



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



**Politecnico  
di Torino**



**BLISS**



# ***Sistemi di produzione***

**I materiali per la produzione**



**Dario Antonelli**



# Introduzione alla lezione

- Conoscere gli elementi caratteristici di metalli e polimeri
- Distinguere i campi di impiego dei diversi materiali in funzione delle loro caratteristiche chimico-fisiche
- Conoscere l'effetto dei principali trattamenti termici e superficiali
- Saper valutare l'effetto della temperatura sulla formazione dei legami polimerici





# Moduli del corso

**A: Produzione**

*B: Formatura*

*C: Deformazione*

*D: Taglio e Controllo Numerico*

*E: Altri processi*





# Lezioni del modulo A

1. Introduzione al Corso
2. Il sistema produttivo
3. Nuovi concetti in produzione
- 4. I materiali**
5. La misura della durezza
6. Le prove meccaniche distruttive
7. La meccanica dei materiali
8. Le prove non distruttive

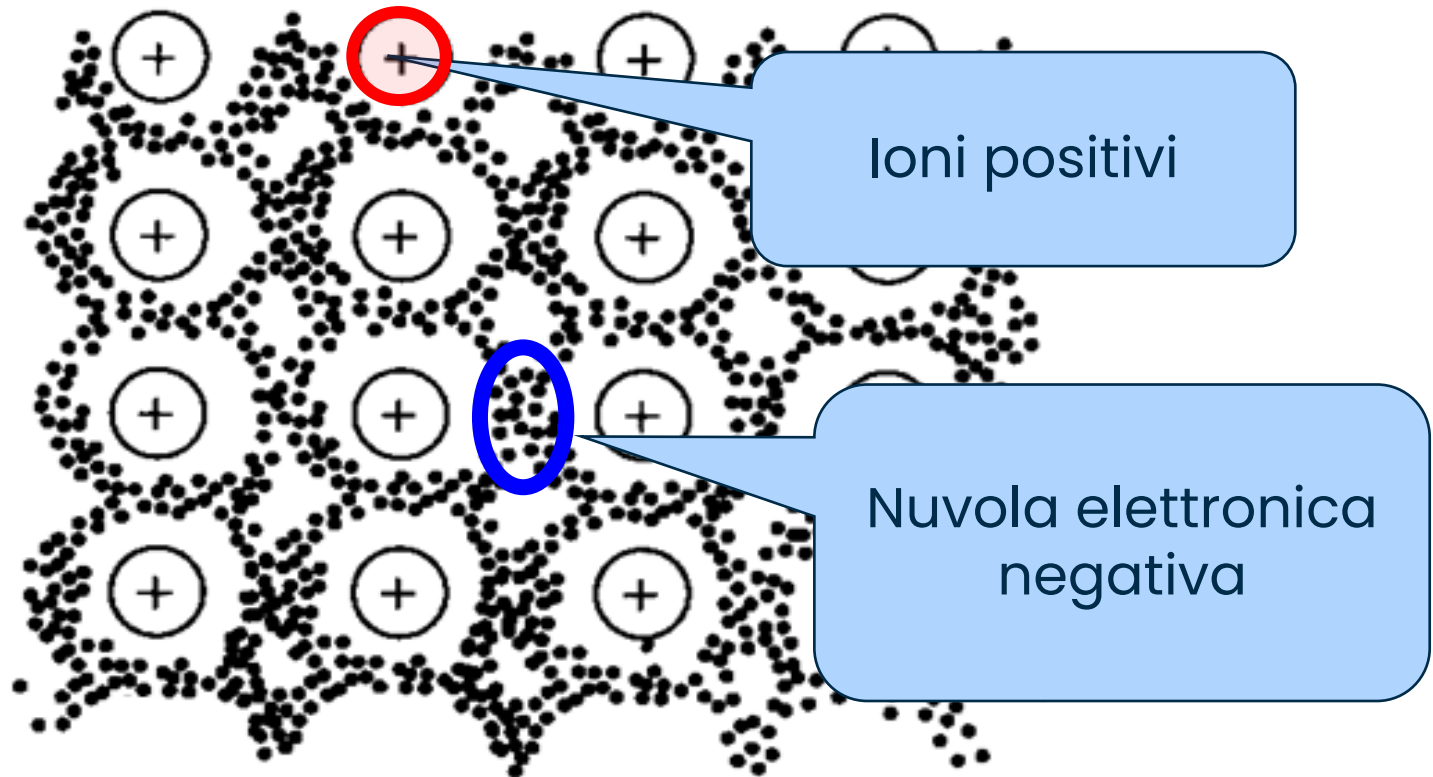




# I materiali



# Legame metallico





# Legame metallico

- Gli elettroni costituiscono cariche vaganti negative che si insinuano nello spazio tra gli ioni (positivi)
- La coesione è stabilita dalle forze di attrazione tra la nuvola elettronica (-) e gli ioni (+)
- Se gli ioni si allontanano tra loro, la nuvola elettronica tende a riportarli in una posizione equilibrio stabile
- Configurazione di minima energia





# Reticolo cristallino

- Struttura composta da un elevato numero di ioni metallici distribuiti nello spazio a formare il **reticolo cristallino**
- La più piccola porzione di volume che viene ripetuta è denominata **cella elementare**



