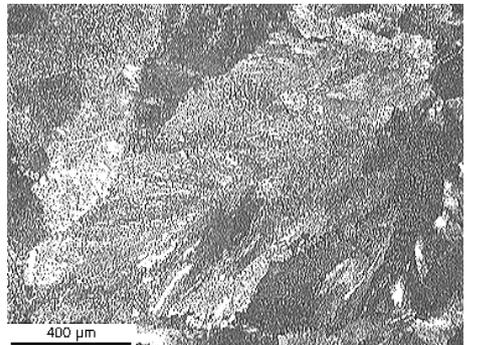
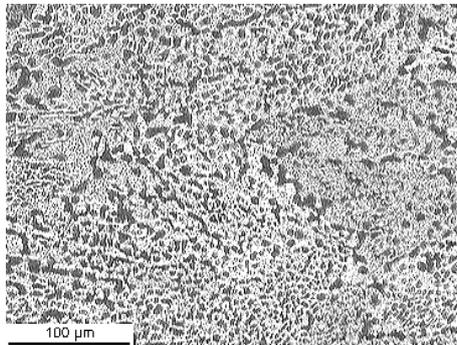
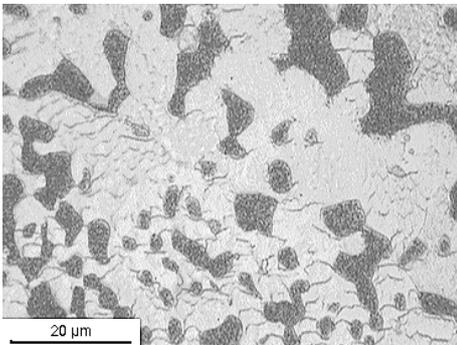
Pb – 20% Sn



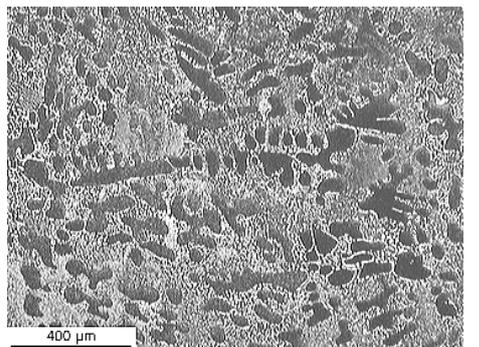
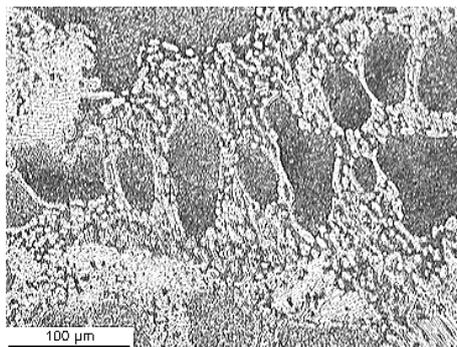
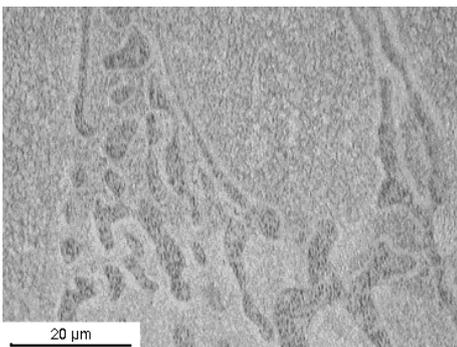
Pb – 50% Sn



Pb – 62% Sn (eutectico)

