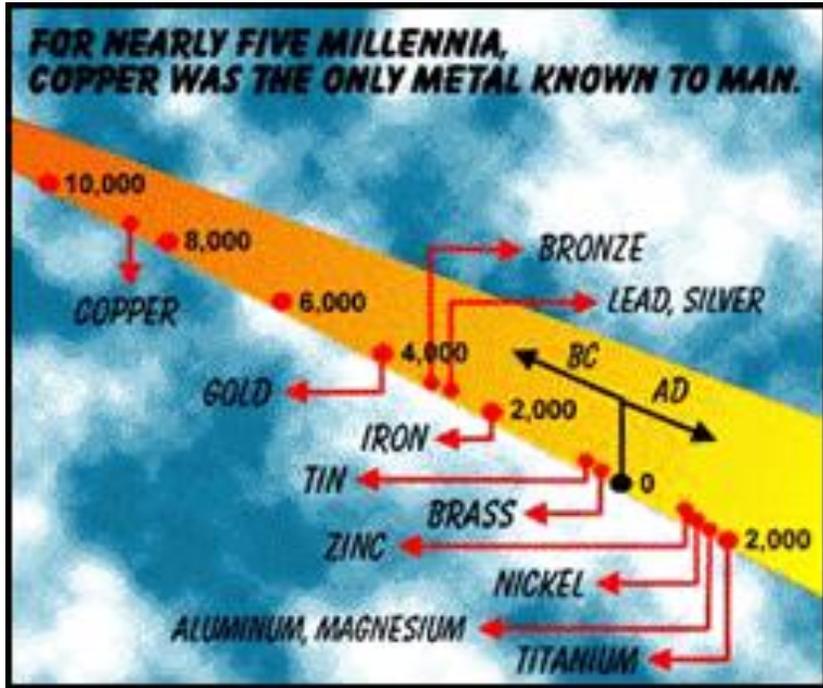


IL RAME E LE SUE LEGHE



Il rame e le sue leghe furono fra i primi materiali metallici prodotti piu' di 5.000 anni fa (ad esempio i bronzi, leghe Cu-Sn sono facilmente fusibili e colabili anche in forme particolari e sufficientemente duri).



Copper-tin pulleys from King Henry VIII's flagship, the Mary Rose, which sank off Portsmouth, England in 1545.

L'impiego del rame e' ancora oggi molto diffuso perche' esso possiede una gamma di proprieta' che nel loro insieme nessun altro materiale di uso industriale puo' vantare.

Le principali proprietà sono :

1. elevata conduttività elettrica e termica (solo **l'argento** ha una conduttività superiore)
2. facilità di formatura ed elevata plasticità sia a caldo che a freddo con possibilità di elevato incrudimento
3. facilità di entrare in lega con molti altri metalli per dar luogo ad un gran numero di materiali dotati di una gamma vastissima di proprietà
4. eccellenti caratteristiche meccaniche anche a bassissima temperatura senza rischio di fragilimento
5. buona resistenza alla corrosione in molti ambienti
6. facilità di elettrodeposizione
7. facilità di giunzione mediante elettrodeposizione o brasatura
8. possibilità di colorazioni decorative
9. facilità nella riutilizzazione dei rottami, sfridi etc.

- **Lavorabilità alle macchine utensili** E' buona. E' migliore per gli ottoni (leghe rame-zinco).
- **Lavorabilità per deformazione plastica** E' buona. Si possono fabbricare semilavorati. Si ha però fragilità se la lavorazione avviene tra i 200 ed i 600 °C. La lavorazione meccanica a freddo fa aumentare la durezza e la resistenza a trazione e fa diminuire l'allungamento.
- **Fusibilità e colabilità** Il rame è fusibile perché fonde a 1084 °C. Le sue leghe fondono a temperature ancora inferiori. La colabilità del rame e delle sue leghe è buona anche se colata del rame presenta difficoltà perché il rame liquido assorbe e discioglie notevoli quantità di gas che, durante la solidificazione, rimangono imprigionati nella massa metallica, originando soffiature. Il rame allo stato liquido, ed anche alle alte temperature, si ossida formando l'ossidulo di rame Cu_2O , provocando fragilità. Per tutto questo è necessario utilizzare disossidanti od atmosfere protettive durante la colata del rame

Saldabilità Il rame e le sue leghe sono saldabili, soprattutto col metodo della brasatura.