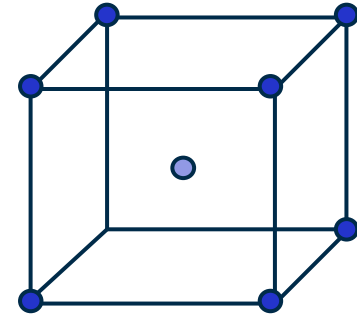




# Celle elementari comuni

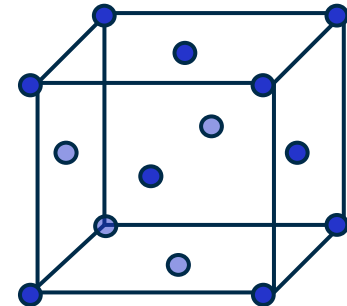
Cubica a  
corpo centrato  
(CCC)

- **ferro- $\alpha$**  (forma allotropica stabile  $< 770^\circ\text{C}$ )
- vanadio (V), molibdeno (Mo)
- tungsteno (W)
- cromo (Cr)



Cubica a facce  
centrate (CFC)

- **ferro- $\gamma$**  (forma allotropica stabile tra  $910 - 1410^\circ\text{C}$ )
- alluminio (Al)
- cobalto- $\beta$  (Co- $\beta$ ), rame (Cu)

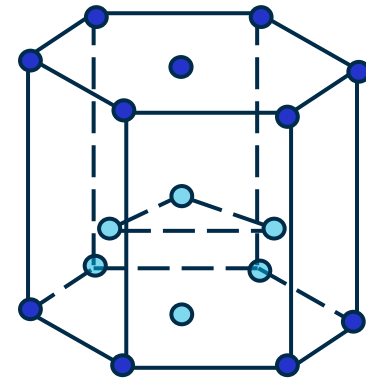




# Celle elementari comuni

Struttura  
cristallina  
esagonale  
compatta

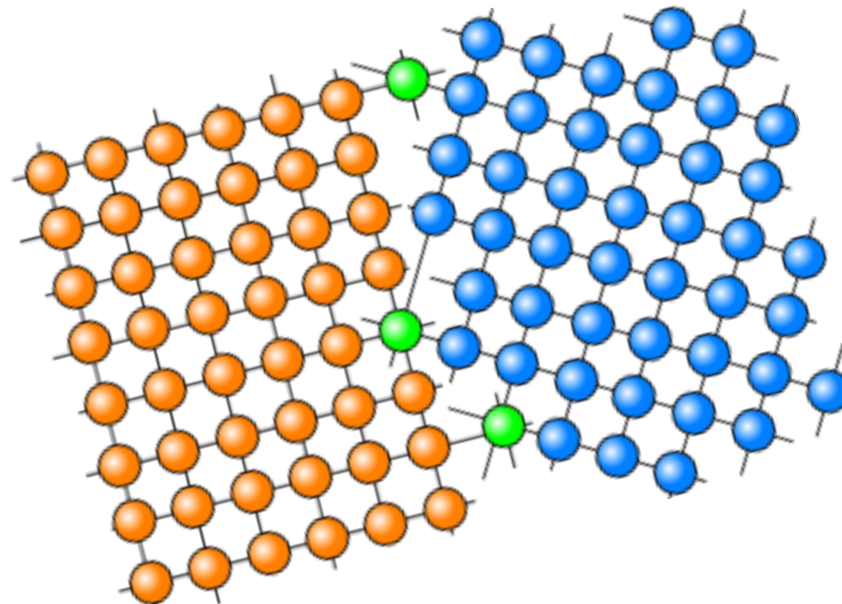
- magnesio (Mg)
- zinco (Zn), cadmio (Cd), berillio (Be)
- cobalto-  $\alpha$  (Co-  $\alpha$  )
- titanio-  $\alpha$  (Ti-  $\alpha$  )





# Grano cristallino

- Insieme di reticoli con medesimo orientamento
- Metalli: strutture policristalline
- Dimensioni grano incidono su proprietà meccaniche
- Esempio: >dimensioni >deformabilità





# Miscela

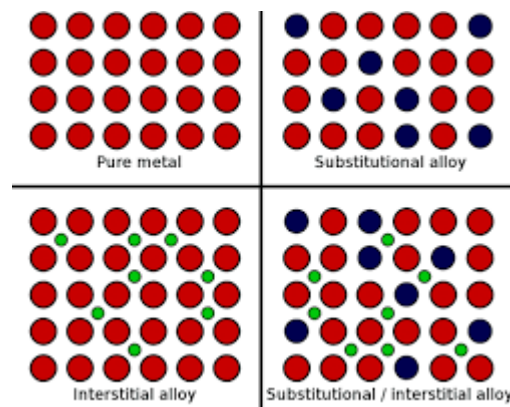
- Una miscela è un insieme di due o più sostanze diverse che non sono combinate chimicamente tra loro.
- Esistono due tipi principali di miscele:
  - 1. Miscele omogenee, dette anche **soluzioni**, sono caratterizzate da una fase unica e uniforme. Le loro proprietà fisiche e chimiche sono le stesse in ogni punto della miscela. Esempi di miscele omogenee sono l'acqua salata, l'aria, l'acciaio e il latte.
  - 2. Miscele eterogenee, caratterizzate da due o più fasi distinte. I componenti sono visibili ad occhio nudo o con un microscopio ottico. Le proprietà fisiche e chimiche possono variare da una fase all'altra. Esempi di miscele eterogenee sono la sabbia e l'acqua, il granito.