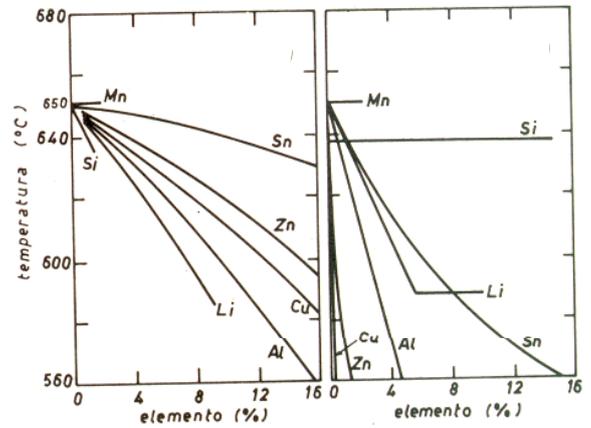


Pb – 80% Sn

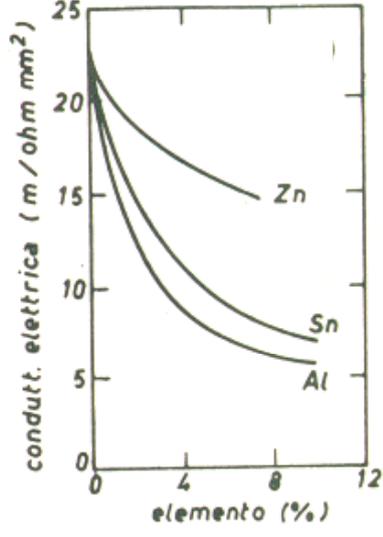
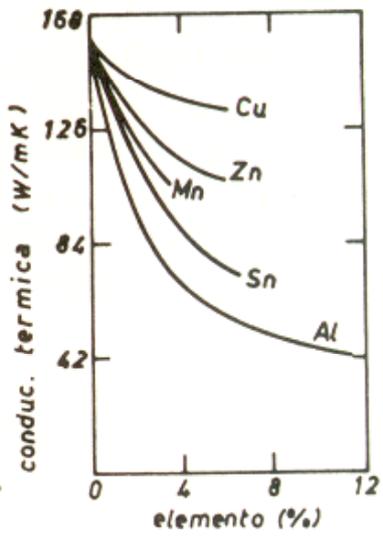
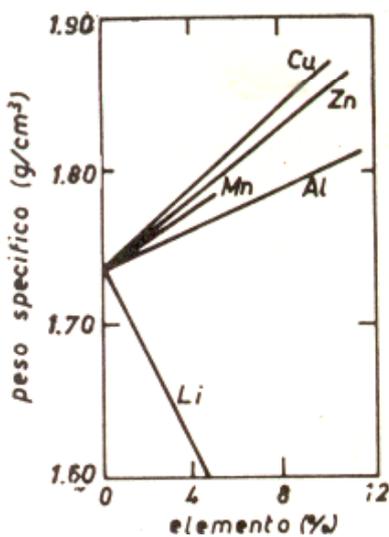


Leghe di Mg

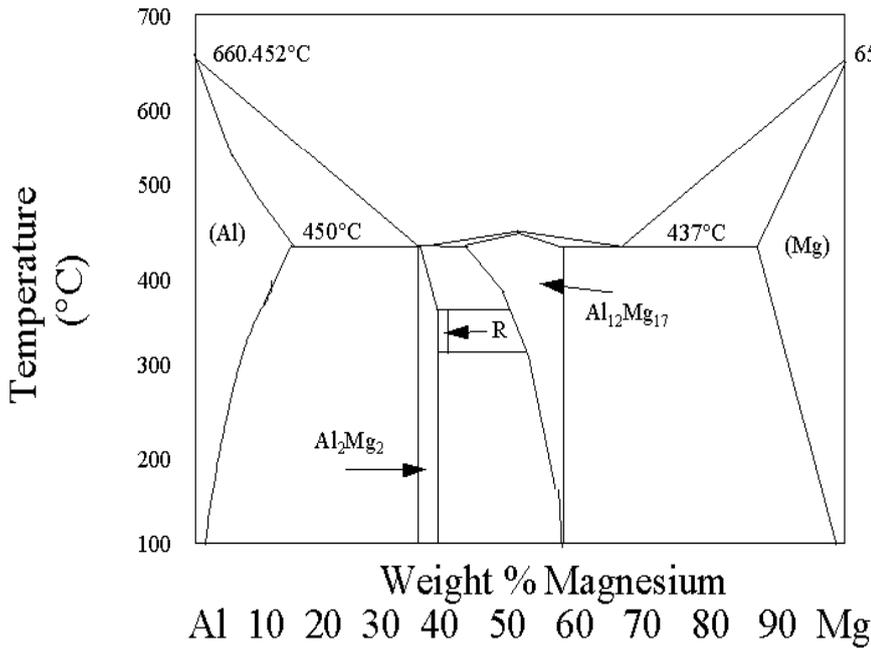
$T_f = 650^\circ\text{C}$
 $R_m = 190 \text{ MPa}$ (ricotto)
 $R_{p0.2} = 98 \text{ MPa}$ (ricotto)
 $A\% = 21$ (ricotto)
 $HB = 40$ (ricotto)
 $R_m = 260 \text{ MPa}$ (incrudito)
 $R_{p0.2} = 190 \text{ MPa}$ (incrudito)
 $A\% = 10$ (incrudito)
 $HB = 50$ (incrudito)
 $E = 45 \text{ GPa}$