Nel caso di saldatura ossiacetilenica, data l'elevata conducibilità termica, occorrono cannelli potenti, e si impiega acetilene depurato e fiamma neutra a bassa pressione di ossigeno.

Nel caso di saldatura elettrica ad arco, data l'elevata conducibilità termica, si ha un eccessivo consumo di corrente per fondere i lembi da saldare.

Nel caso di saldobrasatura occorre preriscaldare ad una temperatura di circa 850 [°C].

- **Resistenza alla corrosione** E' buona.

- **Resistenza alle basse temperature** Il rame non è fragile alle basse temperature.

- **Resistenza alle alte temperature** Lo scorrimento viscoso dei piani atomici dei reticoli cristallini del rame compare per temperature maggiori di 150 [°C].

L'argento con 0,1 % ed il cromo con l'1 % rendono possibile l'impiego del rame fino a 300 [°C].

Si puo' inoltre sottolineare che:

1. alcune leghe del rame (specialmente ottoni e alpacche) presentano un'ottima lavorabilita' alle macchine utensili e si possono stampare a caldo
2. alcune leghe (cuprallumini e cupronichel) hanno una eccezionale resistenza a tutti i tipi di corrosione in acqua marina
3. ottoni e bronzi possiedono una colabilita' elevata e quindi estremamente facile produrre getti
4. il rame puro e alcune sue leghe si lasciano smaltare con facilità
5. il rame non e' magnetico

Tra le industrie quella produttrice ed utilizzatrice di **energia elettrica** assorbe piu'del 50% del consumo annuo di rame. Un seconda, grande utilizzatrice e' **l'industria chimica** (per la conducibilita' termica, resistenza alla corrosione, saldabilita', malleabilita').

L'industria meccanica lo usa in molte macchine utensili. In **edilizia** il tubo di rame e' molto usato per le sue caratteristiche meccaniche e per la facilità di giunzione: Il lamierino di rame viene spesso usato per coperture di tetti e facciate.

- **Conducibilità termica**

Il rame ha un coefficiente di conducibilità termica di $372 \text{ [J/m} \cdot \text{s} \cdot \text{°C]}$ La conducibilità è ottima per tutte le leghe del rame.

- **Conducibilità elettrica**

Il rame ha una resistività pari a $0,0167 \text{ [}\Omega\text{]}$

Il rame è il metallo che ha la maggiore conducibilità elettrica (dopo l'argento); va bene quindi per la costruzione di conduttori elettrici.

- **Dilatazione termica**

Il rame ha un coefficiente di dilatazione termica pari a $17 \cdot 10^{-6} \text{ [1/°C]}$

- **Modulo di elasticità**

$E = 125 \text{ GPa}$

- **Densità** di $8,89 \text{ [g/cm}^3\text{]}$

Le principali leghe del rame sono

1. ottoni (Cu-Zn)
2. bronzi (Cu-Sn)
3. cuprallumini (Cu-Al noti come bronzi d'alluminio)
4. cupronichel (Cu-Ni)
5. alpacche (Cu-Ni-Zn detti anche argentoni)

Il rame, come le sue leghe, e' usato sia in getti che sotto forma di semilavorati

