

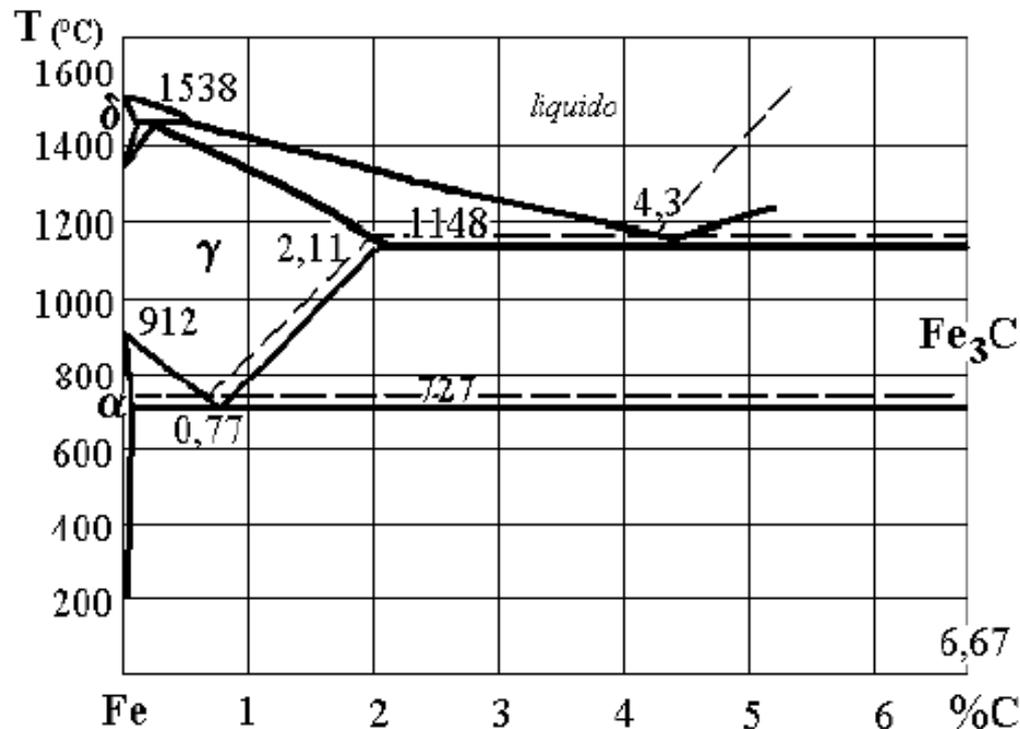
# FONDAMENTI DI TECNOLOGIA DEI MATERIALI

**PATRIZIA CINELLI**

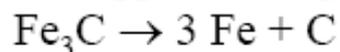
**LEZIONE V**

# Ghise

Sono leghe ferrose che durante la solidificazione formano, almeno in parte, l'eutettico ledeburitico



Il passaggio dal diagramma metastabile (linee continue) a quello stabile (linee tratteggiate) è legata alla decomposizione della cementite:



# FONDAMENTI DI TECNOLOGIA DEI MATERIALI

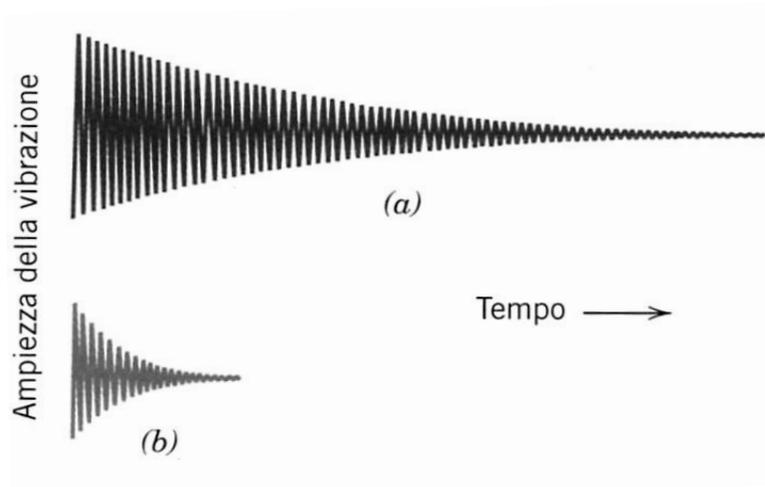
**PATRIZIA CINELLI**

**LEZIONE V**

## GHISE

Le ghise differiscono dagli acciai per:

1. Più alto contenuto in Carbonio che, all'equilibrio, è sotto forma di grafite
2. Migliore colabilità
3. Maggiore economicità
4. Minore deformabilità plastica



5. Maggiore capacità di smorzamento delle vibrazioni.

In figura il confronto tra:

- a) Acciaio b) Ghisa

# TIPI DI GHISA

- ❖ **GHISA di 1<sup>a</sup> fusione** : si ottiene dall'altoforno e contiene elevate percentuali di carbonio ( %C da 4 a 6 % )
- ❖ **GHISA di 2<sup>a</sup> fusione** : si ottiene rifondendo in apposito forno , la ghisa di prima fusione , con aggiunta di rottami di ferro ed altri elementi ; si possono ottenere vari tipi ghisa

**GHISA BIANCA** : il carbonio è sotto forma di Cementite  $Fe_3C$

**GHISA LAMELLARE** : il carbonio è sotto forma di Grafite Lamellare

**GHISA SFEROIDALE** : il carbonio è sotto forma di Grafite Sferoidale

# CLASSIFICAZIONE DELLE GHISE

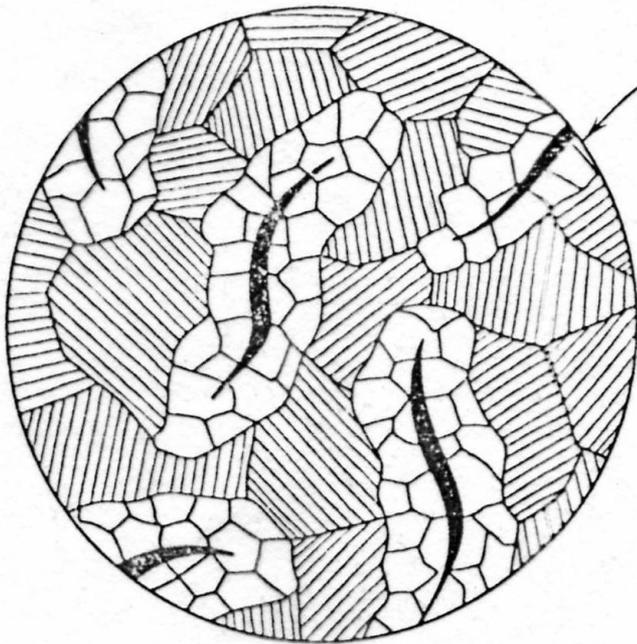
In base al modo in cui si presenta il carbonio, le ghise possono essere divise in :

- Ghise bianche : il carbonio è sotto forma di cementite  $\text{Fe}_3\text{C}$
- Ghise grigie : il carbonio è sotto forma di grafite lamellare o sferoidale
- Ghise malleabili : il carbonio si presenta sotto forma di “ fiocchi “

Fisicamente le ghise possono essere distinte due classi in funzione dell'aspetto della superficie di frattura:

**Ghisa bianca:** quando il C è rimasto combinato nella cementite per la velocità di raffreddamento relativamente elevata. La struttura è quindi costituita da perlite e cementite con caratteristiche meccaniche di alta durezza e fragilità.

**Ghisa grigia:** il C ha potuto nucleare come grafite che assume un aspetto lamellare.



ferrite

La struttura è costituita, come in figura, da lamelle di grafite circondate da grani di *ferrite* e grani di *perlite*.

Solo con un raffreddamento molto lento si può ottenere una struttura completamente ferritica

La presenza delle lamelle di grafite rende la ghisa fragile e praticamente senza deformazione plastica, soprattutto a trazione.

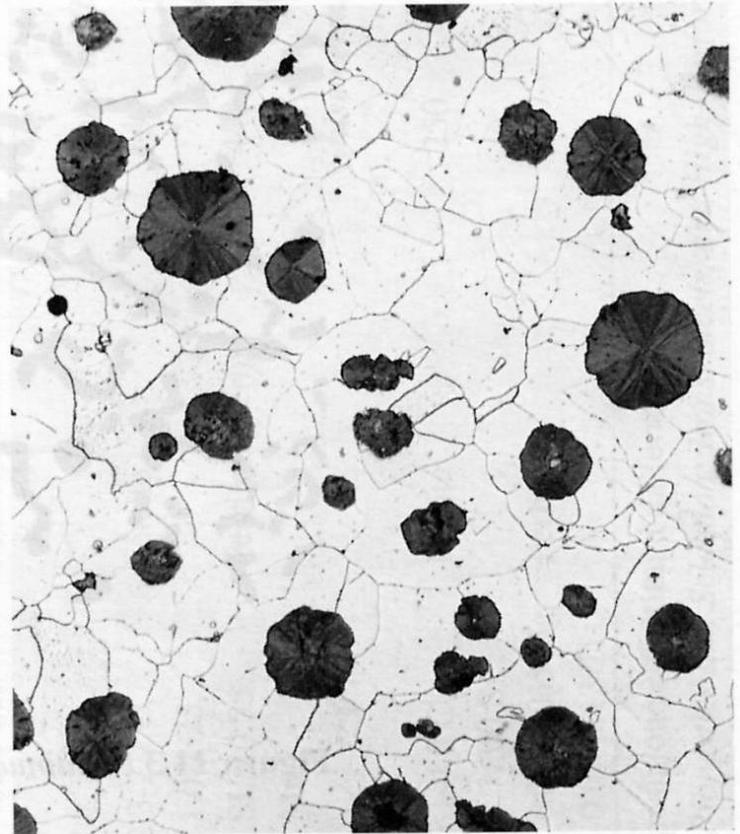
Si sono quindi trovati dei trattamenti per rendere gli aggregati di grafite di forma sferoidale

Tipo	Rottura MPa	Snervamento MPa	Allungamento %
Grigia	100	---	
Malleabile	350	--	4
Sferoidale o duttile	370	230	17
Acciaio base	320	200	12



(a)

a) Grigia lamellare



(b)

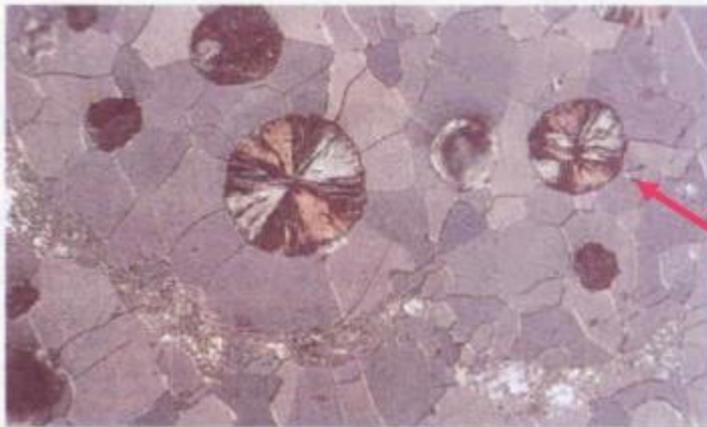
b) Sferoidale (duttile)

# MICROGRAFIE DELLA GHISA



## ● GHISA LAMELLARE

Nota le lamelle di grafite



## ● GHISA SFEROIDALE

Nota le sfere di grafite

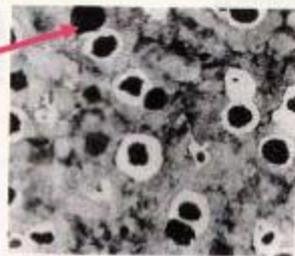
# MICROGRAFIA DELLA GHISA

**Figura 29**  
*Microstruttura della ghisa bianca.*

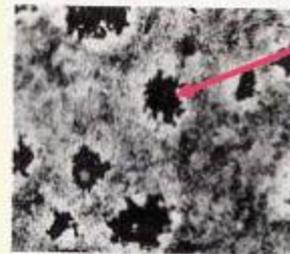


**Figura 30**  
*Microstruttura della ghisa grigia lamellari*

Sfere di grafite



**Figura 31**  
*Microstruttura della ghisa sferoidale.*



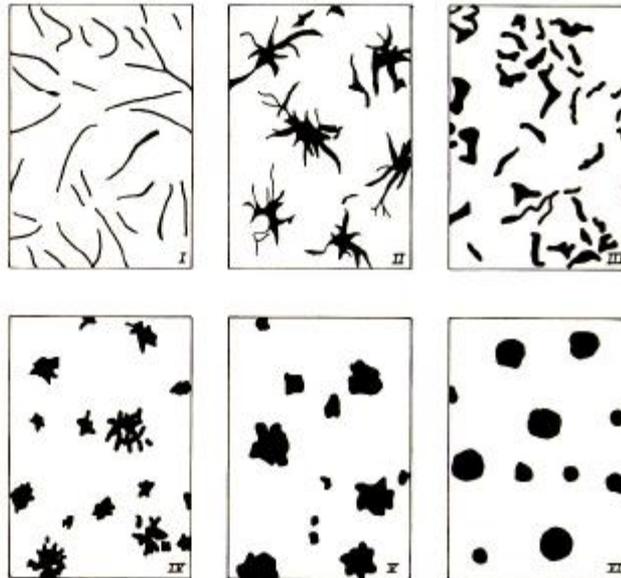
**Figura 32**  
*Microstruttura della ghisa malleabile.*

Fiocchi di grafite



## Forma degli elementi di grafite

- I) Lamelle sottili con punte aguzze
- II) Noduli con accentuate ramificazioni di lamelle
- III) Lamelle spesse con punte arrotondate
- IV) Flocculi frastagliati
- V) Flocculi compatti
- VI) Noduli a contorno circolare, quasi regolare (sferoidi)



Due sono i modi per migliorare le caratteristiche meccaniche delle ghise:

- uno termico che porta alle ghise malleabili.
- uno chimico per ottenere le ghise duttili o sferoidali.

*Le ghise malleabili si ottengono a partire da ghisa bianca facendo decomporre la cementite mantenendo il pezzo ad alta temperatura*

Il getto viene riscaldato e un mantenuto ad una temperatura di circa 1000°C con lo scopo di austenitizzare la matrice e di sciogliere in parte la cementite secondaria.