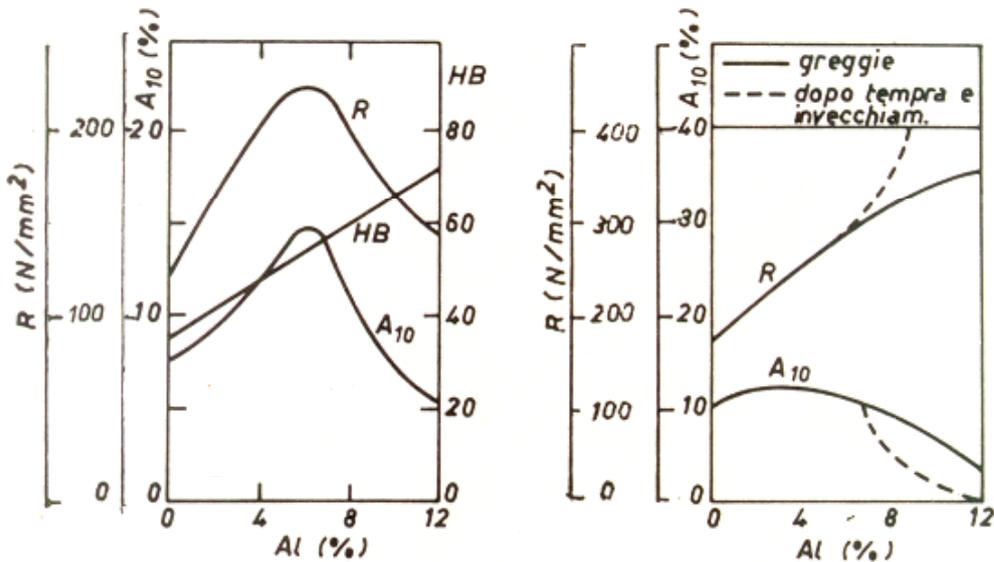
Linee di liquidus e di solidus per alcune leghe binare