RAME PURO

filo 76%

barre e profilati 4%

laminati piatti 8%

tubo 12%

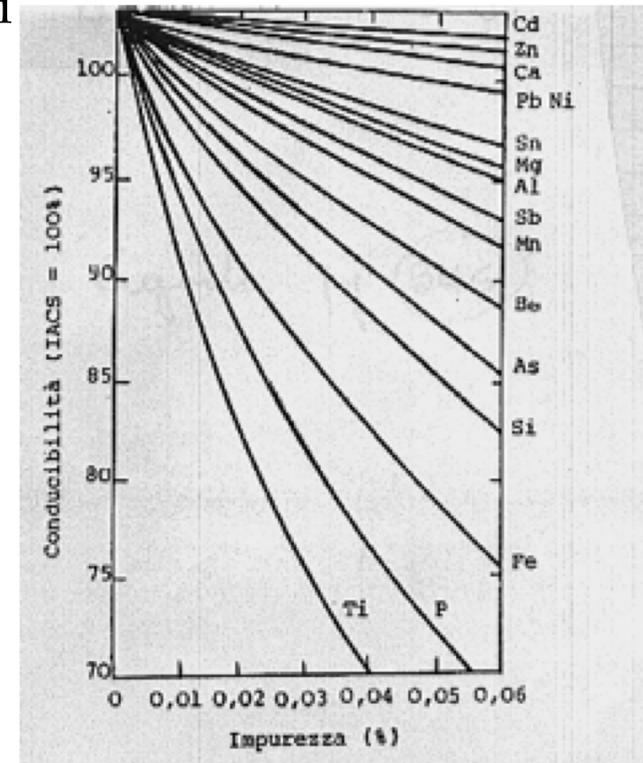
LEGHE DEL RAME

filo 7%

barre e profilati 50%

laminati piatti 32%

tubo 11%



Le norme prevedono due classi di rame in funzione del titolo posseduto

RAME RAFFINATO (Cu \geq 99,99%)

RAME BASSO LEGATO (Cu \geq 99%)

Conviene sottolineare che il rame e' il metallo industriale piu'adoperato nel mondo allo stato puro.

Questo perche':

1. il rame rappresenta un elemento fondamentale per ogni apparecchiatura elettrica ed e' quindi essenziale per lo sviluppo tecnologico di ogni paese
2. facilita' di raffinazione e quindi possibilita' di ottenere metallo molto puro anche partendo da rottami: Circa il 40% del rame proviene da rottami.

RAME RAFFINATO

Si distinguono tre qualita' principali di rame raffinato (99,99%)

1. rame contenente ossigeno
2. rame disossidato
3. rame esente da ossigeno

Rame contenente ossigeno: e' universalmente noto con la denominazione "tough-pitch". L'ossigeno presente e' sotto forma di ossidulo Cu_2O e, in questo tipo di rame, e' solitamente presente in quantita' 0,02 - 0,05% e deriva dal processo di raffinazione. Durante la solidificazione il Cu_2O forma con il Cu un eutettico che si dispone al bordo di grano. *Nella lavorazione a caldo, questa rete di eutettico viene frantumata e dispersa nella massa sotto forma di particelle finissime.*

La presenza di quest' ossido ha un ruolo importantissimo nella lavorabilita' a caldo. Infatti a queste temperature, alcune impurezze (Pb e Bi) si scioglierebbero nella matrice infragilendola. Poiche' l'ossigeno ha per questi due elementi un'affinita' molto maggiore di quella per il rame, si formano ossidi stabili con Pb e Bi che non pregiudicano la lavorabilita'. Tuttavia l'ossigeno non deve superare lo 0,06% se si desidera evitare difficolta' durante le lavorazioni a freddo (trafilatura). Dal punto di vista della conduttivita' elettrica, l'ossigeno ha un effetto benefico in quanto si combina con buona parte delle impurezze, che altrimenti rimarrebbero in s.s.; invece si formano ossidi insolubili che non pregiudicano la conduttivita' elettrica. La presenza dell'ossigeno comporta rischi di infragilimento delle matrice per $T > 400 \text{ C}$ e in presenza di H_2 . L' H_2 diffonde velocemente e reagisce con l' O_2 formando "bolle" di H_2O ad elevatissima pressione.

I rami contenenti ossigeno sono disponibili in tre tipi:

1. rame elettrolitico “tough-pitch” Cu-ETP UNI 5649-65 (ETP = eletrolitic tough pitch)
2. rame tuogh-pitch raffinato a fuoco, ad elevata conduttivita' elettrica - sigla Cu-FRHC (fire refined high conductivity)
3. rame tough-pitch raffinato a fuoco per applicazioni non elettriche - sigla Cu-FRTP (fire refined tough pitch)

Applicazioni :

1. **campo elettrico:** cavi, conduttori per linee aeree, avvolgimenti motori, trasformatori, contatti, anodi....
2. **campo chimico:** bollitori, distillatori, tini, vasche....
3. **campo meccanico :** scambiatori di calore, radiatori, guarnizioni, chiodi, rivetti ...
4. **campo civile:** grondaie, rivestimenti, decorazioni ...