Raggiunto lo stato di equilibrio tra austenite e cementite, si ha la decomposizione della cementite in ferro  $\gamma$  e carbonio con la precipitazione di nuclei di grafite. Questo in quanto la solubilità del carbonio nell'austenite del diagramma stabile Fe-C è minore rispetto a quella del diagramma metastabile Fe-Fe<sub>3</sub>C.

La ghisa sferoidale è un particolare tipo di ghisa in cui il carbonio (o meglio, la grafite) si presenta all'interno della struttura sotto forma di noduli a forma di sferoidi

*Le ghise duttili o sferoidali si ottengono direttamente dal fuso per aggiunta di particolari elementi nodulizzanti.*

Il processo produttivo inizia con la desolforazione del metallo liquido (lo zolfo inibisce la formazione degli sferoidi)

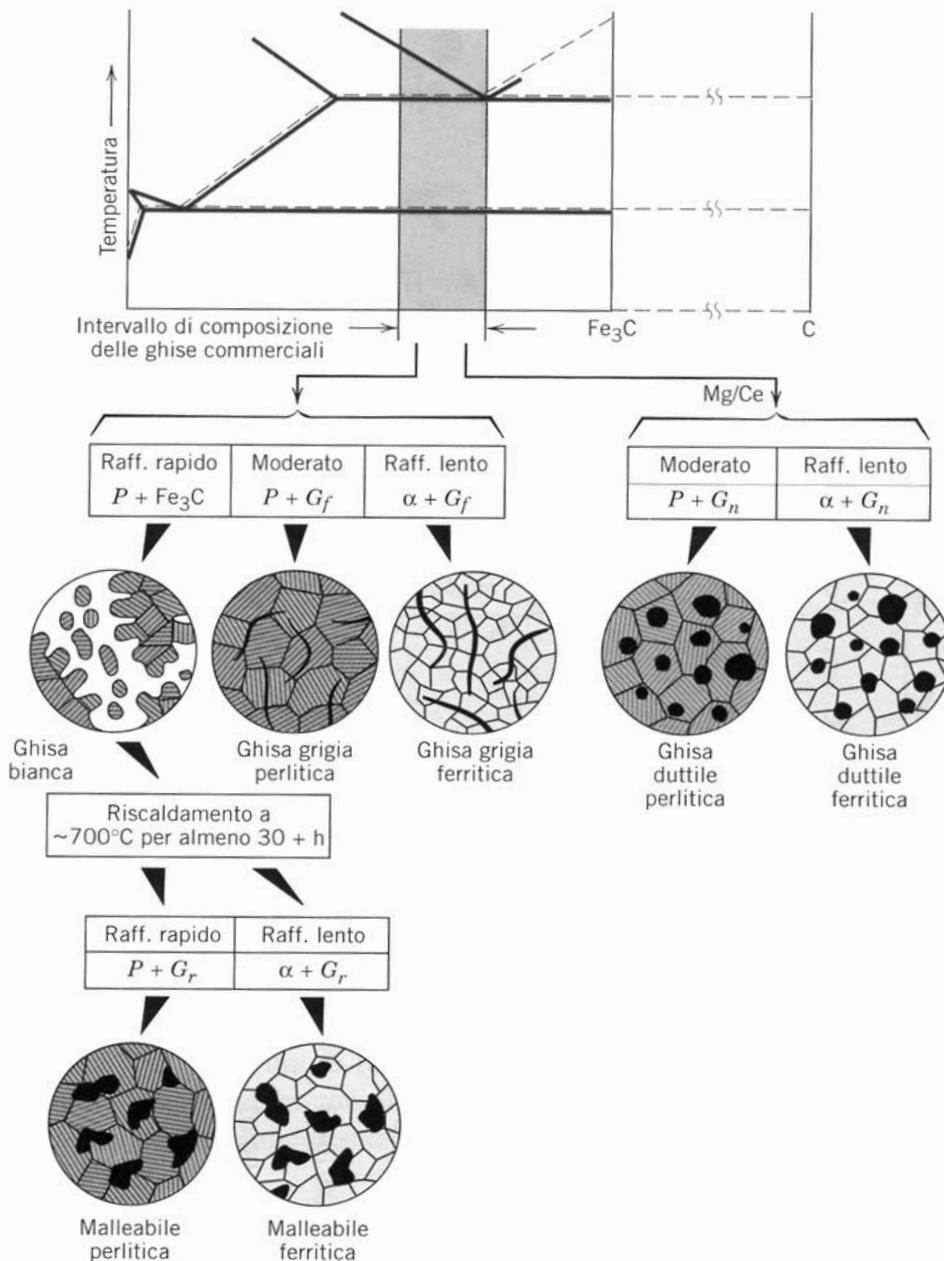
La ghisa desolforata viene quindi sottoposta al trattamento con opportuni agenti “nodulizzatori”, come, ad esempio, Magnesio, Cerio o Ittrio che rendono possibile una formazione di grafite a forma di sferoidi.

La particolare struttura sferoidale porta numerosi vantaggi in termini di caratteristiche meccaniche del materiale.

La forma sferica infatti riduce le concentrazioni di tensione interne al materiale e, essendo la forma che a parità di volume offre la minore superficie, è quella che meno danneggia la matrice metallica, consentendo di ottenere caratteristiche superiori rispetto a quelle della ghisa lamellare.

Inoltre, i noduli costituiscono un punto di arresto alla propagazione di cricche, a differenza di quanto avviene nella ghisa lamellare dove invece le lamelle offrono una direzione di propagazione privilegiata per le cricche di rottura.

Da ultimo, la ghisa sferoidale è l'unica ghisa ad essere duttile ossia ad essere in grado di sostenere deformazioni plastiche.



In figura sono riassunti i processi che portano alle varie strutture delle ghise

# PROPRIETA' DELLA GHISA

- Elevata durezza
- Resistenza all'usura ed all'ossidazione
- Elevata resistenza a compressione
- Ottima colabilità
- Elevata fragilità
- Bassa resilienza
- Non può subire lavorazioni plastiche
- Può essere lavorata alle M.U.

# PROPRIETA' DELLA GHISA

Temp . di fusione	1300 °C
Resistenza a trazione	100-800 N/mm <sup>2</sup>
Resistenza a compres.	400-900 N/mm <sup>2</sup>
Durezza Brinnell	150-400 HB
Allungamento a rottura	nullo
Resilienza	bassa

# Ghisa grigia a grafite sferoidale UNI 4544-79

- Tale ghisa grigia ha la caratteristica di avere la grafite in forma sferoidale che determina capacità di deformazione plastica, anche se minima. Data la sua tenacità e resistenza all'usura è adatta a produrre ruote dentate, guide di macchine utensili e bielle per motori.
- La designazione inizia con le lettere GS (Ghisa Sferoidale) seguita da un primo numero che rappresenta il carico mi-nimo garantito alla rottura per trazione, e un secondo nu-mero che rappresenta il valore della deformazione plastica che può subire
- **GS 400-12**  
ghisa sferoidale (GS) con carico di rottura minimo garantito di 400 N/mm<sup>2</sup> e allungamento percentuale A pari al 12%.
- **GS 600-2**  
ghisa sferoidale (GS) con carico di rottura minimo garantito di 600 N/mm<sup>2</sup> e allungamento percentuale A pari 2 %

# Ghisa grigia per getti ordinari UNI 5007-69

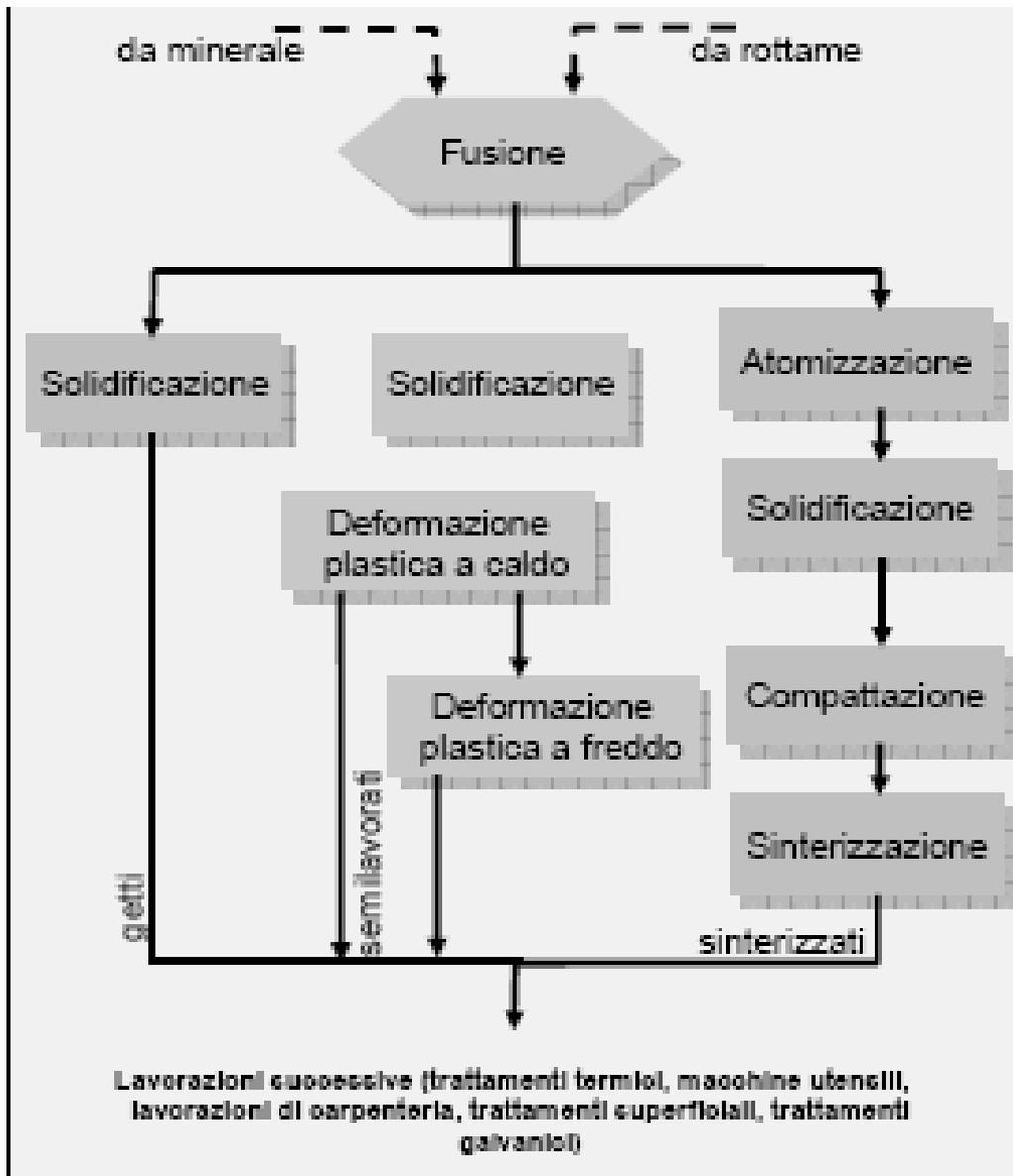
- E' una ghisa grigia, di largo impiego , avente le seguenti caratteristiche
  - la sezione di frattura di colore grigio per la presenza di grafite in forma lamellare;
  - non è soggetta a deformazione plastica;
  - è in grado di assorbire le vibrazioni.
- Per tali caratteristiche serve nella produzione di basamenti di macchine utensili, scatole per riduttori e cambi. La designazione inizia con la lettera G (Ghisa) seguita da un numero che rappresenta il carico minimo garantito alla rottura per trazione.
- **G 100**  
ghisa grigia (G) con carico di rottura minimo garantito di 100 N/mm<sup>2</sup>.
- **G 245**  
ghisa grigia (G) con carico di rottura minimo garantito di 245 N/mm<sup>2</sup>.

# Ghisa grigia non legata per uso automobilistico UNI 5330-69

- La ghisa grigia non legata serve nella produzione di parti di motori a combustione interna come i cilindri e organi soggetti a sbalzi di temperatura.
- La designazione inizia con le lettere Gh (Ghisa hard-ness = durezza) seguite da un numero che rappresenta la durezza Brinell minima garantita.
- **Gh 130**  
ghisa per uso automobilistico (Gh) con durezza Brinell minima garantita pari a 130 punti.
- **Gh 210**  
ghisa per uso automobilistico (Gh) con durezza Brinell minima garantita pari a 210 punti.

# Ghise malleabili UNI 3779-69

- Le ghise malleabili sono molto simili all'acciaio e sono impiegate nella produzione di manicotti e raccordi di tubazioni per acqua, alberi a gomito per motori a combustione interna etc. Sono ottenute con due processi particolari, quello europeo e quello americano.
- Il processo europeo ha lo scopo di decarburare la ghisa privandola di carbonio, cosicché la sezione di frattura risulti di colore bianco. Le ghise ottenute con il processo europeo si dicono ghise malleabili bianche.
- Il processo americano ha lo scopo di decomporre il carburo di ferro della ghisa di partenza, in grafite. La sezione di frattura risultante sarà di colore nero. Le ghise ottenute con il processo americano, si dicono ghise malleabili nere.
  
- **GMB 450**  
ghisa malleabile a cuore bianco con carico di rottura minimo garantito di 450 N/mm<sup>2</sup>.
  
- **GMN 350**  
ghisa malleabile a cuore nero con carico di rottura minimo garantito di 350 N/mm<sup>2</sup>.



# Ciclo di formatura dei metalli

# Produzione dell'acciaio

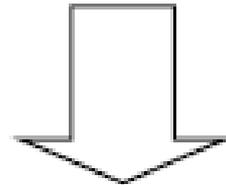
- Le *bramme* sono prodotti di sezione rettangolare, ottenuti o dalla laminazione dei lingotti colati o dalla colata continua.
- Le *billette* e i *blumi* sono prodotti di forma quadrata o rettangolare, ottenuti o dalla laminazione dei lingotti colati o dalla colata continua. I blumi, rispetto alle billette, hanno una sezione maggiore. Blumi e billette sono in genere utilizzati per la realizzazione di prodotti laminati a caldo lunghi.