# Soluzione solida

- Una soluzione solida è una miscela omogenea di uno o più soluti in un solvente, entrambi allo stato solido.
- I due componenti non si combinano chimicamente.
- Tipi di soluzioni solide:
  - **Sostituzionali**: gli atomi del soluto sostituiscono gli atomi del solvente in determinate posizioni del reticolo.
  - **Interstiziali**: gli atomi del soluto si occupano di spazi vuoti (interstizi) tra gli atomi del reticolo del solvente.





# Lega

- Una lega è una combinazione, sia in soluzione o in miscela, di due o di più elementi, di cui almeno uno è un **metallo**
- Le leghe hanno solitamente proprietà più desiderabili di quelle dei loro componenti
- Per esempio l'acciaio (lega ferro-carbonio) ha una resistenza meccanica maggiore del ferro, l'ottone (lega rame-zinco) è più duro del rame
- Diversamente dai metalli puri, molte leghe non hanno un singolo punto di fusione ma un intervallo di fusione
- La temperatura in cui comincia la fusione è denominata **solidus** e quella in cui la fusione è completa è denominata **liquidus**.
- Leghe con un singolo punto di fusione sono definite **eutettiche**.





[OnlineMetals.com](https://www.OnlineMetals.com)

# UNDERSTANDING STEEL



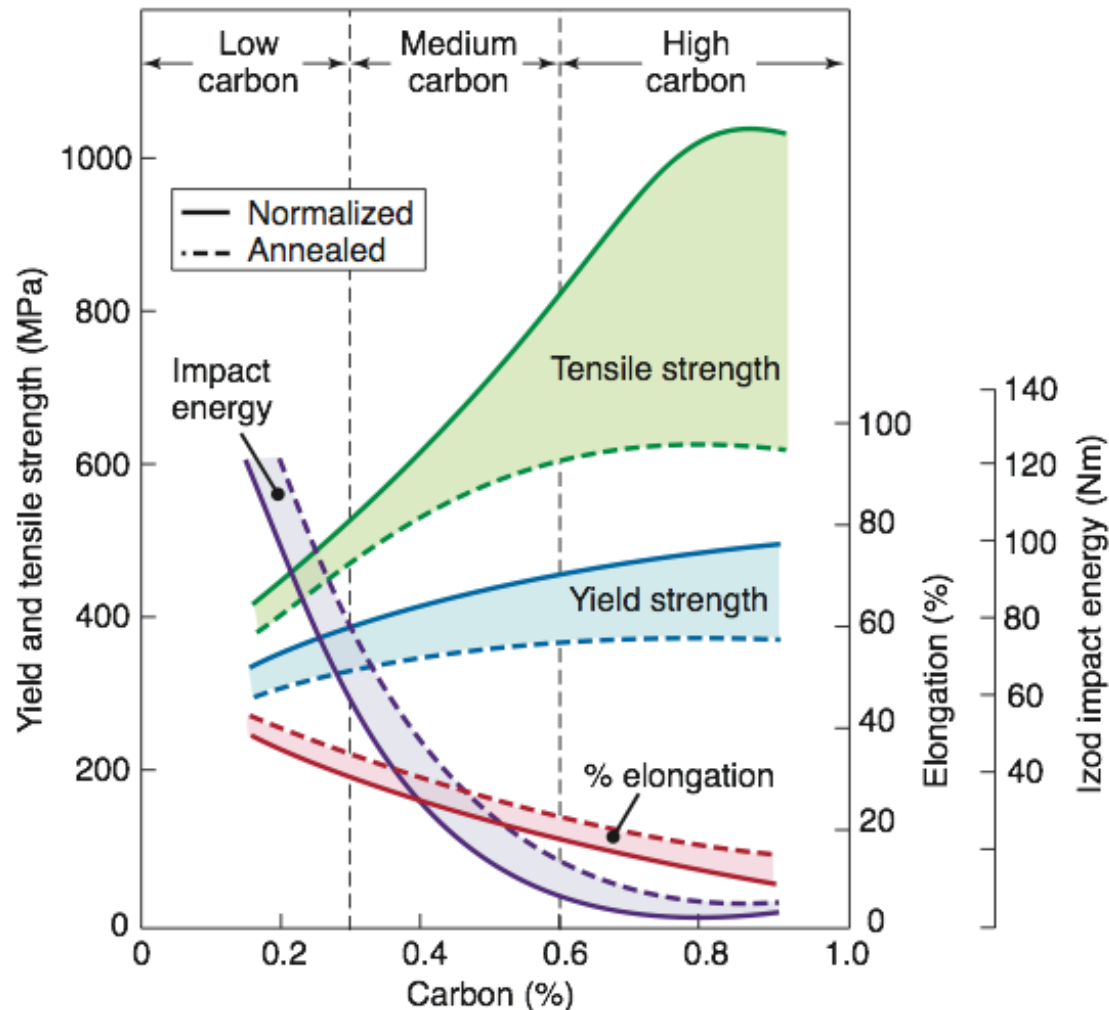
# I processi termici





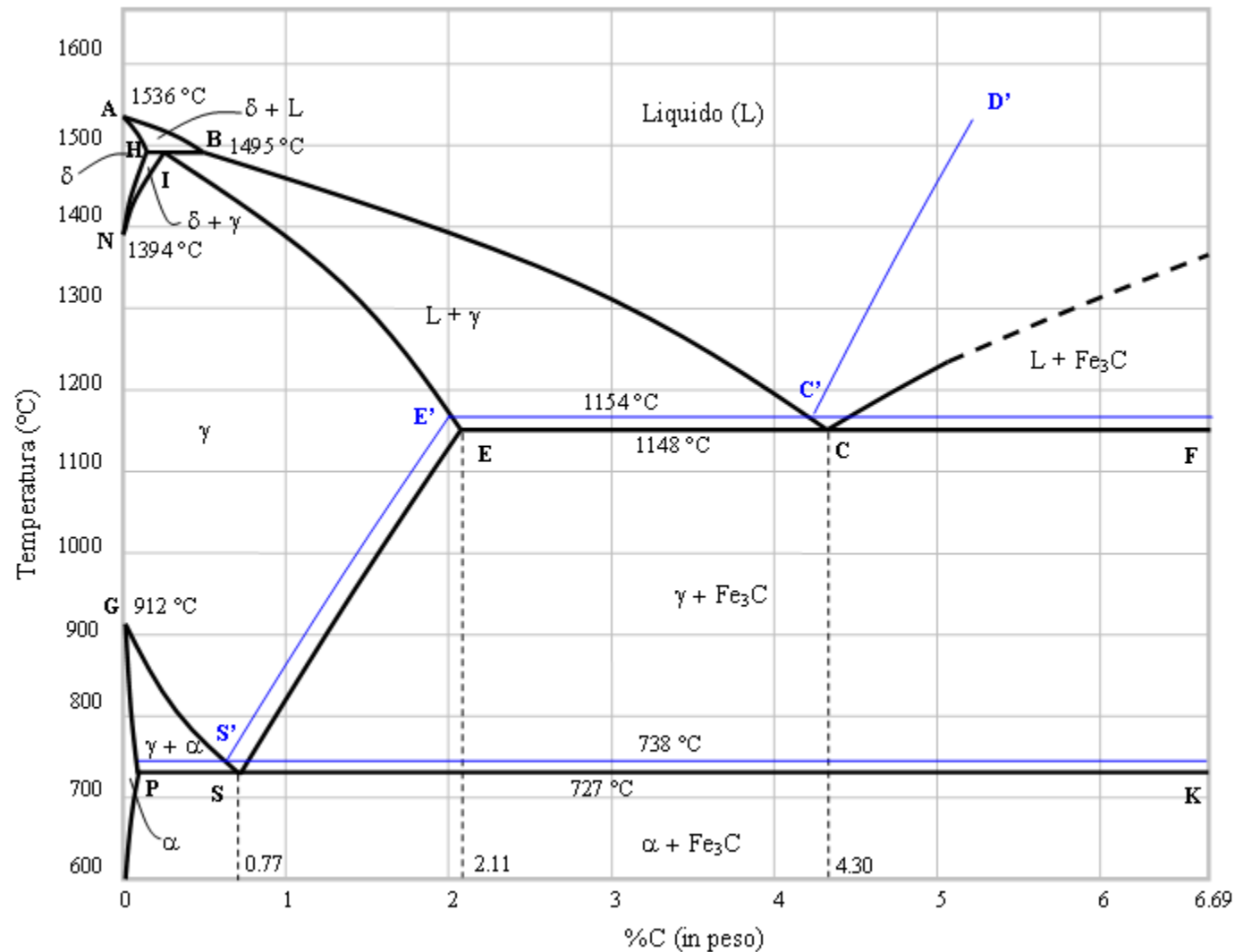