Mg-Al

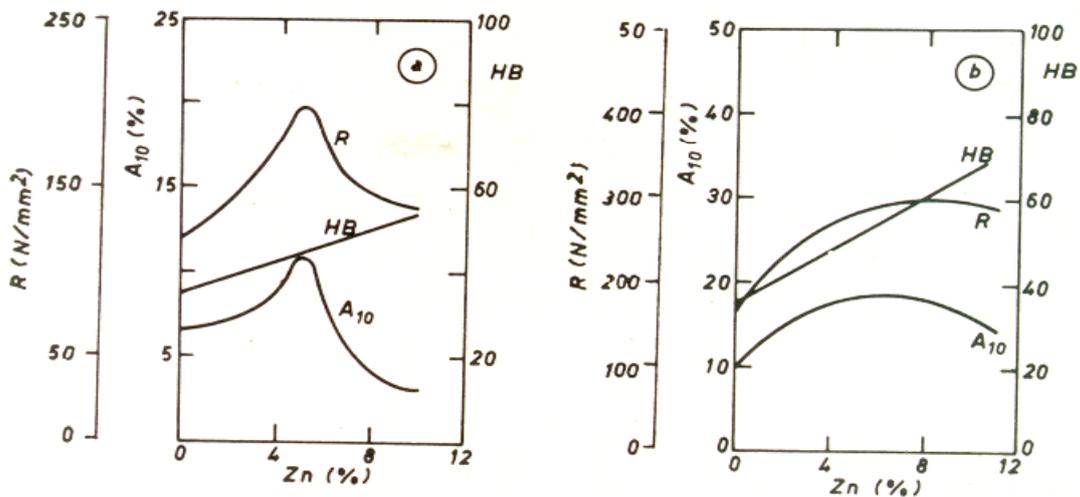


L'Al migliora la resistenza alla corrosione atmosferica. Le proprietà meccaniche sono scarse, ma il bassissimo peso specifico fa sì che numerose siano le applicazioni.



Caratteristiche meccaniche delle leghe Mg-Al

Mg-Zn



Sulle caratteristiche meccaniche delle leghe di Mg, lo Zn ha una influenza simile all'Al. Come per le leghe con l'Al, anche per quelle con lo Zn è possibile un trattamento di tempra di soluzione e di invecchiamento

Leghe industriali di Mg

SI sono affermate grazie al loro bassissimo peso specifico in campo aerospaziale ed automobilistico

I trattamenti termici tipici sono:

- Tempra di soluzione (riscaldamento a 400-420°C seguito da un raffreddamento in aria).
- Invecchiamento artificiale (rinvenimento a 130-200°C seguito da un raffreddamento in aria)

Al	Mn	Zn	Altri	R_m [MPa]	R_m [MPa]	HB
8,25	0,25	0,65	--	137	78	2
				225	78	6
				235	118	3
--	--	5,5	Zr=0,7	294	216	5
--	--	1,5	Zr=0,6	245	167	6

Leghe di Sn

$$T_f = 232^\circ\text{C}$$

$$R_m = 16 \text{ MPa} \quad (\text{ricotto})$$

$$R_s = 9 \text{ MPa} \quad (\text{ricotto})$$

$$A\% = 45 \quad (\text{ricotto})$$

$$R_m = 20 \text{ MPa} \quad (\text{incrudito})$$

$$R_s = 14 \text{ MPa} \quad (\text{incrudito})$$

$$A\% = 35 \quad (\text{incrudito})$$

$$E = 18 \text{ GPa}$$

E' caratterizzato da una notevole resistenza alla corrosione atmosferica, agli acidi organici ed ad altri agenti corrosivi;

Ha una notevole deformabilità e malleabilità a freddo

Sn-Sb-Cu o leghe antifrizione

<i>Sn</i>	<i>Sb</i>	<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>HB</i>
90	6,6	3,5	--	20
80	6,5	3,5	--	27
60	13	4	23	22

Leghe per saldatura

<i>Sn</i>	<i>Sb</i>	<i>Cu</i>	<i>Pb</i>	<i>Ag</i>
95	---	---	---	5
96	5	---	---	---
70	---	---	30	---

Leghe di Ni

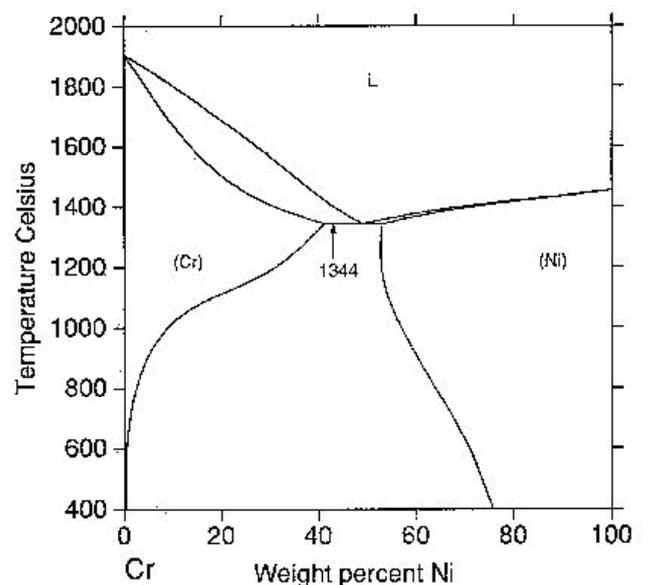
$T_f = 1455^\circ\text{C}$	
$R_m = 400 \text{ MPa}$	(ricotto)
$R_s = 120 \text{ MPa}$	(ricotto)
$A\% = 40$	(ricotto)
$HB = 100$	(ricotto)
$R_m = 1000 \text{ MPa}$	(incrudito)
$R_s = 900 \text{ MPa}$	(incrudito)
$A\% = 2$	(incrudito)
$HB = 260$	(incrudito)
$E = 210 \text{ GPa}$	