Rame disossidato: quando nell' utilizzo del rame e' prevista la saldatura si deve utilizzare rame disossidato, ossia rame ottenuto mediante aggiunta di un agente riducente al metallo liquido, dopo la raffinazione e prima della colata. L'agente piu' usato (efficace e di basso costo) e' il **fosforo** che viene aggiunto come lega madre Cu-P al 15% (altre volte si usa: Li, Na, Ca, B). L'agente riducente viene aggiunto in eccesso e quindi parte di esso rimane in s.s. nel rame; nel caso del fosforo, esso riduce anche in quantitativi bassissimi la conducibilita' elettrica e quindi i prodotti di questo tipo non hanno applicazioni elettriche (a meno che $P < 0,012\%$). **Il rame disossidato ha una resistenza elevata, una durezza e una resistenza alla corrosione superiori a quelle del rame, ma ha una conducibilità inferiore.**

Il rame disossidato e' disponibile come:

1. Cu disossidato a basso tenore residuo di fosforo

Cu-DLP (deoxydised low phosphorus)

1. Cu disossidato ad elevato tenore residuo di fosforo

Cu-DHP (deoxydised high phosphorus)

Rame esente da ossigeno: i catodi selezionati per la loro elevata purezza vengono rifusi in speciali forni elettrici ad induzione nei quali si crea il vuoto e un' atmosfera riducente ma non si effettuano aggiunte di agenti riducenti. Terminata la fusione, si cola il metallo in speciali lingottiere mantenute sotto vuoto: Questo rame non contiene né Cu_2O né tracce di disossidante e la sua purezza è $>99,95\%$.

La sigla dei rami esenti da ossigeno è: **Cu-OF (oxygen free)**

Applicazioni tipiche sono soprattutto nel settore elettrico e in tutti gli impieghi che richiedono elevata conducibilità senza rischi di rotture per H_2 .

ROTTAMI

Vista l'importanza che i rottami rivestono nel mercato del rame vi e' una [norma UNI 3398](#) che caratterizza le categorie di rottami e torniture di rame:

I CATEGORIA: rame rosso elettrolitico in fili, barre etc; con diametro o spessore $\geq 1,5$ cm, non bruciati, puliti, assolutamente esclusi i pezzi saldati, stagnati, nichelati, smaltati e ricoperti

II CATEGORIA: rame rosso in:

- fili, barre, piatti con diametro o spessore $> 0,5$ mm anche bruciati ma non infragiliti
- ritagli di lastre con spessore $> 0,5$ mm
- demolizioni di caldaie, serbatoi, recipienti con spessore $> 0,5$ mm
- tubi e spezzoni di tubi con spessore $> 0,5$ mm
- corone di forzamento di proiettili di artiglieria
- **Materiale pulito, escluse parti saldate, stagnate...**

III CATEGORIA: rame in:

- fili con diametro $> 0,5$ mm anche stagnati o saldati, bruciati ma non infragiliti
- barre, lastre, piatti, tubi con saldature, spessori $> 0,5$ mm
- vasellame anche stagnato ma esente da Fe

IV CATEGORIA: rame in:

- fili con diametro $< 0,5$ mm
- fili resi fragili
- rottami esclusi radiatori e rottami di galvanotipi

CARATTERISTICHE ELETTRICHE DEL RAME

Data l'enorme importanza del rame nel settore elettrolitico, nelle norme viene sempre specificato, per semilavorati destinati ad impieghi elettrici (specialmente fili), il valore minimo della conduttività elettrica.

Si usa far riferimento a un valore campione, stabilito dallo I.E.C. (international electrical commission) per il rame ricotto a 20 C, pari a 58 m/Ω·mm·mm definito nel 1913). Questo valore viene assunto come base percentuale = 100% e in molte norme e' prescritto che la conducibilità non deve risultare inferiore al 98% di tale valore (cioe' 56,85).

Nella pratica commerciale, il rame per usi elettrici raggiunge facilmente conduttività dell'ordine del 101% e anche 102%; pezzi purissimi anche il 103,5% (6 m/Ω·mm·mm).

La conduttività elettrica del rame e' fortemente influenzata dal tenore di impurezze, soprattutto di quelle che entrano in s.s. (questi atomi, nel reticolo cristallino, ostacolano il moto degli elettroni).

Anche l'incrudimento, in quanto introduce una distorsione del reticolo cristallino, riduce la conduttività'. Questa riduzione e' comunque inferiore a quella prodotta dalle impurezze (un rame puro che presenti conduttività' 100% IACS dopo incrudimento ha conduttività' \cong 97%).