# Effetto del carbonio sulle proprietà meccaniche dell'acciaio



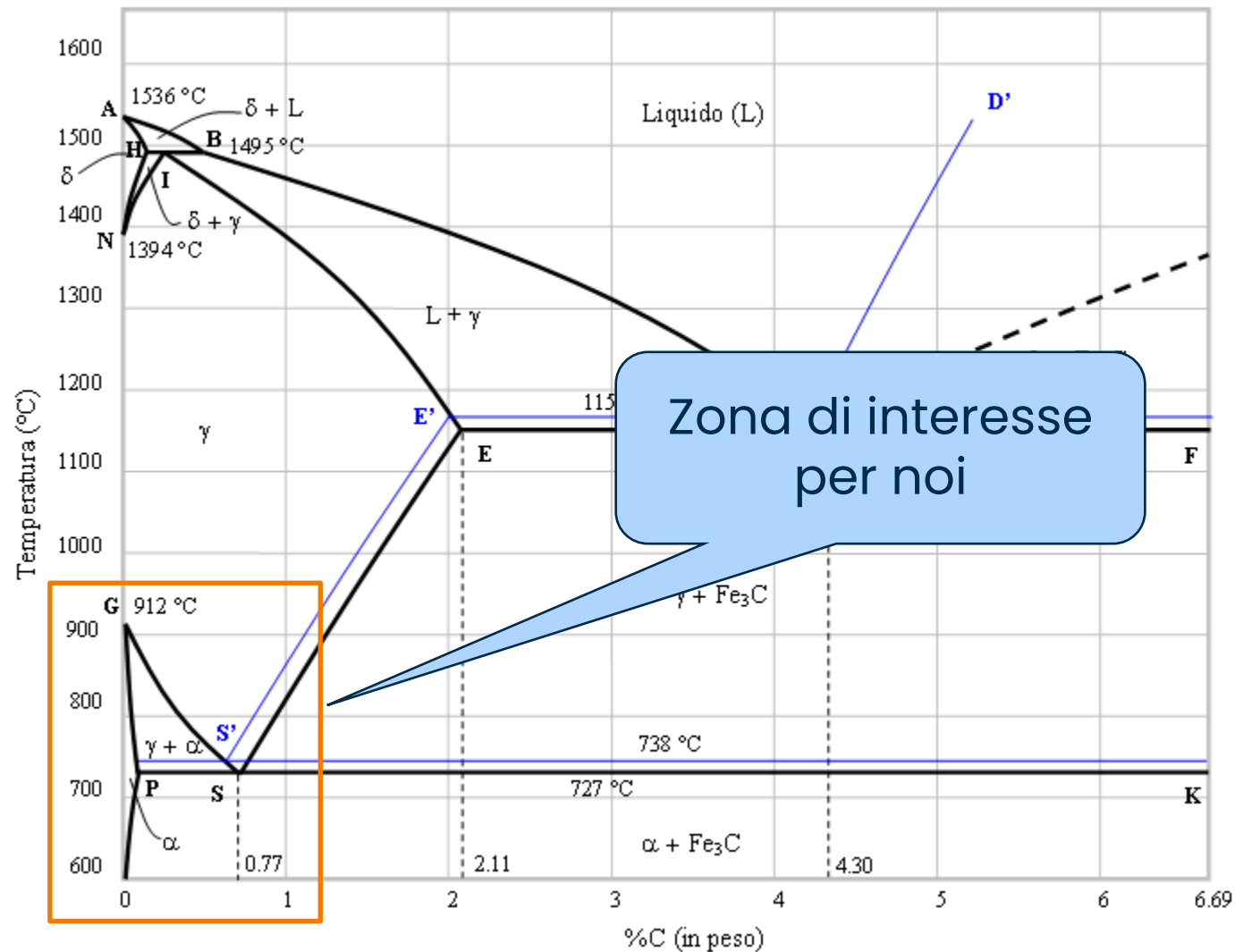


# Diagramma Fe-C





# Diagramma Fe-C





# Diagramma Fe-C

- Il diagramma Fe-C esprime le combinazioni (leghe) tra i due elementi Fe e C
- Le leghe che hanno una percentuale di C fino al 2,06% sono chiamate acciai
- Leghe oltre il 2% fino al 5% circa sono chiamate ghise
- Gli acciai sono arricchiti da altri elementi in lega che conferiscono caratteristiche particolari





# Proprietà acciaio e ghisa

## ACCIAIO

- Ottima plasticità  
buona resilienza,  
buona malleabilità e  
duttilità
- Elevata resistenza a  
trazione, flessione e  
torsione
- Buona lavorabilità  
per asportazione di  
truciolo
- Buona colabilità
- Buona saldabilità

## GHISA

- Elevata durezza  
ottima resistenza a  
compressione e  
usura
- Ottima colabilità
- Elevata fragilità  
bassa resistenza a  
flessione e torsione,
- bassa resilienza
- Ottima lavorabilità  
per asportazione di  
truciolo
- Non adatta a  
deformazione  
plastica
- Difficile saldabilità





# I trattamenti termici

- Si possono modificare le proprietà meccaniche dei metalli con cicli termici
- Operazioni mediante le quali un metallo o una lega metallica viene sottoposto a riscaldamento senza arrivare alla fusione