Caratterizzato da buone proprietà meccaniche, ha un'ottima resistenza alla corrosione in molte condizioni di attacco grazie alla formazione di una pellicola di ossido. Notevole è la sua lavorabilità a caldo ed a freddo e la sua saldabilità

Ni-Cr

Il Cr aumenta la resistenza alla corrosione in ambienti ossidanti, aumentando la resistività e rendendo alcune leghe Ni-Cr adatte per resistenze per forni

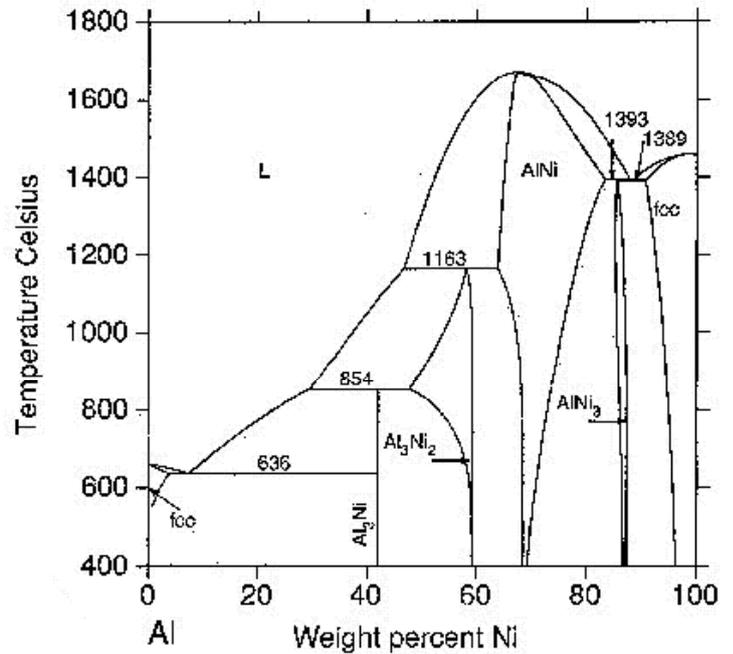
Ni	Cr	R_m [MPa]	A%
80	20	670	30



Ni-Al

L'Al migliora le caratteristiche meccaniche senza influire sulla resistenza alla corrosione, né sulla attitudine alla lavorazione.