# Processo produttivo dell'acciaio

- Fonderia:
  - Metallo fuso
  - Solidificazione in stampi dei getti
  - Lavorazione di finitura superficiale del prodotto intermedio

# Processo produttivo dell'acciaio

- **Solidificazione e successiva deformazione**
  - Deformazione del semilavorato a caldo o a freddo



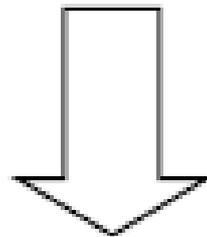
Diverse proprietà meccaniche

# Laminazione a caldo

- Processo di deformazione plastica effettuato a circa 1200-1300 °C
- Necessario per cambiare forma al semilavorato derivante da lingotto o dalla laminazione continua
- Treno di laminazione composto da cilindri sagomati
- Ottenimento di numerose tipologie di prodotti per uso strutturale (tondo per ca)

# Processo produttivo dell'acciaio

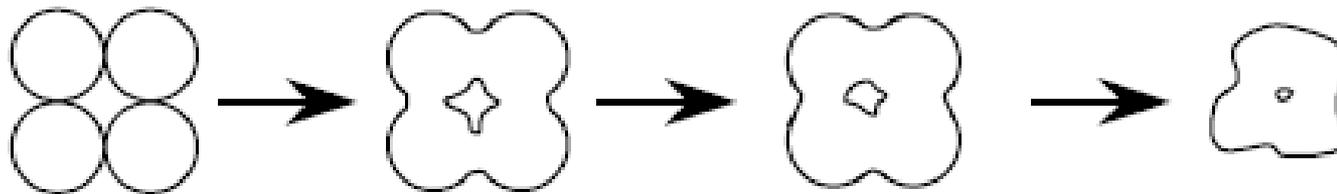
- Metallurgia delle polveri: sinterizzazione
  - Il metallo liquido viene atomizzato in particelle dal diametro controllato
  - Compattazione delle polveri



Minore difettosità e maggiori costi

## Metallurgia delle polveri

Questa tecnica permette la fabbricazione a basso costo di pezzi, anche molto complicati, da leghe a bassa duttilità o con punti di fusione molto alti. Si sfrutta la compattazione e successiva sinterizzazione in forno di polveri della lega di partenza fino a raggiungere pezzi a bassa porosità o nulla se si utilizza l'aiuto di una pressione applicata durante la cottura in forno (pressatura a caldo). In genere senza l'aiuto della pressatura a caldo si raggiungono comunque densità superiori al 95 % che corrispondono ad avere delle proprietà meccaniche superiori al 90 % di quelle del completamente denso. La sinterizzazione è il processo di riduzione dell'area superficiale che si attua durante il trattamento termico ad alte temperature.



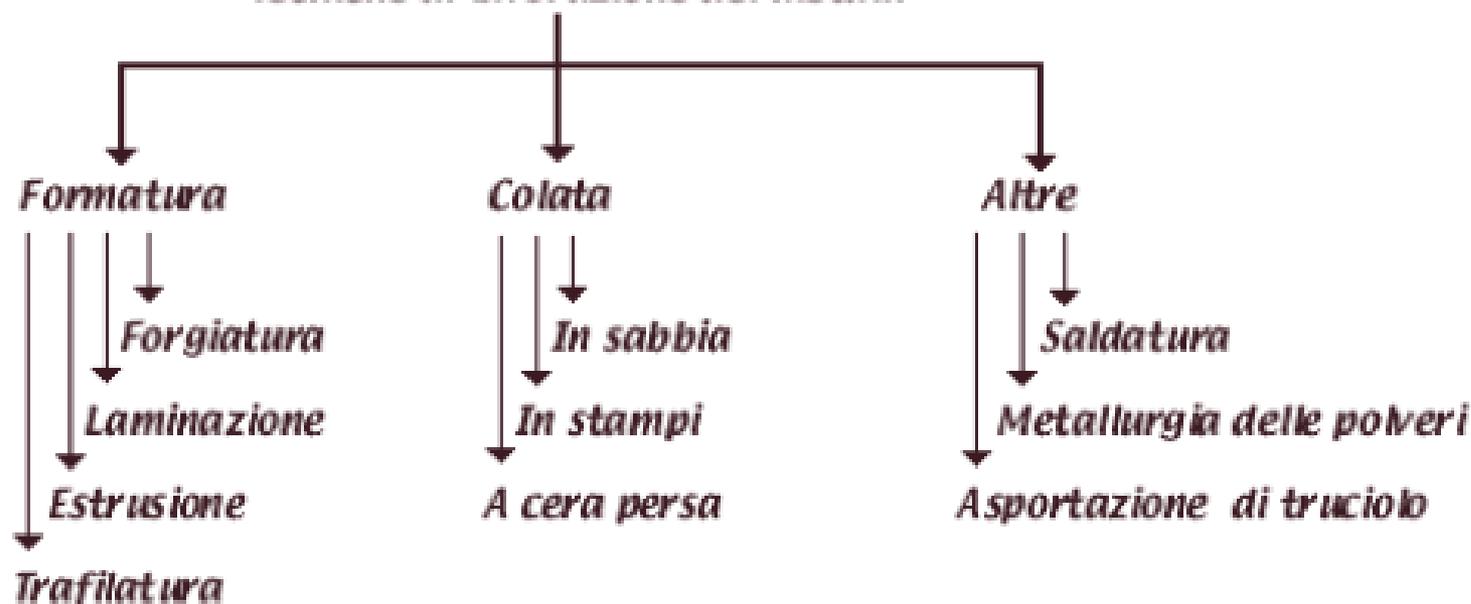
Infatti gli atomi, attraverso i meccanismi di diffusione già visti, tendono a migrare formando dei "colli" di saldatura tra le particelle di polvere. Questi colli si accrescono durante il trattamento fino a che due o più grani, inizialmente distinti, tendano a formare un unico grano di maggiori dimensioni. La porosità, inizialmente aperta, tende a scomparire o al più a diventare di tipo sferico come si vede in figura. La diffusione degli atomi può avvenire in fase solida, ma è favorita dalla formazione di una piccola quota di fase liquida.

# LAVORAZIONE METALLI

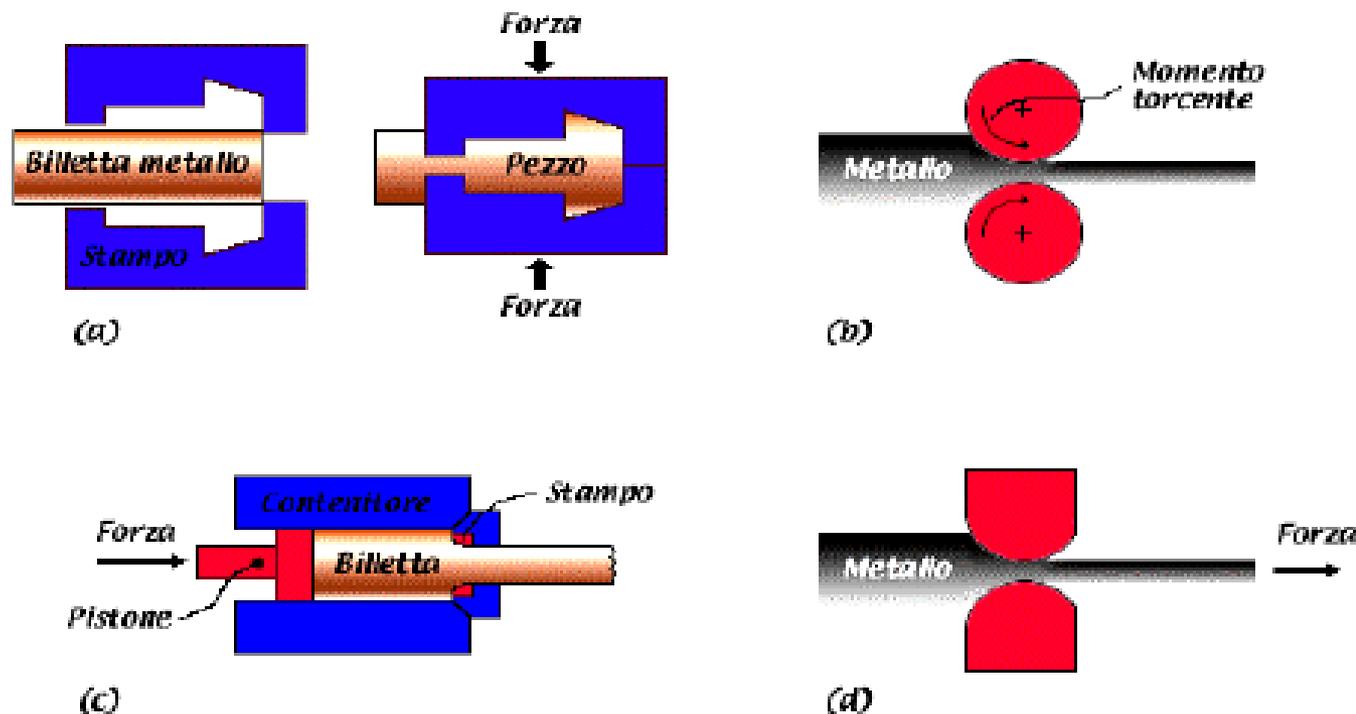
Per lavorazione dei metalli si intendono tutte le tecniche tramite le quali un metallo viene trasformato nel pezzo della forma desiderata. Quando consideriamo l'applicabilità di un certo metallo o lega è importante considerare, non solo le proprietà intrinseche di tale materiale, ma anche la possibilità di produrre il pezzo finito nella forma desiderata e il costo di tale produzione. Uno schema delle varie tecniche di produzione è riportato in figura.

*Schema di classificazione delle tecniche di lavorazione dei metalli.*

## *Tecniche di lavorazione dei metalli*



Le tecniche di formatura sono basate essenzialmente sulla deformazione plastica imposta tramite l'azione di una forza esterna. Affinchè tale formatura possa essere portata a termine con buoni risultati è importante che il metallo sia sufficientemente duttile da deformarsi plasticamente senza subire fessurazioni o rotture. Tutte le tecniche di formatura possono essere eseguite a freddo o a caldo. In genere si esegue la lavorazione a freddo (vedi paragrafi successivi) quando il metallo possiede una discreta duttilità. La lavorazione a caldo, pur garantendo maggiori deformazioni con minore sforzo applicato può portare spesso ad ossidazione superficiale con necessità di successiva finitura superficiale del pezzo. Nella figura che segue viene riportato uno schema delle diverse tecniche di formatura.



Tecniche di formatura dei metalli: (a) forgiatura, (b) laminazione, (c) estrusione e (d) trafilatura.

## *Tecniche di colata*

In questo caso il metallo fuso viene versato o spinto a pressione in uno stampo cavo della forma del pezzo finale. Con la solidificazione il metallo assume la forma dello stampo dal quale viene poi estratto. In alcuni casi è necessaria una finitura superficiale per portare il pezzo entro le tolleranze richieste. Il processo di colata produce in genere pezzi di qualsivoglia forma, ma sono inevitabili i difetti interni dovuti al processo di solidificazione e ritiro che possono compromettere la resistenza meccanica (vedi concentrazione degli sforzi all'apice delle cricche).

In genere la colata viene utilizzata nei casi in cui:

- ✓ Il pezzo è di forma molto complicata per cui altre tecniche non possono venire impiegate.
- ✓ La resistenza meccanica non è molto importante.
- ✓ La lega metallica ha una duttilità e lavorabilità molto scarsa per cui anche la formatura a caldo non è possibile.
- ✓ La colata risulta il processo più economico.

### *Colata in sabbia*

È il metodo più comune nel quale uno stampo in due pezzi viene creato per impaccamento e pressatura di sabbia silicea intorno ad un pezzo della forma voluta. I due pezzi così ottenuti vengono uniti creando più buchi di immissione del metallo fuso per favorire il riempimento dello stampo evitando difetti interni. Lo stampo viene poi facilmente rimosso per disgregazione della sabbia. Tale metodo viene utilizzato per grossi pezzi in cui non sia particolarmente importante la finitura superficiale, ma si vuole mantenere basso il prezzo di produzione.

### *Colata per cera persa*

Nella colata per cera persa, viene costruito un simulacro del pezzo voluto in cera o un polimero bassofondente. A questo punto viene formato uno stampo in ceramico refrattario intorno al pezzo in cera tramite uno "slurry" (miscela polveri di partenza + acqua) che viene poi essiccato e cotto per sinterizzazione ad alta temperatura dove la cera si dissolve lasciando spazio ad una cavità della forma del pezzo voluto. Il metallo fuso viene poi iniettato nello stampo ed una volta avvenuta la solidificazione il ceramico viene fratturato per estrarre il pezzo finale. Con tale tecnica si ottengono pezzi di elevata precisione (gioielleria, corone dentali, palette di turbina etc.) a discapito di un certo costo di produzione e basso numero di pezzi prodotti.

### *Formatura ad iniezione*

In tale processo il metallo viene iniettato a pressione in uno stampo di acciaio in due pezzi che viene utilizzato per un numero molto elevato di volte. Una volta solidificato il metallo all'interno, lo stampo viene aperto e il pezzo estratto. Tale tecnica può venir utilizzata solo per metalli con punto di fusione relativamente basso (zinco, alluminio, rame etc.), e pezzi piccoli.

### *Saldatura*

Tale processo viene impiegato perlopiù per assemblare alcuni pezzi in loco per formare una struttura di dimensioni maggiori quando non sia possibile o conveniente formare la struttura in un pezzo solo. Tale processo può essere effettuato tramite apporto di materiale esterno che viene fuso sui due pezzi che risultano poi uniti dalla solidificazione del materiale aggiunto. La fusione del materiale di apporto può essere effettuata o tramite fiamma ossiacetilenica o ad arco voltaico; in quest'ultimo caso una differenza di potenziale viene applicata tra l'elettrodo del materiale d'apporto e i pezzi da saldare; si innesca quindi un arco voltaico che fonde e trasferisce la lega dall'elettrodo alla giunzione. Per limitare problemi di corrosione è molto importante che il materiale apportato sia il più possibile simile alla lega dei due pezzi saldati; in alcuni casi per evitare anche la minima ossidazione durante la saldatura vengono utilizzate tecniche di saldatura ad arco sommerso (MIG, TIG) nelle quali l'arco voltaico o la fiamma viene mascherata da un flusso di gas inerti prevenendo il contatto con l'ossigeno presente nell'atmosfera circostante durante la fusione/solidificazione.