- Alla base dei trattamenti termici sta il diverso comportamento di austenite e martensite





# Austenite

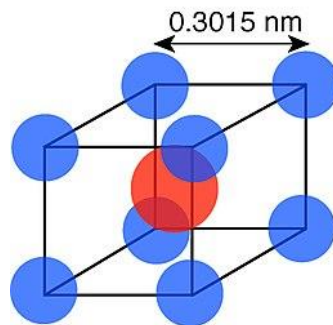
- L'austenite è una soluzione solida di tipo interstiziale di C nel Fe  $\gamma$  (reticolo cubico a facce centrate).
- Stabile ad alta temperatura (sopra i 723 °C) e può contenere un massimo del 2,06% in peso di carbonio
- Sotto la temperatura indicata è stabile la ferrite, ferro  $\alpha$  con un reticolo cubico a corpo centrato: non può formare soluzione con il carbonio => miscela.
- La presenza di altri metalli in lega modifica la temperatura minima per ottenere l'austenite:
  - Il molibdeno, il cromo e il silicio tendono a innalzarla, mentre il manganese e il nichel tendono ad abbassarla.
  - Nel caso di acciai inossidabili austenitici, l'austenite è stabile a temperatura ambiente.



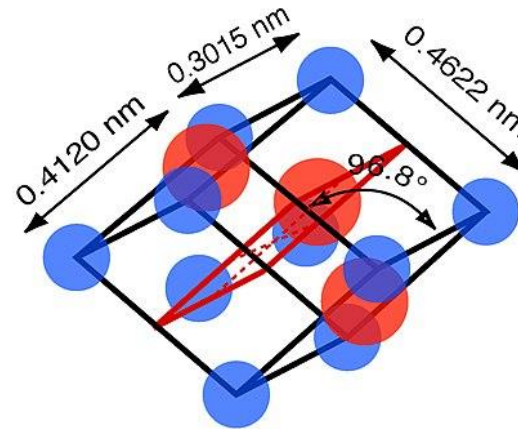


# Martensite

- La martensite è una forma allotropica **metastabile** dell'acciaio, ossia una soluzione sovrasatura di carbonio, nel reticolo del ferro  $\alpha$ .
- È una fase che non sussiste in **equilibrio**, ma può essere ottenuta mediante brusco raffreddamento dell'austenite
- A temperatura ambiente è invece stabile la struttura **perlitica**: **miscela eterogenea** di ferro  $\alpha$  e cementite  $\text{Fe}_3\text{C}$