Le leghe del rame non possono avere la conduttività' del rame puro, devono venir selezionate solo quando altre caratteristiche (prop. meccaniche) ne consigliano l'impiego.

Riportiamo le percentuali di impurezze che riducono la conduttività al 98%

P \cong 0,0006%

As \cong 0,0027%

Al \cong 0,004%

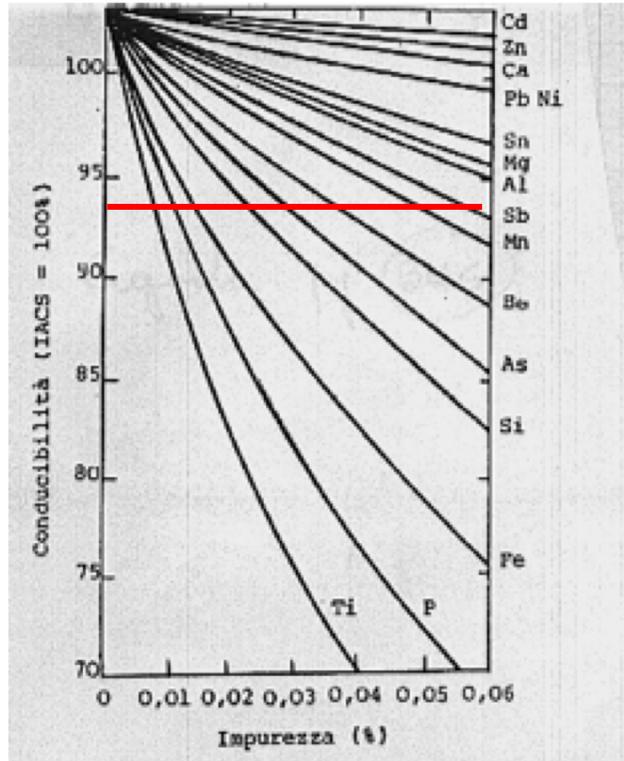
Fe \cong 0,012%

Sb \cong 0,012%

Sn \cong 0,03%

Si \cong 0,03%

Zn \cong 0,05%



Ag, Au, Bi, Cd, Pb, S, Te, O₂ richiedono percentuali > 0,1%.

EFFETTO DELLO STATO FISICO: anche lo stato fisico influenza la conducibilità del rame. I getti hanno raramente conduttività superiori ai 100% IACS (normalmente 75%) sebbene, grazie a trattamenti speciali, si possa ottenere il 95%.

ALTRE CARATTERISTICHE FISICHE DEL RAME

1. Densità 8,94 g/cm³ (getti 8,8 - 8,9 g/cm³)
2. Temperatura di fusione 1083 C
3. Coefficiente di dilatazione termica $17,7 \cdot 10^{-6}$ (20-300 C)
4. Calore specifico 0.0092 cal/g·C (a 20 C)
5. Conducibilità termica 393,5 W/m·K
6. Modulo di Young 125 GPa

RAME BASSO LEGATO

Sono LEGHE di rame contenenti un elemento aggiunto non superiore all' 1%.

RAME ALL' ARGENTO

Esistono tre qualità di rame all' argento

1. Cu-LSTP (low silver tough pitch) Ag = 0,02-0,12% , contiene piccole quantità di Ag e anche ossido di argento
2. Cu-HSTP (high silver tough pitch) Ag = 0,12-0,25%, alto contenuto di Ag, accompagnato dal suo ossido
3. Cu-OFS (oxygen free silver) Ag = 0,027-0,12%, basso contenuto di Ag **ma esente da ossigeno**

Le tre qualità del rame all' argento hanno caratteristiche elettriche e termiche molto prossime a quelle del rame.

La nuova proprietà è il notevole innalzamento della temperatura di ricristallizzazione (sale di 150 C per aggiunte dello 0,08% di Ag). Il rame all' argento incrudito mantiene le sue caratteristiche meccaniche anche a temperature ben più elevate di quelle a cui normalmente il rame "ricuoce" ad es. il rame perde le sue caratteristiche meccaniche dopo una ora a 175 C, quello all' argento deve venir portato a temperature >300 C. L' argento aumenta anche la resistenza al creep (es. con Ag = 0,1% il Cu-Ag presenta a 225 C la stessa resistenza al creep di un rame elettrolitico a 130 C).