Un altro metodo è la **saldobrasatura** nel quale due pezzi vengono uniti sfruttando la fusione/diffusione delle parti materiali a contatto riscaldate per attrito ottenuto movimentando i due pezzi messi a contatto con velocità differenti.

## SALDATURA

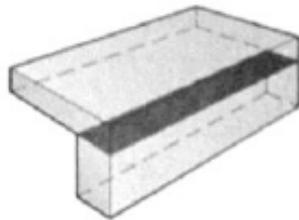
- In molti casi vi è la necessità di ricorrere alla giunzione tra più pezzi. Le ragioni possono essere:
  - Non è possibile o antieconomico produrre il prodotto in un pezzo unico.
  - E' più facile fabbricare dei singoli pezzi ed assemblarli successivamente.
  - Il prodotto è stato tagliato o dissassemblato per riparazioni o manutenzione.
  - Si vogliono delle proprietà differenti in diverse zone non ottenibili con un unico materiale
  - E più economico trasportare il prodotto diviso in pezzi da assemblare sul posto.

# Tipi di giunzioni

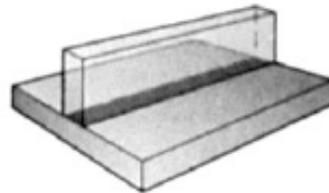
- Possiamo suddividere le giunzioni in alcune categorie principali:
  - saldatura per fusione (fusion welding): fanno parte di questo processo le saldature ad arco, e high-energy-beam (con fascio ad alta energia);
  - saldature allo stato solido (solid-state welding): la saldatura viene eseguita senza fusione, tipo saldature a freddo, ad ultrasuoni, per attrito, a resistenza elettrica, per esplosione e diffusion bonding;
  - brasatura e saldo-brasatura dove si usa un metallo bassofondente apportato esternamente;
  - incollaggi utilizzando adesivi;
  - giunzioni meccaniche con rivetti, bulloni, ganci e fissaggi vari.

# Caratteristiche delle giunzioni

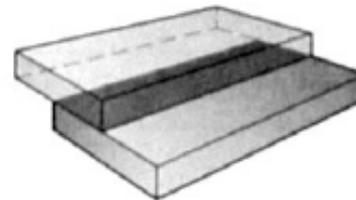
- Possiamo avere diversi tipi di giunzioni:



(b) Corner joint



(c) T joint



(d) Lap joint



(e) Edge joint

- per ogni tipo di giunzione possiamo avere differenti sistemi di giunzione più efficaci.
- Nella selezione del metodo di giunzione sono importanti le caratteristiche di quest'ultima come dimensioni, forme, resistenza richiesta, ispezionabilità, durata, inerzia chimica...

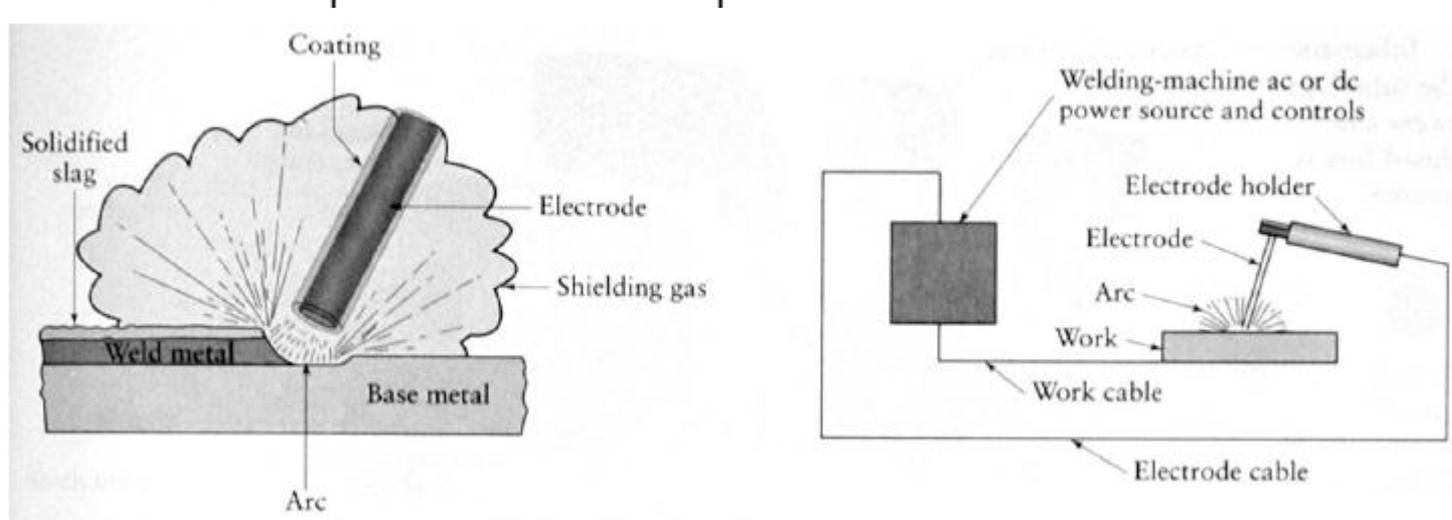
# Processi di giunzione a fusione

## General Characteristics of Joining Processes

Joining Process	Operation	Advantage	Skill Level Required	Welding Position	Current Type	Distortion*	Cost of Equipment
Shielded metal arc	Manual	Portable and flexible	High	All	ac, dc	1 to 2	Low
Submerged arc	Automatic	High deposition	Low to medium	Flat and horizontal	ac, dc	1 to 2	Medium
Gas metal arc	Semiautomatic or automatic	Works with most metals	Low to high	All	dc	2 to 3	Medium to high
Gas tungsten arc	Manual or automatic	Works with most metals	Low to high	All	ac, dc	2 to 3	Medium
Flux-cored arc	Semiautomatic or automatic	High deposition	Low to high	All	dc	1 to 3	Medium
Oxyfuel	Manual	Portable and flexible	High	All	-	2 to 4	Low
Electron beam, laser beam	Semiautomatic or automatic	Works with most metals	Medium to high	All	-	3 to 5	High

\* 1, highest; 5, lowest

- L'elettrodo è formato da una bacchetta lunga metallica rivestita da un ossido.
- L'arco voltaico si genera tra a punta dell'elettrodo e il pezzo al tocco e prosegue poi mantenendo i due ad una distanza sufficientemente corta.
- Il calore generato dalla scarica fonde il metallo del pezzo, la punta dell'elettrodo e le sostanze del rivestimento che si riduce generando un gas protettivo. Il metallo fuso solidifica sul pezzo nell'area di saldatura.
- Si usano correnti continue o alternate tra 50 e 300 A, potenze inferiori a 10 kW e il sistema è portatile.
- Con lamiere sottili si usa corrente continua (cc) in polarità diretta (elettrodo negativo).
- Per saldature profonde si usa cc in polarità inversa.



- Saldatura ad arco schermato (shielded metal arc-welding o SMAW)
- E' il più usato, circa il 50% delle saldature industriali e per manutenzione.

# Modalità di giunzione

Le saldature utilizzate per i collegamenti portanti e per l'assemblaggio sono:

- Saldatura di testa con preparazione del cianfrino
- Saldatura con giunti a sovrapposizione e a copri giunto
- Saldatura con giunti a croce

## Parametri di saldatura

In funzione del tipo di giunto, dell'elettrodo, della resistenza da ottenere esistono parametri che influenzano la saldatura. I principali sono:

- N° di passate
- Diametro dell'elettrodo
- Classe dell'elettrodo
- Intensità di corrente e tensione
- Velocità filo

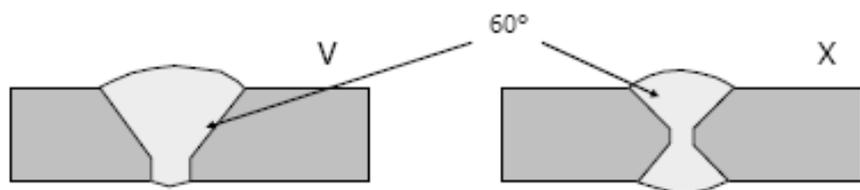
## Saldatura di testa con preparazione del cianfrino

Richiede diametri  $\geq 20$  mm.

Gli estremi degli elementi da collegare devono essere essere "cianfrinati", ovvero tagliati a forma di scalpello.

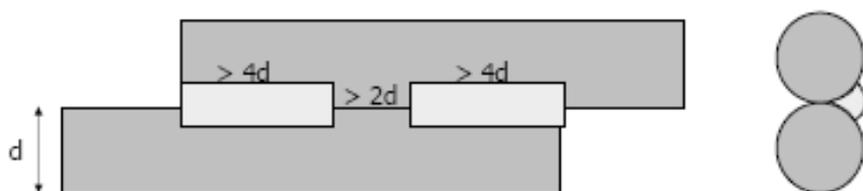
Il deposito del materiale d'apporto deve essere effettuato in più passate.

Viene realizzata secondo uno schema a V o a doppia V (detto anche ad X).



## Saldatura con giunti per sovrapposizione

È la giunzione tipica delle strutture portanti. Ne esistono diverse varianti, tra le quali la più efficace risulta essere la tecnica a coprigiunto a rinforzi laterali.



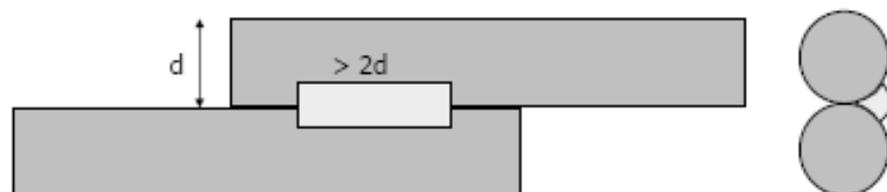
## Saldatura con giunti a croce

Non richiede particolari operazioni preliminari e ciò la rende ampiamente utilizzata sia per le strutture portanti che per semplici assemblaggi. La saldatura è realizzata con un unico cordone e l'arco è innescato sulla barra non portante.



## Saldatura con giunti per sovrapposizione

Schema caratteristico per le strutture assemblate, non portanti:

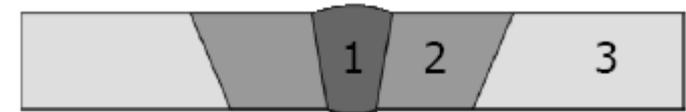
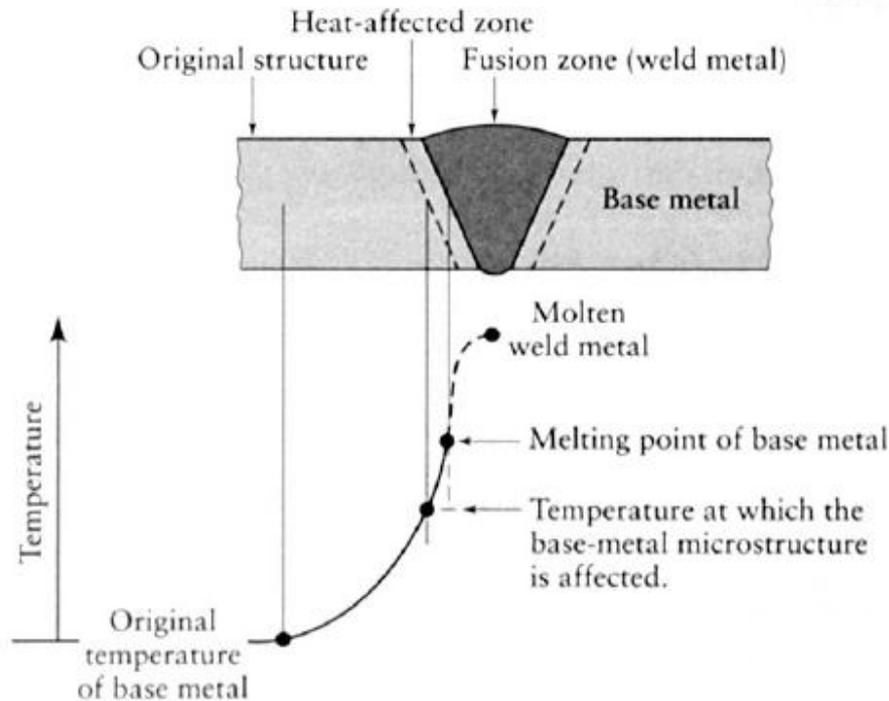


# Resistenza delle saldature

- un giunto a sovrapposizione deve garantire una resistenza a trazione maggiore o uguale al 60% della resistenza a rottura dell'acciaio da saldare
- un giunto a croce deve possedere una resistenza allo strappo pari al 30% della resistenza allo snervamento dell'acciaio da saldare.

# Il giunto saldato per fusione

- Caratteristiche del giunto:



1. La zona di completa fusione
2. La zona termicamente alterata
3. Il metallo base inalterato

## La ZTA

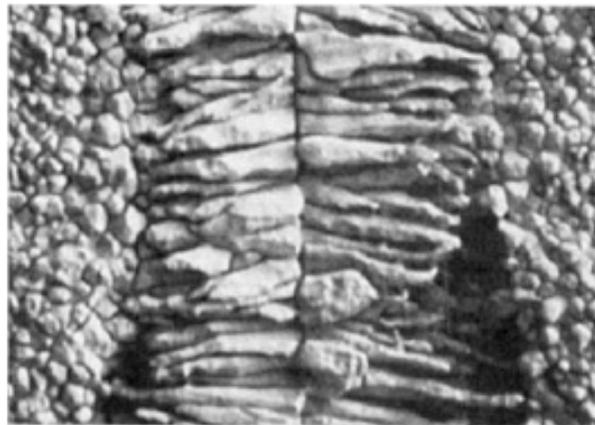
Problemi derivanti dal surriscaldamento:

- Microstruttura ingrossata e formazione di strutture dure
- Diminuzione della resistenza a trazione
- Infragilimento e formazione di precipitati

## The heat-affected zone (HAZ)

- Nella zona alterata per riscaldamento dalla saldatura la microstruttura e composizione chimica può venir alterata causando problemi al materiale e pezzo.
- In particolare si altera la grana cristallina che cresce diminuendo le proprietà meccaniche. Inoltre diffusione e segregazioni della zona di fusione alterano la composizione chimica e possono dare origine a corrosione.