Austenite



Martensite







# Perché si forma la martensite?

- Il raffreddamento troppo rapido fa sì che gli atomi di carbonio "non riescano" ad uscire dalla struttura ferritica
- Le sue notevoli deformazioni reticolari, che ostacolano il movimento delle dislocazioni, sono la causa prima dell'indurimento.
- La martensite è una fase che presenta alta **durezza** e resistenza meccanica ma elevata **fragilità**





# Principali trattamenti termici

Ricottura

Tempra

Rinvenimento

Bonifica

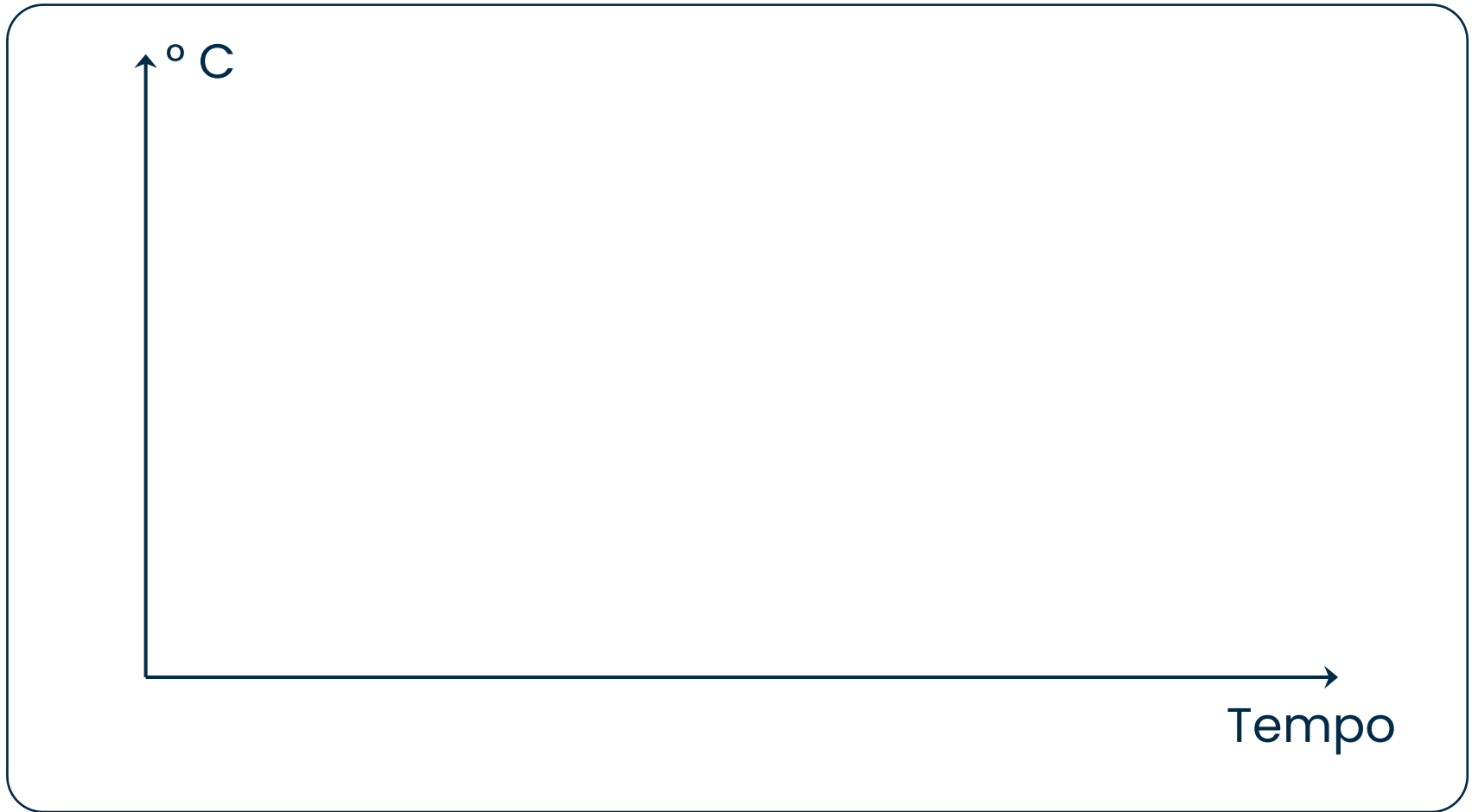
Cementazione,  
nitruzione

Normalizzazione



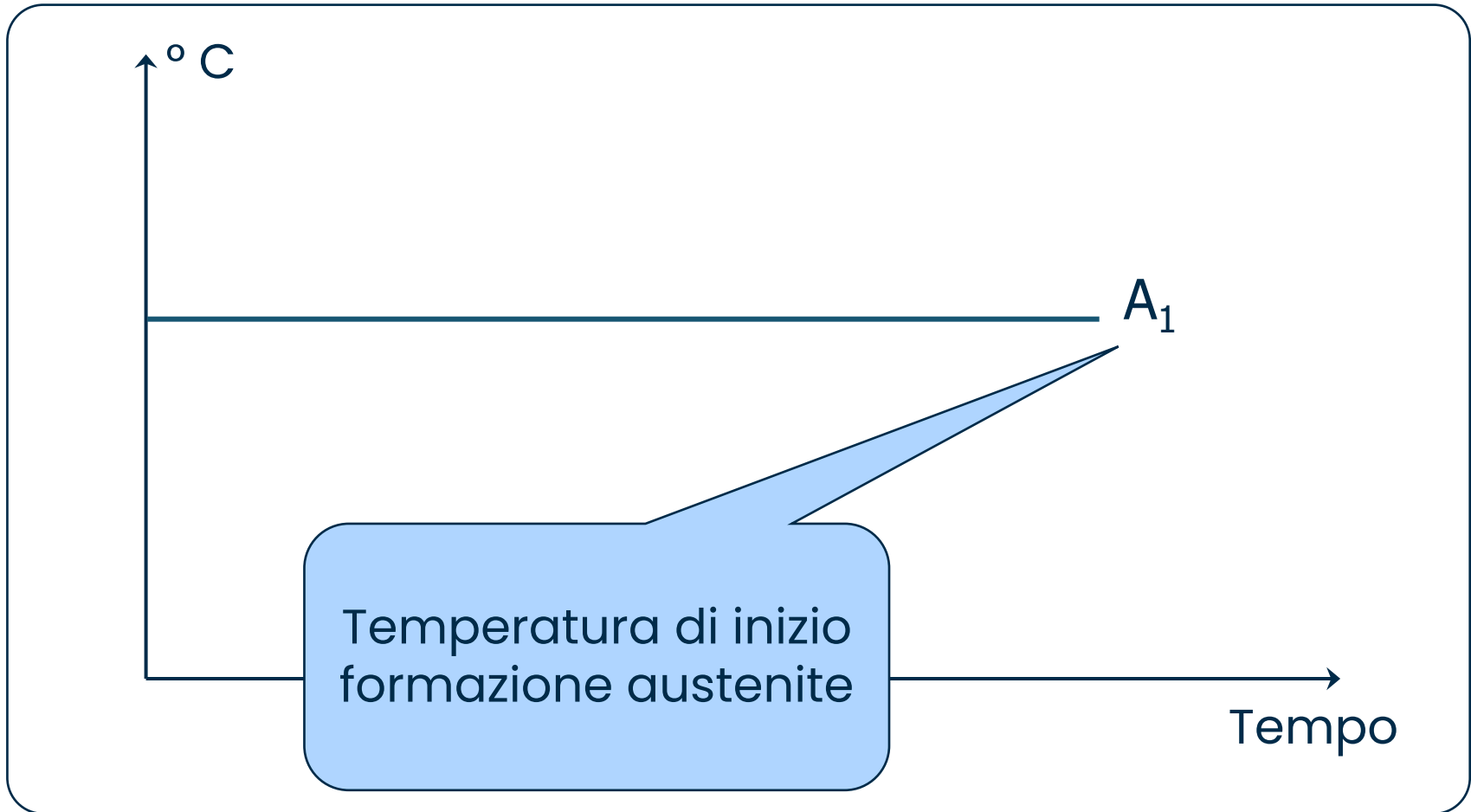


# I trattamenti termici



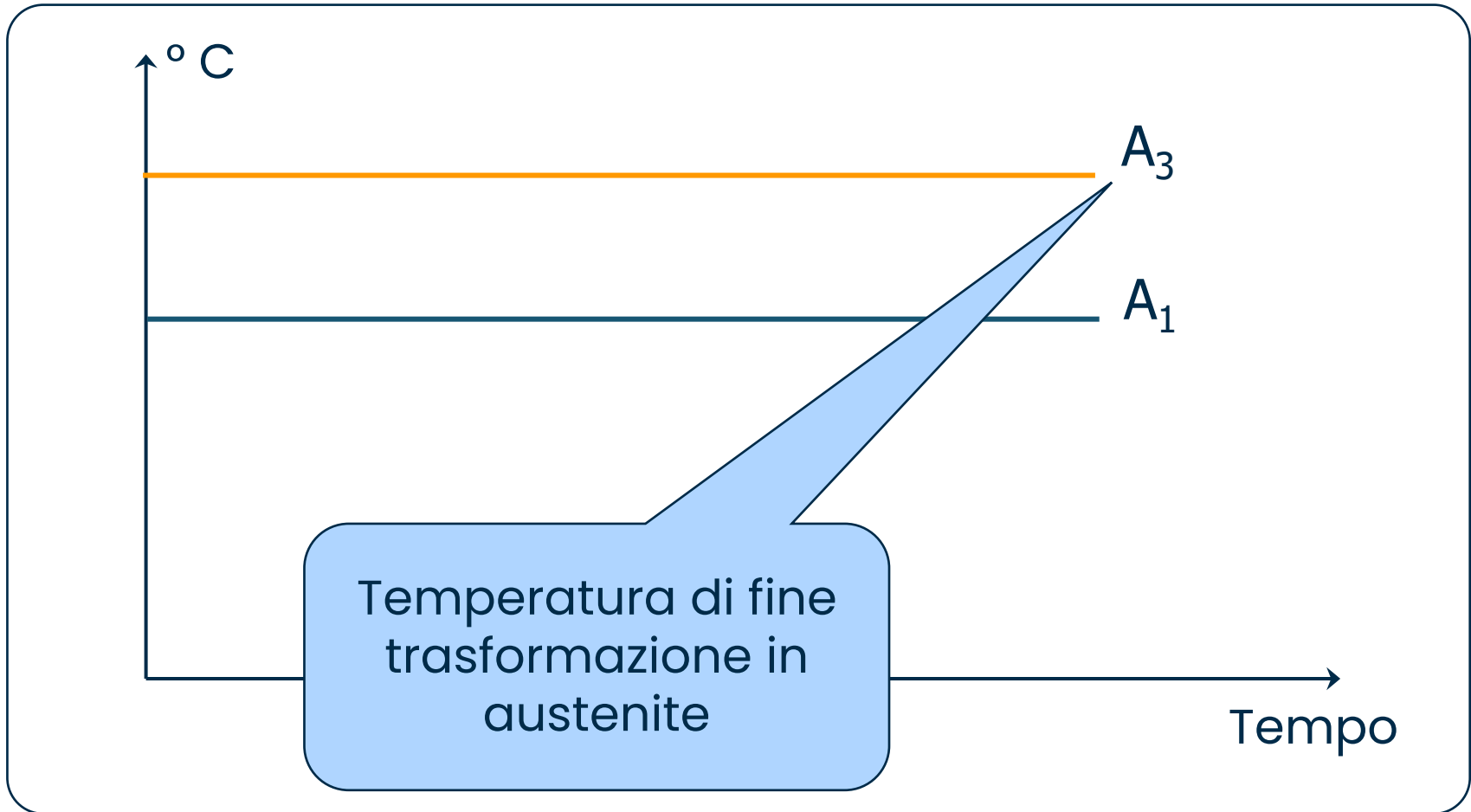