Le applicazioni sono: lamelle di collettori; avvolgimenti di rotorì ove ci siano elevate velocità periferiche.

RAME AL CADMIO E CADMIO-STAGNO

Le norme prevedono i seguenti materiali

1. **Cu-Cd** (Cd 0,5-1,5%) [Cu Cd0,5 - Cu Cd1 - Cu Cd1,5]
2. **Cu-Cd-Sn (bronzo telefonico)** Cd =0,2-1%, Sn =0,2-1%

L'effetto del **cadmio** e' molto simile a quello dell' argento, ma in piu' impartisce un' eccezionale resistenza meccanica se il materiale e' incrudito per trafilatura (es. fili sottili raggiungono i 65 kg/mm² con resistenza a fatica del 50% superiore a quella del rame puro).

La conduttivita' elettrica diminuisce al 80-90% IACS.

Viene usato per le linee elettriche e telefoniche tranviarie e ferroviarie.

Il Cu-Cd-Sn ha il suo maggior pregio nell' elevatissimo carico di rottura conferitogli dal Sn (mentre la conduttivita' elettrica cala al 55-75%). Viene sempre piu'sostituito dal Cu-Cd, ma continua ad essere utilizzato ove e' richiesta una elevata σ_t .

RAME-TELLURIO RAME-ZOLFO

1. Cu - Te sigla CuTe: Te = 0,3-0,8%
2. Cu - S sigla CuS: S = 0,2-0,5%

In entrambi i casi l' elemento alligante e' presente sotto forma di inclusioni microscopiche che favoriscono la formazione di trucioli corti durante la lavorazione dell' utensile.

Questi materiali vengono impiegati nella fabbricazione di prodotti finiti che necessitano contemporaneamente di un' elevata conduzione elettrica e un gran numero di lavorazioni meccaniche, specie su macchine automatiche.

La conduzione e' per entrambi $\cong 95\%$ IACS e la lavorabilita' e' paragonabile a quella dell'ottone da torneria.

Usato per bulloneria, per morsetti, piccoli componenti...

RAME-ARSENICO

Cu-DPA (deoxidised phosphorus arsenical)

As=0.15-0.5% P=0.013-0.05%

(viene chiamato rame disossidato al fosforo con arsenico).

E' caratterizzato da una resistenza all'ossidazione a caldo sensibilmente superiore a quella presentata dalle altre qualita' di rame. L' Arsenico inoltre aumenta la temperatura di addolcimento e quindi aumenta la resistenza al creep. Lo si usa per preriscaldatori, piastre di focolai di locomotive, bruciatori...

Essendo disossidato puo' venir brasato, saldato etc. La presenza di fosforo ne abbassa notevolmente la conduttivita' elettrica, quindi non trova applicazione nel settore elettrico.

LEGHE DA BONIFICA (*tempra + rinvenimento*)

RAME-CROMO

Aggiungendo circa **l'1% di cromo** si ottiene una lega da bonifica dotata di

1. Conducibilita' elettrica maggiore dell' 80% IACS
2. $\sigma_t = 35 \text{ kg/mm}^2$ (getti) e 41 kg/mm^2 (semilavorati)

Se poi si fa anche un incrudimento si possono raggiungere $\sigma_t = 55 \text{ kg/mm}^2$.

Il materiale resiste molto bene alle temperature elevate, puo' venire usato anche per lunghi periodi a **350 C**. Si fabbricano elettrodi per saldatura a resistenza, componenti di motore a gabbia di scoiattolo destinati a lavorare in condizioni di alta sollecitazione a temperature elevate.

RAME-ZIRCONIO

E' una delle leghe piu' recenti (10-15 anni) ed e' stata sviluppata negli USA per applicazioni su macchine rotanti ad alta velocita' e alta temperatura per componenti aeronautici. Da questo studio e' emerso che l' aggiunta dello 0,15% di Zr al Cu esente da ossigeno produce una lega da bonifica con ottime caratteristiche meccaniche che puo' sostituire la lega Cu-Cr in quanto la conducibilita' elettrica e' **maggiore del 90 %** IACS, con $\sigma_t = 50 \text{ kg/mm}^2$. Inoltre questa lega e' molto tenace, caratteristica importante per certi componenti come lamelle di collettori con incastro a coda di rondine.