Corrosione intergranulare  
in una saldatura



# La saldabilità degli acciai

- L'analisi chimica effettuata durante la colata e quella eventualmente effettuata sul prodotto finito forniscono la percentuale degli elementi chimici presenti nell'acciaio in questione
- Il tenore dei vari elementi chimici deve soddisfare opportune limitazioni riportate nella seguente tabella

## La saldabilità degli acciai

Massimo contenuto di elementi chimici in %			
		Analisi di prodotto	Analisi di colata
Carbonio	C	0.24	0.22
Fosforo	P	0.055	0.050
Zolfo	S	0.055	0.050
Rame	Cu	0.85	0.80
Azoto	N	0.013	0.012
Carbonio Equivalente	$C_{eq}$	0.52	0.50

# La saldabilità degli acciai

In tabella è indicato il calcolo del "Carbonio equivalente" ( $C_{eq}$ ), effettuato utilizzando la seguente formula:

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

Il carbonio equivalente è un indice della saldabilità dell'acciaio in quanto più questo assume valori elevati, meno l'acciaio risulta saldabile.

# La saldabilità degli acciai

Per gli acciai con percentuale di carbonio maggiore dello 0.1%:

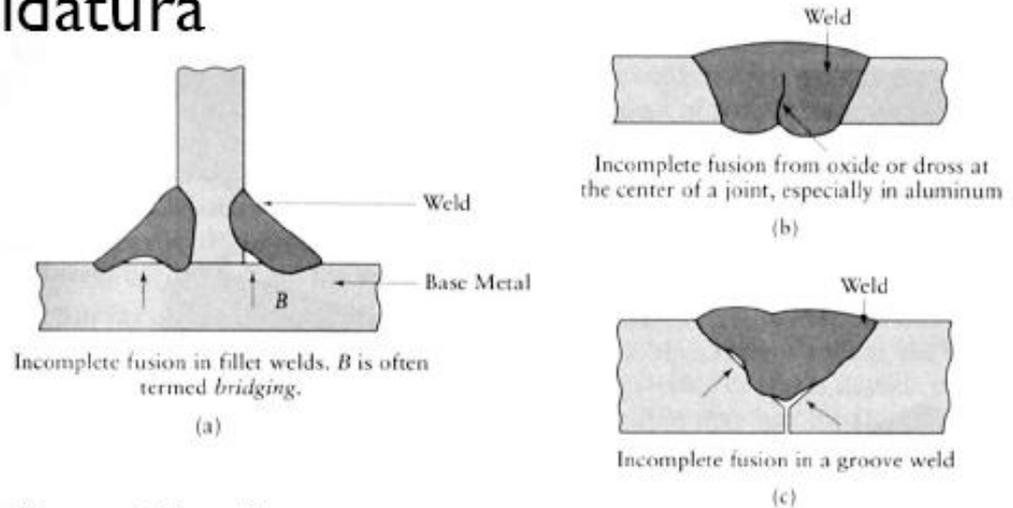
- Se il carbonio equivalente è inferiore a 0.45 l'acciaio è saldabile e non dà luogo a cricche

Per acciai con percentuale di C < 0.1% si utilizzano formule differenti

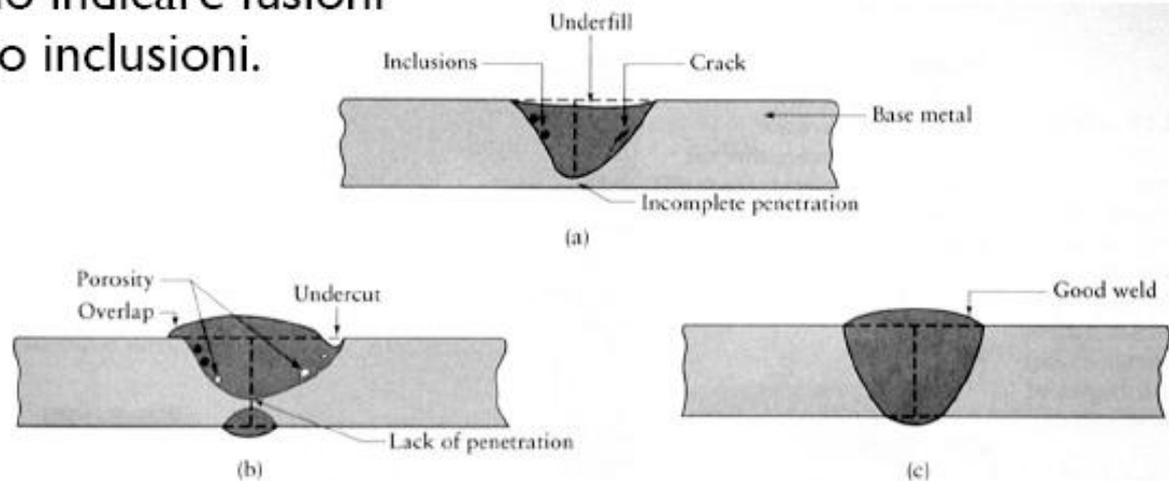
# Qualità della saldatura

- I difetti maggiori che influiscono sulla qualità di una saldatura sono:
  - porosità, questa può venir ridotta tramite:
    - propria selezione dell'elettrodo e del metallo da apportare
    - preriscaldamento zona da saldare o maggior apporto calore
    - pulitura zona da saldare e controllo contaminanti
    - rallentare la velocità di saldatura per dare tempo ai gas di scappare
  - Inclusioni di scoria, si riduce tramite:
    - pulitura tra una passata e l'altra
    - sufficiente gas di schermatura
    - riprogettazione opportuna del giunto per permettere facile rimozione
  - Incompleta fusione o penetrazione, si controlla tramite:
    - aumento temperatura pezzo e gas di schermatura
    - pulitura della zona da saldare
    - cambio disegno del giunto e tipo di elettrodo
    - maggior apporto di calore e diminuire la velocità di saldatura
    - cambio disegno del giunto e miglior fit delle superfici da saldare

# Qualità della saldatura



- Profilo di saldatura: il profilo di saldatura può indicare fusioni incomplete o inclusioni.

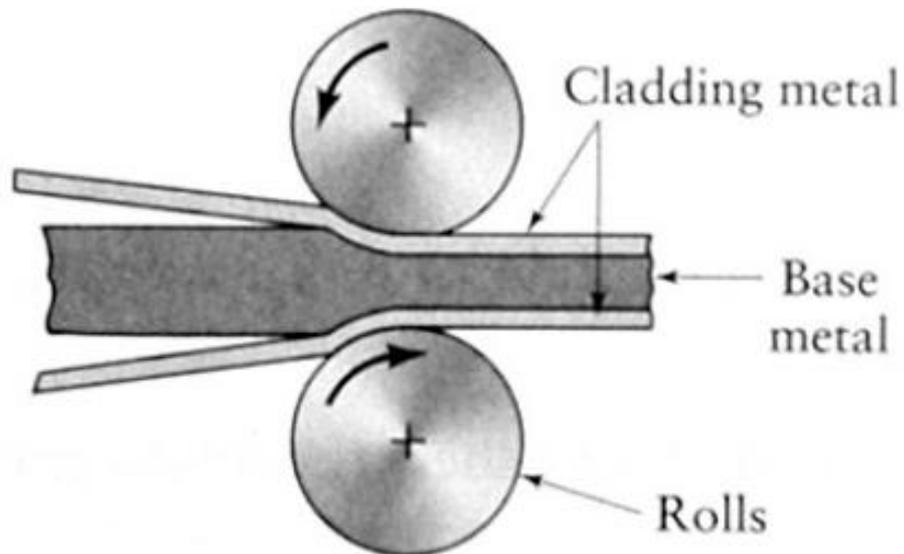


# Saldabilità

- Leghe alluminio: saldabili con apporto di calore elevato, non saldabili quelle con zinco o rame
- Ghise: generalmente saldabili
- leghe rame: come leghe Al
- piombo: facile da saldare
- leghe magnesio: saldabili con gas e fondenti protettivi
- Molibdeno: saldabile in condizioni controllate
- Leghe Ni: saldabili, vari processi
- Nb: saldabili in condizioni controllate
- Acciai inox: saldabili, vari processi
- Acciai galvanizzati: meno saldabili per la presenza dello Zn

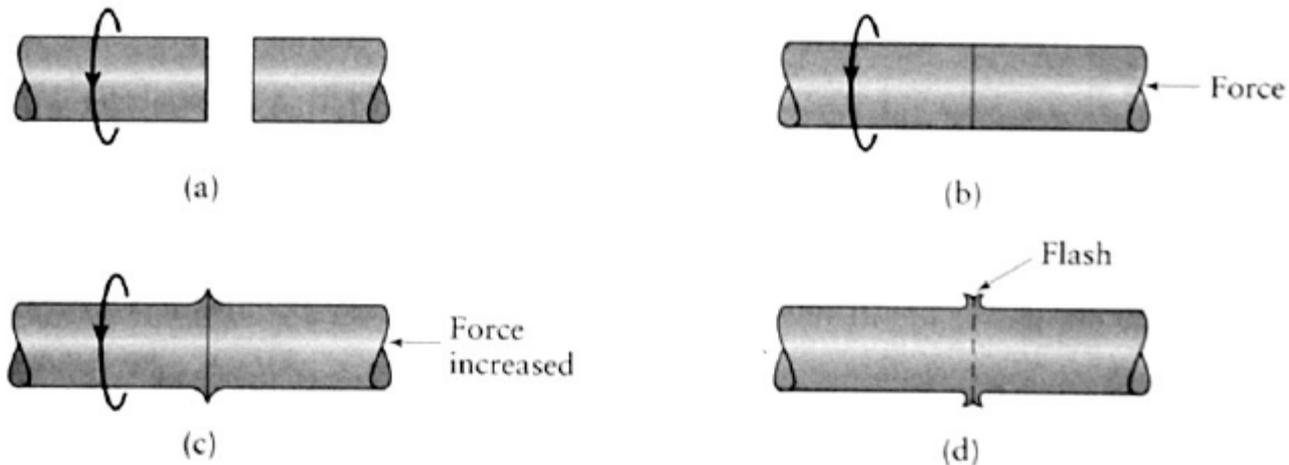
## Sistemi di saldatura allo stato solido

- Saldatura a freddo (CW: cold welding): si esegue tramite pressione di rulli o stampi. Si usano metalli soffici, facilmente deformabili, le superfici vanno ben pulite prima dell'operazione. Un esempio è dato dal cladding (roll bonding):

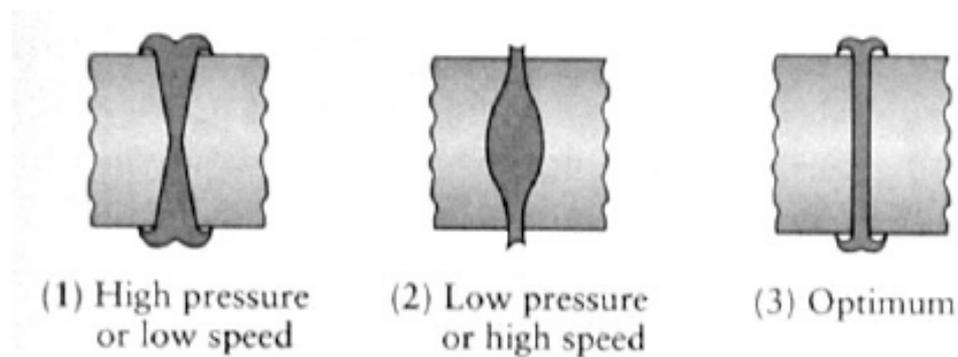


## Saldatura ad attrito, FRW

- Friction Welding (FRW): si esegue tenendo fisso un pezzo e facendo ruotare ad alta velocità l'altro (a) fino a 900 m/s. Si mettono a contatto i due pezzi (b) con una certa pressione e l'attrito generato riscalda la zona dell'interfaccia. Si blocca istantaneamente la rotazione (c) (per evitare torsione e rotture) aumentando la pressione. Si genera una forte giunzione allo stato solido (d)



## Saldatura ad attrito: FRW



- La giunzione risultante è molto sottile e la sua forma dipende dal calore generato, dalla conducibilità termica e proprietà meccaniche dei pezzi.
- Viene utilizzato per tubi fino a 250 mm e barre fino a 100 mm di diametro.
- In molti casi si sviluppa una bavatura all'interfaccia che se non voluta deve essere rimossa all'utensile.
- Esistono alcune varianti del processo:

# Corrosione dei metalli -



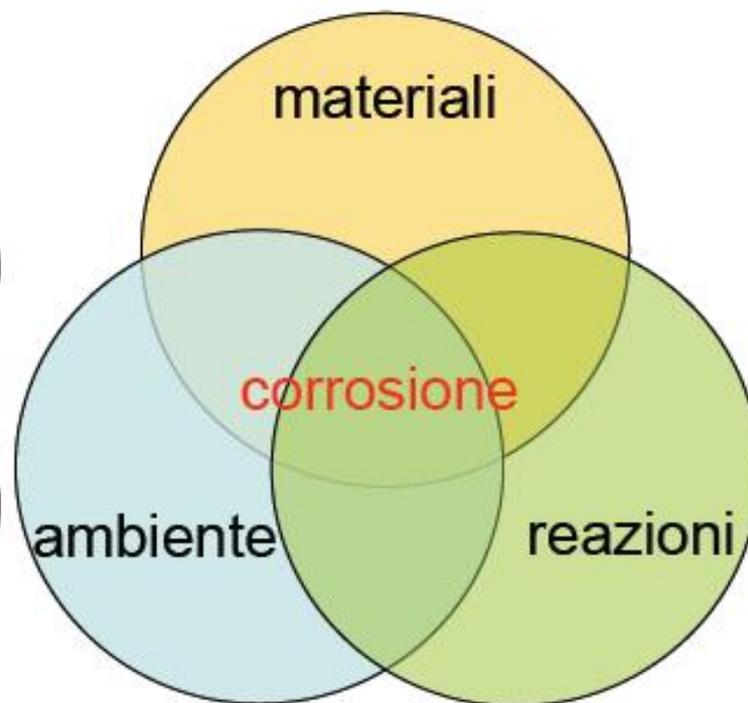
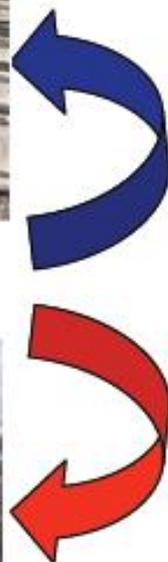
Protetti in ambiente alcalino