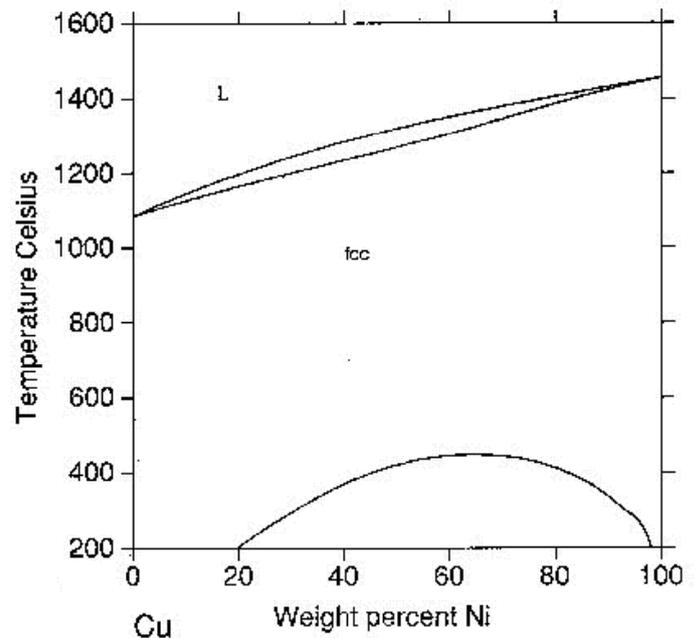
Ni	Al	R_m [MPa]	A%
94	4,5	850	25



Ni-Cu

Il Cu aumenta notevolmente la resistenza alla corrosione dando luogo al cosiddetto metallo Monel

Ni	Cu	Fe	R_m [MPa]	A%
67	30	1,5	600	50
66	29	0,9	850	25
63	32	1,5	550	35



Leghe di Ti

$$T_f = 1670^\circ\text{C}$$

$$R_m = 550 \text{ MPa}$$

$$R_s = 440 \text{ MPa}$$

$$A\% = 25$$

$$R_m = 850 \text{ MPa} \quad (\text{incrudito})$$

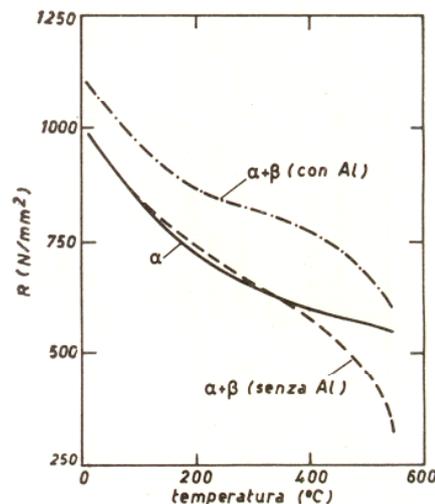
$$R_s = 800 \text{ MPa} \quad (\text{incrudito})$$

$$A\% = 7 \quad (\text{incrudito})$$

$$E = 109 \text{ GPa}$$

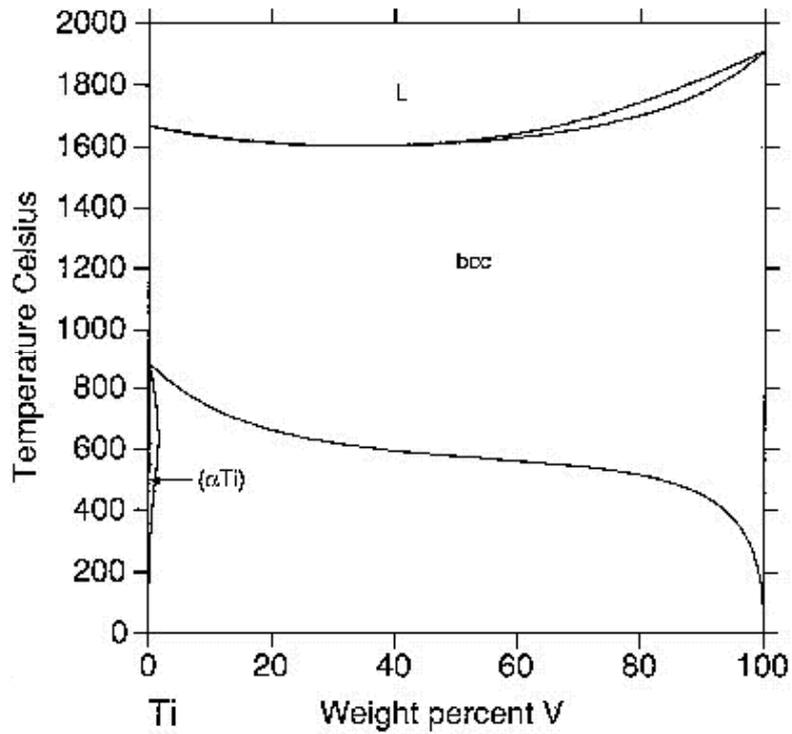
Il Ti ha notevoli proprietà meccaniche, specialmente considerando il basso peso specifico, che risultano molto interessanti anche ad elevata temperatura. Ha una resistenza alla corrosione paragonabile a quella dell'acciaio inossidabile AISI 302. Trova impiego sia nell'industria chimica che aeronautica.