Armature nel calcestruzzo

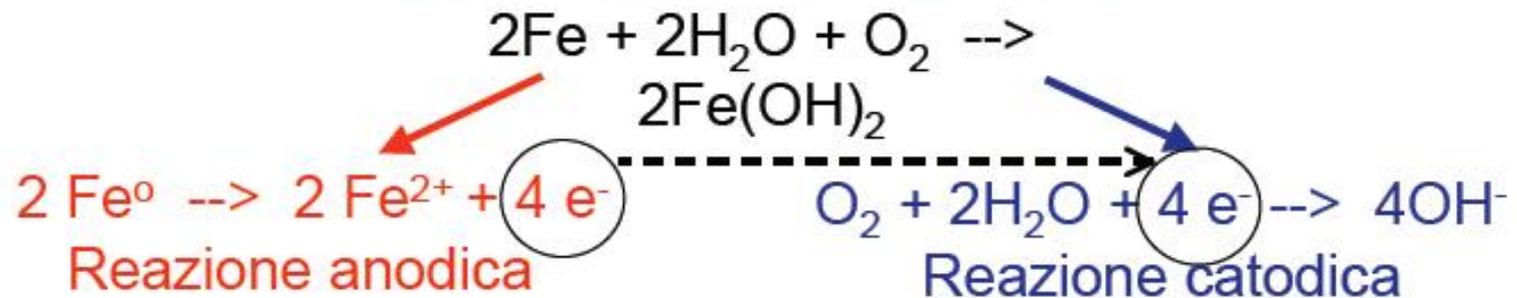


Corrosione in presenza di cloruri



## Corrosione generale

Formazione della ruggine in superficie



## METALLI NON FERROSI

I metalli non ferrosi sono usati in misura molto minore rispetto all' acciaio. Il loro impiego cresce continuamente perche' offrono proprieta' diverse dagli acciai quali:

- facile ed economica formatura
- buona resistenza alla corrosione,
- alta conducibilita' termica ed elettrica,
- ridotto peso specifico.

Le proprietà meccaniche e, in alcuni casi, la saldabilità sono però inferiori.

Come per il ferro anche per i metalli non ferrosi esistono varie leghe che ne migliorano le caratteristiche.

Tra le leghe più pesanti degli acciai quelle di Cu e di Ni sono le più usate.

Tra le leghe più leggere utilizzabili come strutturali, le più importanti sono quelle di Al, Mg, Be e Ti.

## ***LEGHE DEL RAME***

Il rame e le sue leghe sono state utilizzate fin dall'antichità per la buona combinazione delle loro proprietà. Il rame viene ottenuto da vari minerali: solfuro (calcopirite), ossido (cuprite), carbonato (malachite). Durante l'arrostimento in aria i solfuri ed i carbonati si trasformano in ossidi che vengono poi mescolati con carbone e ridotti in forno a rame metallico (metallina). La metallina viene affinata (purificata) seguendo diversi procedimenti, dipendentemente dalla purezza desiderata. Per ottenere rame ultrapuro per cavi elettrici si procede per elettrolisi. Il rame ha una struttura FCC con una densità pari a 8.92 gr/cm<sup>3</sup>. È molto resistente alla corrosione anche in ambienti marini o industriali. Possiede una duttilità notevole, tale da renderne addirittura difficile la lavorazione all'utensile in forma non legata con altri elementi.

Le proprietà meccaniche del rame puro possono venir incrementate (durezza, resistenza a snervamento) tramite incrudimento per lavorazione a freddo. Tipicamente in un laminato si passa dai 69 MPa per la  $\sigma_s$  (snervamento) e 220 MPa per la  $\sigma_u$  (sforzo ultimo di rottura) per un ricotto a 310 e 345 MPa rispettivamente per un incrudito. Il rame viene indurito soprattutto per alligazione.

Circa la metà della produzione di rame viene impiegata per costruzioni civili ed una classificazione del rame e sue leghe secondo l'applicazione può venire esemplificata come segue:

- ✓ Laminati di Cu: coperture, rivestimenti esterni, grondaie, compluvi, serbatoi...
- ✓ Tubi di Cu: distribuzione acqua potabile, acqua calda, gas, scarichi, termoconvettori...  
Importante in questo settore è l'elevata duttilità del rame che permette una facile posa in opera ed adattamento all'ambiente delle tubazioni da parte del montatore senza il bisogno di ricorrere a pezzi particolari quali curve, derivazioni.. con un notevole risparmio compensante il maggior costo del rame.
- ✓ Fili, corde, piattine in Cu: impianti elettrici, telefonici, illuminazione, motori elettrici, generatori...
- ✓ Ottone: valvole termiche, organi di controllo, rubinetteria, accessori...
- ✓ Tubo ottone: accessori da bagno, costruzioni navali.
- ✓ Laminati ottone: infissi, serramenti, elementi pavimento...
- ✓ Getti di ottone: maniglie, serrature.

## Ottoni

La lega rame-zinco viene chiamata ottone. Gli ottoni consumano quasi la metà della produzione di rame. Come si può notare dal diagramma di fase in figura, la fase  $\alpha$  è la fase stabile dell'ottone fino ad una composizione del 35 % in peso di zinco; tale fase ha una struttura FCC e risulta essere duttile e facilmente lavorabile. Oltre tale composizione comincia a formarsi anche una fase  $\beta'$  con struttura BCC molto più dura e resistente della fase  $\alpha$ . Le leghe  $\alpha+\beta'$  sono lavorabili solo a caldo e presentano una ridotta duttilità.

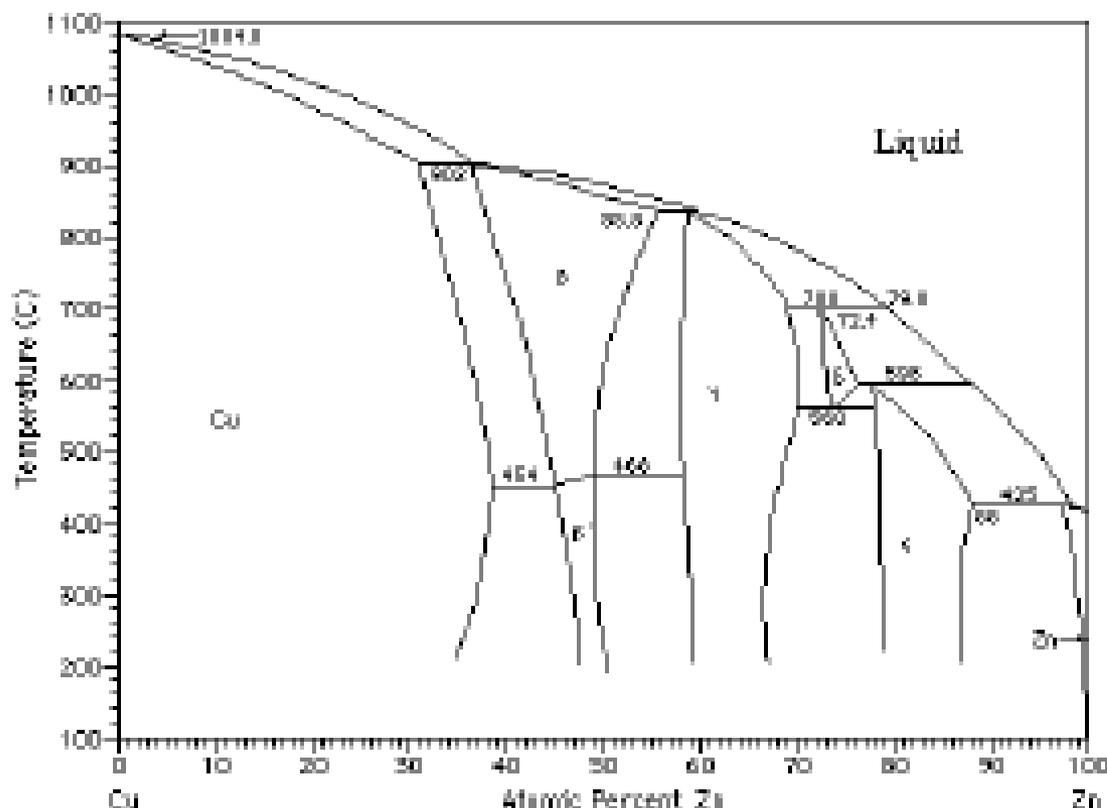


Diagramma di fase Cu-Zn dove risultano visibile le due fasi  $\alpha$  e  $\beta'$  degli ottoni.

## ***Leghe del Rame***

---

Tra gli ottoni più utilizzati troviamo:

- ✓ Ottone giallo: contiene dal 20 al 36 % di zinco. Utilizzato per trafilatura e laminati.
- ✓ Ottone dell'ammiragliato: contiene il 28% di Zn e l'1% di Sn. Lo stagno viene aggiunto per evitare il problema della dezincificazione, che avviene in acque marine o molto ossigenate, per cui lo Zn viene estratto lasciando una massa porosa costituita di solo rame.
- ✓ Ottone all'alluminio: oltre al 22% di Zn contiene il 2% di Al che ne migliora la resistenza a temperature più elevate. Trova applicazione negli impianti idraulici.

### ***Bronzi***

I bronzi sono delle leghe di rame con lo stagno; molto utilizzati nel passato, attualmente hanno uno scarso utilizzo se non per oggettistica d'arte e arredamento, nonostante presentino delle resistenze meccaniche superiori all'ottone ed una notevole resistenza alla corrosione.

# LEGHE DI ALLUMINIO

**Osservazioni generali sull' alluminio e le sue leghe.**

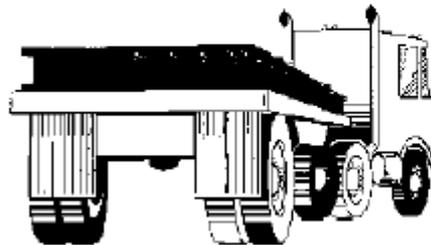
L' Alluminio e' il metallo piu' abbondante sulla crosta terrestre seguito a notevole distanza dal ferro. Ogni argilla ne contiene circa l' 8%, valore molto elevato, ma non disponibile come sorgente a buon mercato in quanto l' estrazione dell'alluminio richiede l'uso di una notevole quantita' di energia.

Per questo motivo la produzione e' economicamente conveniente solo se si puo' disporre di energia idroelettrica e/o nucleare a buon mercato.

# Elementi di metallurgia delle leghe di alluminio

- la struttura cristallina e il legame che unisce atomi metallici allo stato solido;
- le proprietà metallurgiche di una soluzione solida e gli effetti indotti dal limite di solubilità;
- i fenomeni microstrutturali che spiegano i meccanismi di rafforzamento attivi nelle leghe ed il loro comportamento meccanico;
- l'evoluzione del processo di solidificazione di una lega, che spesso risulta decisivo nel determinarne le caratteristiche microstrutturali.

- L'alluminio ha densità bassa  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , (la sua densità è un terzo di quella dell'acciaio).



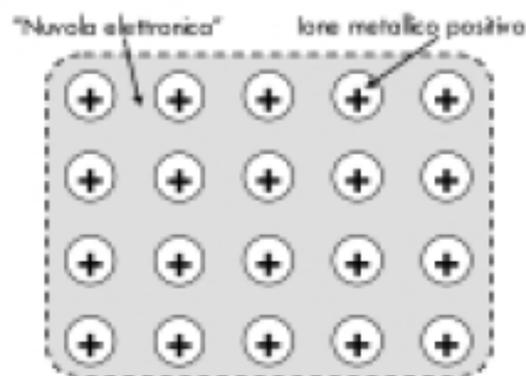
*A full load of steel, by weight.*



*An equal load of aluminum, by weight.*

**Tabella 1 • Principali caratteristiche fisiche dell'alluminio puro**

Numero atomico	13
Massa atomica	26,9815 kg/kmol
Struttura cristallina	Cubica a facce centrate
Parametro reticolare	4,04 Å
Densità a 20 °C	2,70 kg/dm <sup>3</sup>
Temperatura di fusione	659,9 °C
Temperatura di ebollizione	2.270 °C
Calore specifico	93,9 kJ/(kg K)
Calore latente di fusione	394,5 kJ/kg

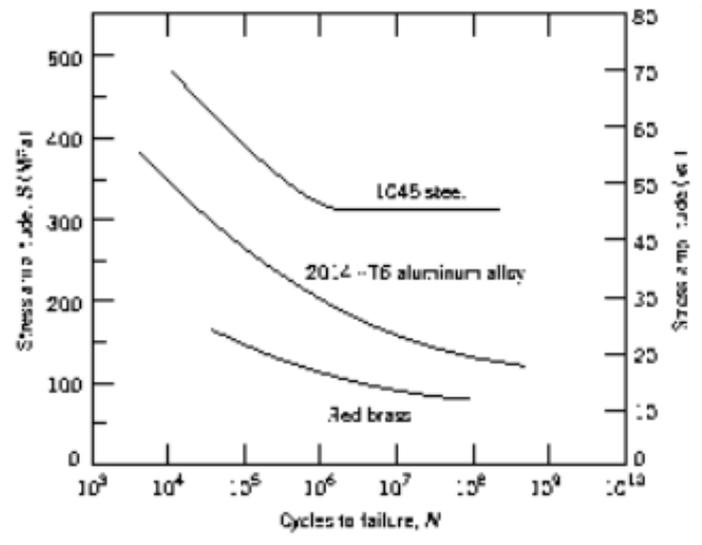


*Figura 1 - Schematizzazione del legame metallico.*

- La conducibilità elettrica è buona ( $37,7 \text{ m}/\Omega \text{ mm}^2$ )  
È pari al 65% di quella del Cu a parità di volume  
ma è il 200% in peso.
- La conducibilità termica è ottima ( $242 \text{ W/m K}$ ),  
superata solo da Ag, Au e Cu ( $\text{Fe}=79 \text{ W/m K}$ )
- Il coefficiente di dilatazione, ( $23 \times 10^{-6} /\text{K}$ ) due volte  
quello del ferro, dà inconvenienti durante la  
fusione e le saldature.

- Il punto di fusione e' di  $660^{\circ}$  C il che rende l'alluminio e ancora di piu' le sue leghe lavorabili per fusione.
- E' molto resistente alla corrosione dovuta ai normali agenti perché si ricopre di uno strato di ossido aderente e non poroso (protettivo). L' $\text{Al}_2\text{O}_3$  e' chimicamente stabile tra  $\text{pH} = 4 - 8$
- L'elevata resistenza alla corrosione fa si che la sua riciclabilita' sia molto alta
- Non e' magnetico (sopporta elevati voltaggi ed e' ottimo quindi in elettronica)
- Il rapporto  $\sigma/\rho$  e' superiore a quello dell' acciaio.
- La durezza pero' e' bassa

- Non presenta limite di fatica (quindi da questo punto di vista e' peggio dell'acciaio)



- E' aspinterogeno, quindi se urtato non provoca scintille

- La resistenza all'abrasione e all'usura sono basse
- Non e' combustibile e non produce fumi tossici
- Sulla base del solo criterio di resistenza, la sostituzione di una lamiera di acciaio E24 con una 5086 H111 richiede uno spessore 1.5 volte maggiore

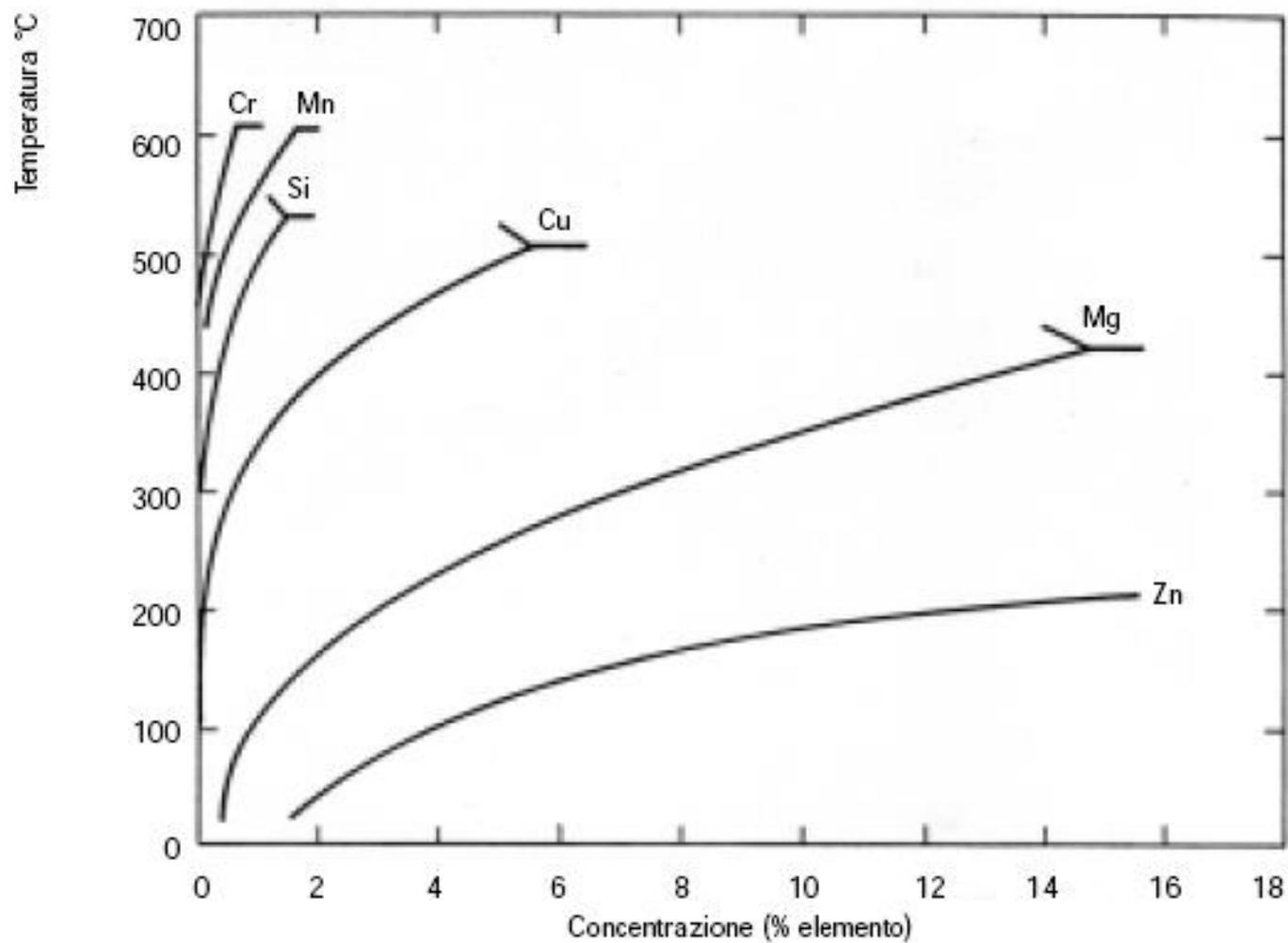


Figura 7 - Valori di solubilità dei principali alliganti dell'alluminio. (fonte: Metals Handbook)

# NOMENCLATURA LEGHE ALLUMINIO

Attualmente esiste un grandissimo numero di leghe dell' alluminio destinate a migliorarne le proprietà meccaniche, a limitarne il coefficiente di dilatazione termica.

Nelle leghe però la conducibilità elettrica e la resistenza alla corrosione sono inferiori a quelle del metallo puro.

**Le leghe dell'alluminio si suddividono in leghe da lavorazione plastica e leghe da fonderia.**

Con il termine "*da fonderia*" si intendono le leghe particolarmente adatte alla realizzazione di getti e quindi ad essere colate allo stato liquido e a solidificare in una forma che riproduce l' oggetto da realizzare

Le leghe da "*lavorazione plastica*" rappresentano la frazione più importante delle leghe leggere sia in termini numerici che di applicazioni. Sono quelle il cui utilizzo avviene allo stato di semilavorati (estrusi, laminati etc.) ottenuti mediante processi di trasformazione plastica di prodotti primari denominati billette o placche.

I numerosi tipi di leghe adatte alla lavorazione plastica (come riportato nella tabella successiva) sono identificate commercialmente da una sigla di quattro cifre, dal 1000 all' 8000.

La sigla e' accompagnata anche da lettere maiuscole che servono per distinguere il trattamento termico che le leghe hanno subito.

La classificazione e' dell' American National Standards Institute (ANSI) standard H35.1

Sigla numerica	Elemento presente in maggiore quantita'		
1XXX	Al	Al quasi puro	A = invecchiamento artificiale a circa 50 C
2XXX	Cu	Lega bifasica	S = stabilizzazione
3XXX	Mn	Monofasica	R = ricottura
4XXX	Si	Bifasica	B = bonifica
5XXX	Mg	Monofasica	H <sub>p</sub> = estrusione
6XXX	Mg e Si	Bifasica	H1= deformazione a freddo
7XXX	Zn	Bifasica	H2= deformazione a freddo e parziale ricottura
8XXX	in via di sviluppo		H3= deformazione a freddo e stabilizzazione (trattamento termico a bassa temperatura)

Per la serie da 2000 a 7000, la prima cifra indica la serie di appartenenza e quindi la famiglia di leghe, la seconda specifica se si tratta di una lega di prima definizione (indicata con lo zero) o di una modifica successiva (lettera dall'1 al 9); le ultime due cifre non hanno un significato specifico ma servono per individuare ogni singola lega all'interno della serie.

O = nessun trattamento termico, grezzo di fabbricazione

T = tempra di soluzione con raffreddamento in H<sub>2</sub>O fredda

T<sub>b</sub> = " " " " bollente

T<sub>o</sub> = " " " " " olio

T<sub>a</sub> = " aria

N = invecchiamento naturale dopo tempra

Nel caso della serie 1000 le cifre specificano invece il livello o il controllo delle diverse impurezze.

Es: lega 1035-O

1 = percentuale minima di Al 99%

0 = non c'e' controllo particolare sul rimanente 0,65%

35 = in questa lega c'e' il 99,35% di Al

O = Nessun trattamento termico, grezzo di lavorazione

I numerosi tipi di leghe adatte alla lavorazione plastica si possono suddividere a loro volta in:

- leghe da trattamento termico (serie 2000, 6000 e 7000 le loro proprietà meccaniche vengono aumentate da trattamenti termici: invecchiamento)

- leghe da incrudimento (serie 1000, 3000, 5000, 8000 per queste leghe le caratteristiche meccaniche possono venir aumentate solo mediante deformazione plastica a freddo. Eventuali trattamenti termici servono solo per ridurre o annullare gli effetti della deformazione a freddo)

Le leghe da fonderia possono venir ulteriormente suddivise in:

- **primarie** (si ottengono dai minerali)
- **secondarie** (si ottengono utilizzando rottami e

quindi le tolleranze nella composizione chimica sono più ampie

Se prima della numerazione vi e' una X la lega e' ancora sperimentale

Anche per le **leghe da fonderia** esiste un' analoga designazione a 3 cifre piu' una cifra decimale usata per definire il prodotto: colato (0) o lingotto (1).

Sigla	Elemento presente in maggiore quantita'
1XX.X	Al
2XX.X	Cu
3XX.X	Si con aggiunte di Cu e/o Mg
4XX.X	Si
5XX.X	Mg
6XX.X	non viene usata
7XX.X	Zn
8XX.X	Sn
9XX.X	Altri elementi

A completamento dello schema di classificazione, alla designazione a 4 cifre possono seguire dei codici identificanti il processo di indurimento subito. In particolare i più frequenti sono:

- ✓ T3: trattamento di soluzione, lavorazione a freddo e invecchiamento naturale (temperatura ambiente)
- ✓ T4: trattamento di soluzione e invecchiamento
- ✓ T6: trattamento di soluzione e invecchiamento artificiale (in forno)
- ✓ T7: trattamento di soluzione e stabilizzazione (sovrainvecchiamento)
- ✓ T8: trattamento di soluzione, lavorazione a freddo e invecchiamento artificiale.

### *Comportamento a fatica delle leghe di alluminio*

Le leghe di alluminio sono note per non avere un cosiddetto limite di fatica (vero anche per molte classi di compositi a matrice polimerica), contrariamente ad altre leghe soprattutto quelle ferrose. Quando sottoponiamo un materiale ad uno sforzo ciclico variante nel tempo si dice in genere che il materiale è sottoposto a fatica. La fatica per tutti i materiali riduce nel tempo il limite di rottura del materiale. Per molti di essi però, esiste uno sforzo limite sotto il quale il materiale non si rompe neppure per un numero di cicli infinito. Tale sforzo è detto limite di fatica ed è una caratteristica di molti materiali. Se invece tale sforzo limite non esiste, non è possibile garantire per tale materiale che esso non subirà mai una possibilità di rottura anche per carichi ciclici molto bassi. Il materiale ha comunque una vita limitata e tale vita dipende dal tipo e valore di sforzo ciclico applicato.

### *Leghe di alluminio*

- |                         |  |
|-------------------------|--|
| ✓ basse % di Cu         | leghe per lavorazioni plastiche ed indurimento per invecchiamento ( $\text{CuAl}_2$ ) 70(HV) $\rightarrow$ 120(HV) |
| ✓ 2 - 5 % di Cu         | duralluminio (tenace, leggero)   |
| ✓ +0.6 % Si + 0.75 % Mn | serramenti ed infissi  |
| ✓ 12 % di Cu            | leghe da fonderia  |
| ✓ +13 Si                | ruote e pistoni  |

# PROPRIETA' MECCANICHE

- La serie 1000, le leghe Al-Mn senza Mg (serie 3000) le leghe Al-Mg con  $Mg < 2\%$  (serie 5000) si collocano su un livello di caratteristiche medio basse ( $HB = 20 - 40$ )
- Le leghe Al-Mn con Mg (serie 3000), le leghe Al-Mg con  $Mg > 2\%$  (serie 5000), le leghe Al-Mg-Si (serie 6000) hanno caratteristiche medie ( $HB = 40 - 80$ )
- Le leghe Al-Cu (serie 2000), Al-Zn-Mg (serie 7000) e Al-Zn-Mg-Cu (serie 7000) possono dare caratteristiche elevate ( $HB = 80 - 150$ )
- Per quanto riguarda la resistenza a fatica, le leghe di Al non hanno un andamento di tipo asintotico e, in generale, l'alligazione aumenta la resistenza fatica (migliori Cu, Mg, Si rispetto a Mn).

- L' alluminio e le sue leghe non presentano fenomeni di fragilita' alle basse temperature; da cui ne consegue la piena idoneita' di questi materiali per applicazioni criogeniche (fino a -200 -250 °C)

- Una delle principali caratteristiche delle leghe di Al e' l'elevata resistenza alla corrosione (presenza di uno strato di Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)

Il metallo e' tanto piu' resistente alla corrosione quanto piu' e' puro. Ogni alligante ha pero' un suo effetto particolare:

**Fe, Si, Mn** effetti ridotti e al massimo favoriscono deboli fenomeni di alterazione localizzata

**Cu** esercita un effetto negativo se e' l'alligante principale (serie 2000), comunque dipende molto dalle condizioni di invecchiamento.

**Zn** effetto molto negativo

**Mg** queste leghe presentano la migliore combinazione possibile tra resistenza alla corrosione e caratteristiche meccaniche, al punto che sono quelle usate in ambiente marino.

# LEGHE DEL TITANIO

Il TITANIC e' rimasto indisturbato sul fondo del mare per 70 anni finche' un piccolo sottomarino, il NAUTILUS, fatto in TITANIO non ha permesso di scendere a quasi 4000 m di profondita'

A Denver (DIA) c'e' l'arco in TITANIO piu' lungo al mondo. Connette due parti del terminal dei voli internazionali. E' lungo 45 m e pesa solo 700 Kg

Nel 1795 un chimico tedesco (M.H. Klaproth) identifica il rutilo ( $TiO_2$ ) e lo chiama titanio in onore di Titano il dio greco dall' enorme forza



Lo stimolo per lo studio del **TITANIO** e delle sue leghe nei passati quarant'anni venne inizialmente dall'industria aerospaziale, in quanto nacque l'esigenza di avere un materiale con un buon rapporto resistenza peso specifico ad elevate temperature. L'alto punto di fusione del titanio (**1678 C**) prevedeva una buona resistenza allo scorrimento viscoso a temperature piu' elevate di quelle degli acciai.