I vari elementi di lega allargano o restringono il campo α , spostando la temperatura di transizione $\alpha \rightarrow \beta$

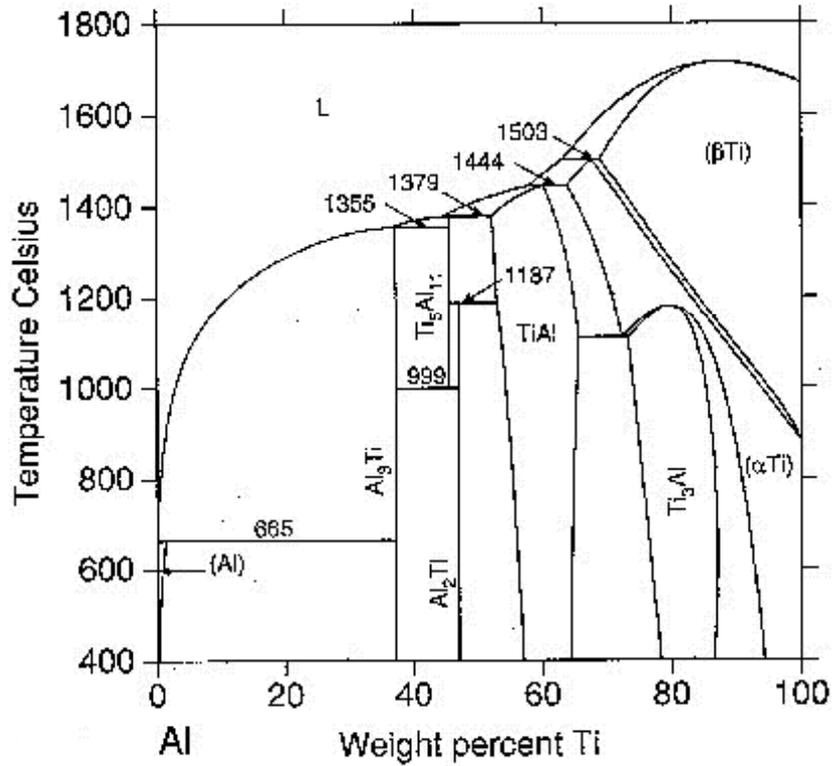


Influenza della temperatura di prova
su R_m per diverse microstrutture

Ti-V



Ti-Al



Le leghe di Ti vengono normalmente classificate in:

- Leghe *alfa*, con struttura identica a quella del Ti puro; queste leghe, che non possono essere indurite mediante trattamento termico, vengono utilizzate allo stato ricotto; hanno ottime proprietà meccaniche da temperature inferiori alla temperatura ambiente fino a 550°C
- Leghe *beta*, oggi poco usate
- Leghe *alfa-beta*, bifasiche, possono essere indurite mediante opportuni trattamenti termici seguiti da invecchiamento

Struttura	Al	V	Altri	R _m [MPa]	A%
<i>a</i>	---	---	Pd=0,2	350	35
<i>a</i>	5		Sn=2,5	900	12
$\alpha+\beta$	6	4	--	950	10
$\alpha+\beta$	6	4	Sn=2	1050	10

Leghe di Mo

$$T_f = 2610^\circ\text{C}$$

$$R_m = 420\text{-}500 \text{ MPa}$$

$$R_s = 280\text{-}350 \text{ MPa}$$

$$A\% = 30\text{-}20$$

$$\text{HB} = 160\text{-}220$$

$$E = 320\text{-}350 \text{ GPa}$$

Sono caratterizzate da elevati punti di fusione, elevata capacità di incrudimento e bassa sensibilità al rinvenimento. Il più grosso inconveniente è legato alla formazione di un ossido volatile al di sopra dei 500°C