Benche' le successive ricerche rivelassero che il campo di esercizio risultava piu' stretto del previsto, oggi il titanio occupa una posizione di fondamentale importanza in questo settore per la buona resistenza alla fatica, al creep e per la buona tenacita' alla frattura, infatti l'80 - 90% del suo utilizzo e' tutt'ora nell'industria aerospaziale.

L'alto costo e' principalmente il risultato della sua alta reattivita' ed affinita' per i componenti interstiziali come l'ossigeno, l'azoto, l'idrogeno ed il carbonio. Cio' nonostante questo metallo compete in molte aree con i piu' comuni materiali per le sue speciali proprieta'.

Inoltre il titanio e le sue leghe mostrano una notevole resistenza alla corrosione in generale e ai fluidi corporei in particolare, la quale e' superiore agli acciai inossidabili. Questo fattore insieme alla buona resistenza allo "stress corrosion", alle gia' citate proprieta' meccaniche e alla tolleranza accettabile da parte dei tessuti umani ne fa un leader dei biomateriali, tanto che viene usato per la realizzazione delle protesi ossee, placche, viti, valvole cardiache etc.



La resistenza del titanio all'acqua di mare e' paragonabile a quella del platino, la resistenza all'erosione e' anche altissima (acqua di mare ad alta velocita' e vapore in pressione), 20 volte quella delle leghe Cu-Ni.

Il titanio e le sue leghe sono quindi materiali ingegneristicamente nuovi e costosi, infatti nonostante il titanio sia il quarto metallo per abbondanza sulla crosta terrestre, l' estrazione del minerale e' stata messa a punto solo recentemente e la sua produzione e' ancora oggi complessa.

## Proprieta'

Il titanio puro e' polimorfo esistendo in due modificazioni:

1. il titanio  $\alpha$ , a reticolo esagonale compatto stabile fino a 882 C
2. il titanio  $\beta$ , cubico a corpo centrato stabile tra 882 C e la temperatura di fusione che e' di 1678 C.

Le proprieta' del titanio a temperatura ambiente sono notevoli

3. densita' = 4,51 g/cm<sup>3</sup>

4.  $\sigma_y = 460$  MPa e  $\sigma_T = 560$  MPa  $\epsilon = 22\%$ , HB = 200 -

220

5. se pero' viene laminato  $\sigma_T = 800 \text{ MPa}$  e  $\varepsilon = 8\%$

6. modulo di Young = **114 GPa**

7. non e' **magnetico**

8. Conducibilita' termica =  $19 \text{ W/m C}$

9. Coefficiente di espansione termica =  $8,4 \times 10^{-6} \text{ C}$

Dal punto di vista della resistenza alla corrosione il titanio ha un ottimo comportamento in molti ambienti paragonabile a quello di un acciaio inossidabile 18/8.

Quale elemento puro viene introdotto (1 - 3%) in leghe refrattarie austenitiche per palette di turbine (forma composti interstiziali e intermetallici che migliorano le caratteristiche di resistenza al creep.

Puo' essere laminato a freddo a temperatura ambiente e si ha una riduzione fino il 90% in spessore senza l'insorgere di cricche critiche.

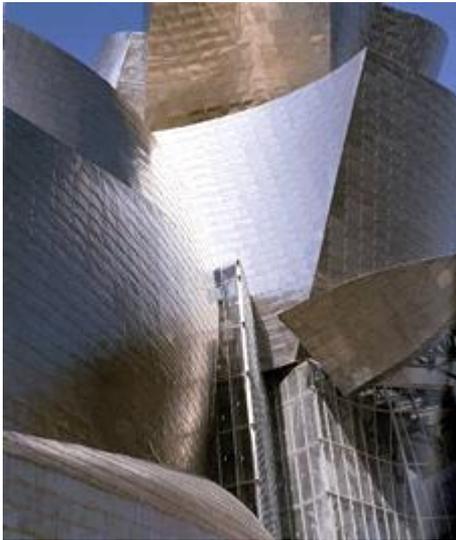
L'alta duttilita' del **titanio** e' dovuta ai molteplici sistemi di scorrimento della struttura EC con basso  $c/a$ , infatti il piano basale (0001) e' il piano di massima densita' atomica ed e' generalmente il piano di scorrimento per i metalli EC quali zinco, cadmio e magnesio che hanno un alto rapporto  $c/a$ .

Invece per i metalli con un basso  $c/a$  tra i quali il titanio, lo scorrimento avviene comunemente sui piani prismatici  $\{1010\}$  e sui piani piramidali  $\{1011\}$  dato che il piano basale perde la caratteristica di essere quello a massima densita'.

La fortuna del titanio è dovuta alle sue straordinarie caratteristiche fisiche, meccaniche e di resistenza alla corrosione, ed alla facilità con cui lo si lavora e lo si mette in opera.

Questo metallo ha infatti elevato punto di fusione (1650 °C), bassa densità (4,5 g/cm<sup>3</sup> contro 7,9 g/cm<sup>3</sup> dell'acciaio), basso coefficiente di dilatazione termica (la metà di quello degli acciai inossidabili, pressappoco uguale a quello del vetro o del calcestruzzo). Non è magnetico. Ha un tempo di dimezzamento radioattivo molto ridotto, notevoli capacità di attenuare il rumore.

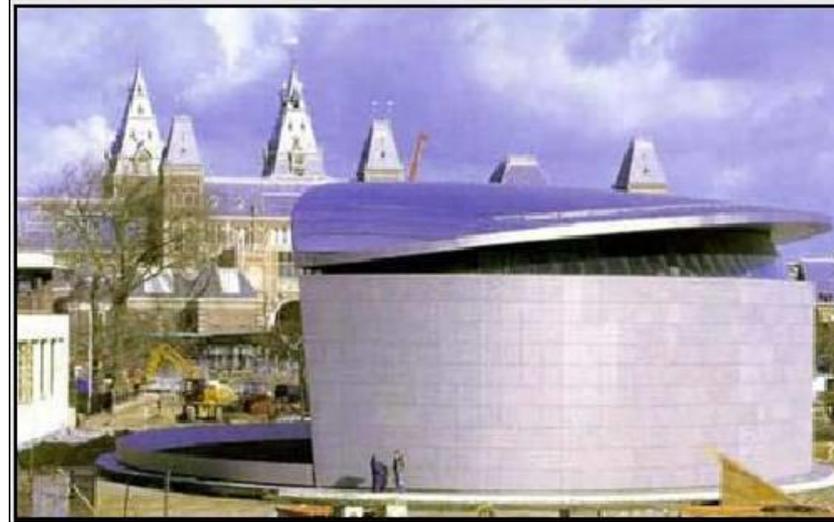
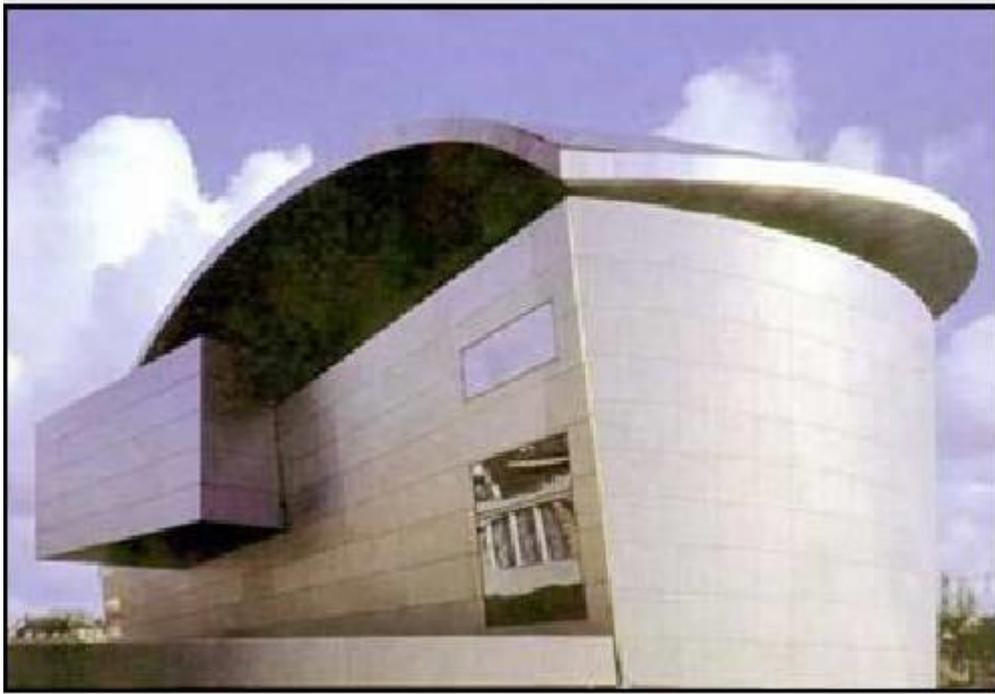
La sua resistenza meccanica è comparabile con quella dell'acciaio al carbonio, ma il rapporto resistenza meccanica/densità è molto più elevato. Se si considerano le sue leghe, in particolare quella più diffusa con vanadio (4%) e alluminio (6%), questo rapporto migliora ulteriormente. Anzi, nell'intervallo di temperatura compreso tra 200 e 500 °C, che è di grande interesse per l'industria aeronautica, i materiali a base di titanio sono nettamente superiori ai loro concorrenti. In aggiunta, il titanio è duttile e tenace, non infragilisce neppure a temperature molto basse, possiede un modulo elastico inferiore a quello dell'acciaio (1.300.000 MPa contro 2.000.000 MPa) e per alcune applicazioni anche questo può essere un vantaggio.



CONFRONTO PROPRIETA' FISICHE DEI METALLI					
	TITANIO CP	FERRO	ACCIAIO AISI 304	ALLUMINIO	RAME
PESO SPECIFICO g/cm <sup>3</sup>	4,5	7,3	7,9	2,7	8,9
PUNTO DI FUSIONE °C	1668	1530	1400-1420	660	1083
CONDUCIBILITA' TERMICA Cal/cm <sup>2</sup> /sec°C/cm	0,041	0,15	0,039	0,49	0,92
MODULO DI Y. N/mm <sup>2</sup>	10850	21000	20400	6900	11000

### ***Frank O. Gehry - Museo Guggenheim di Bilbao con rivestimento in lamiera di titanio***

L'architetto F. Gehry ha impiegato per l'involucro esterno il titanio in un modo che è risultato fortemente innovativo, sia per avere utilizzato un materiale fino allora mai utilizzato per questo scopo, sia per essere ricorso ad una tecnologia di software IBM, il programma CATIA 3D, fino ad allora applicato esclusivamente in campo aerospaziale.

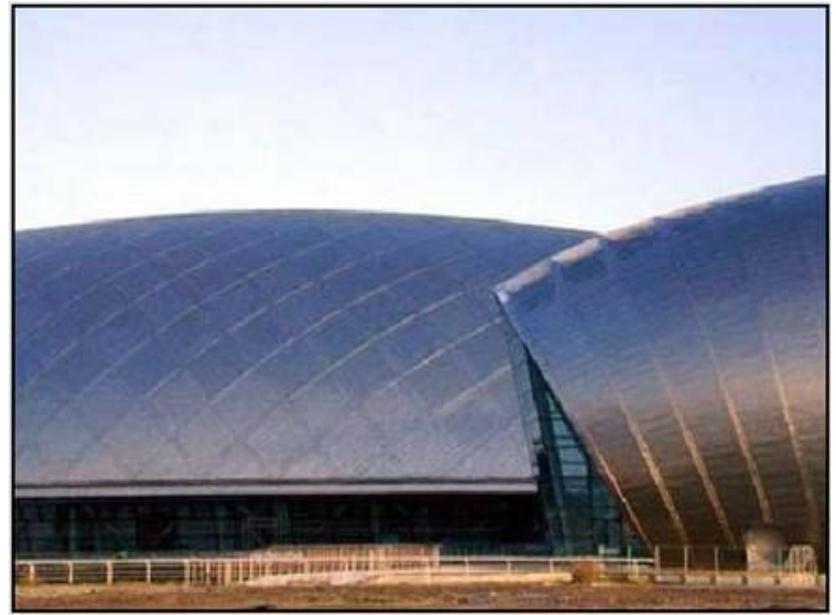
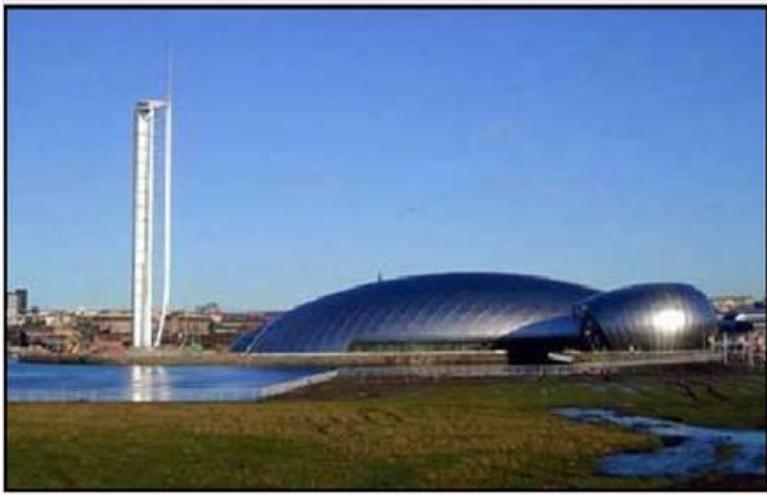


## **Ampliamento Van Gogh Museum**

Località: Amsterdam, Olanda; Architetti: Kisho Kurokawa . Giappone

Materiale: Titanio CP Grado 2

Produzione: TIMET Applicazione: 4.275 kg di pannelli per coperture 120 x 201 cm, spessore 5/10mm  
e 2.025 kg di pannelli da parete 120 x 345 cm, temprati e decapati.



## **Centro Nazionale delle Scienze . Scozia**

Località: Glasgow, Scozia; Architetti: Building Design Partnership - Glasgow

Materiale: Titanio CP Grado 1 ; Produzione: TIMET

Applicazione: 9.270 mq. di rivestimento esterno, a grandi lastre, spessore 4/10m