# I trattamenti termici





# I trattamenti termici





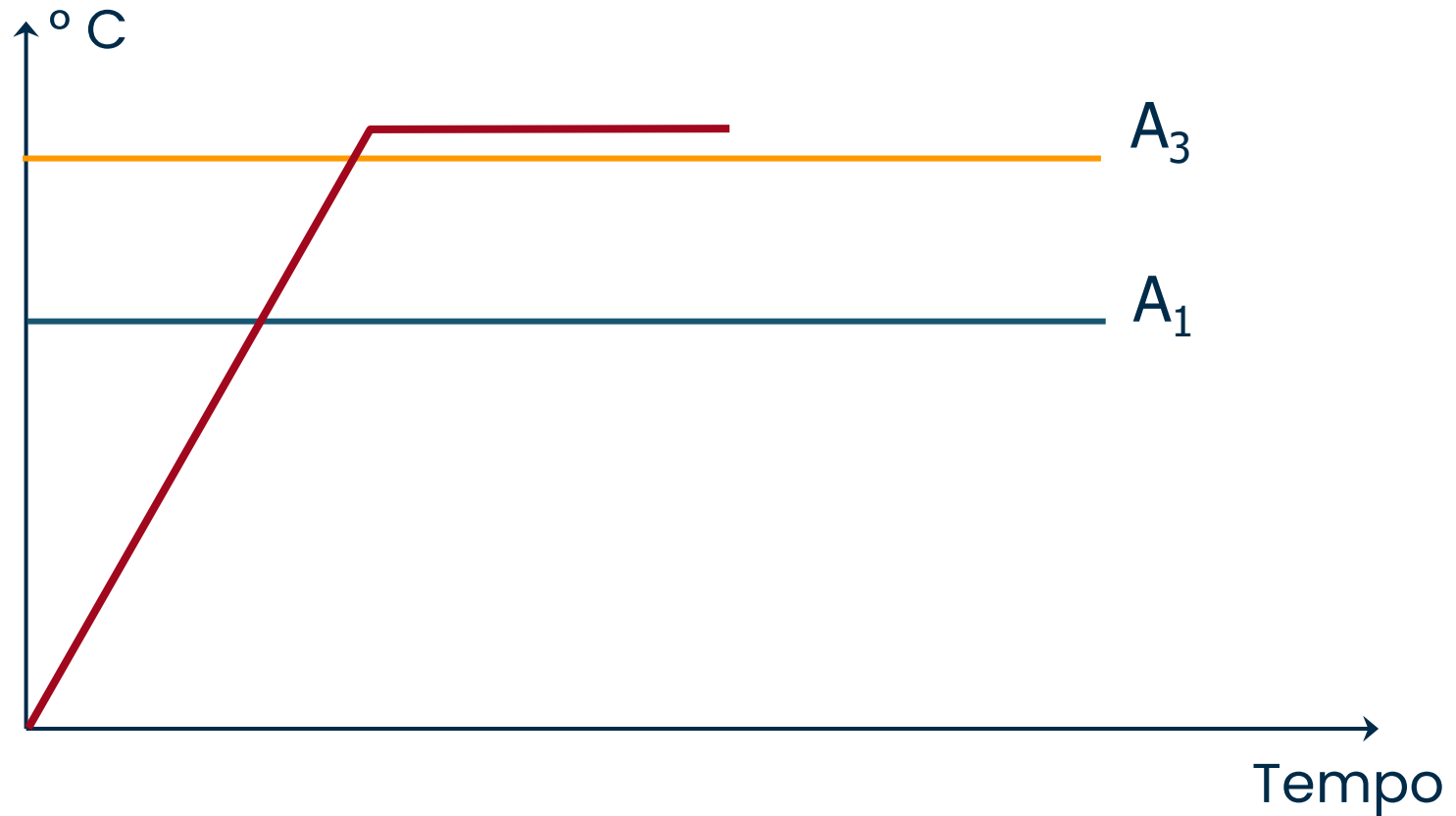
# La ricottura

- Un riscaldamento a temperatura elevata seguito da un raffreddamento lento in aria o in forno per rendere più omogeneo e lavorabile il materiale
- Diminuisce la resistenza ma aumenta la lavorabilità



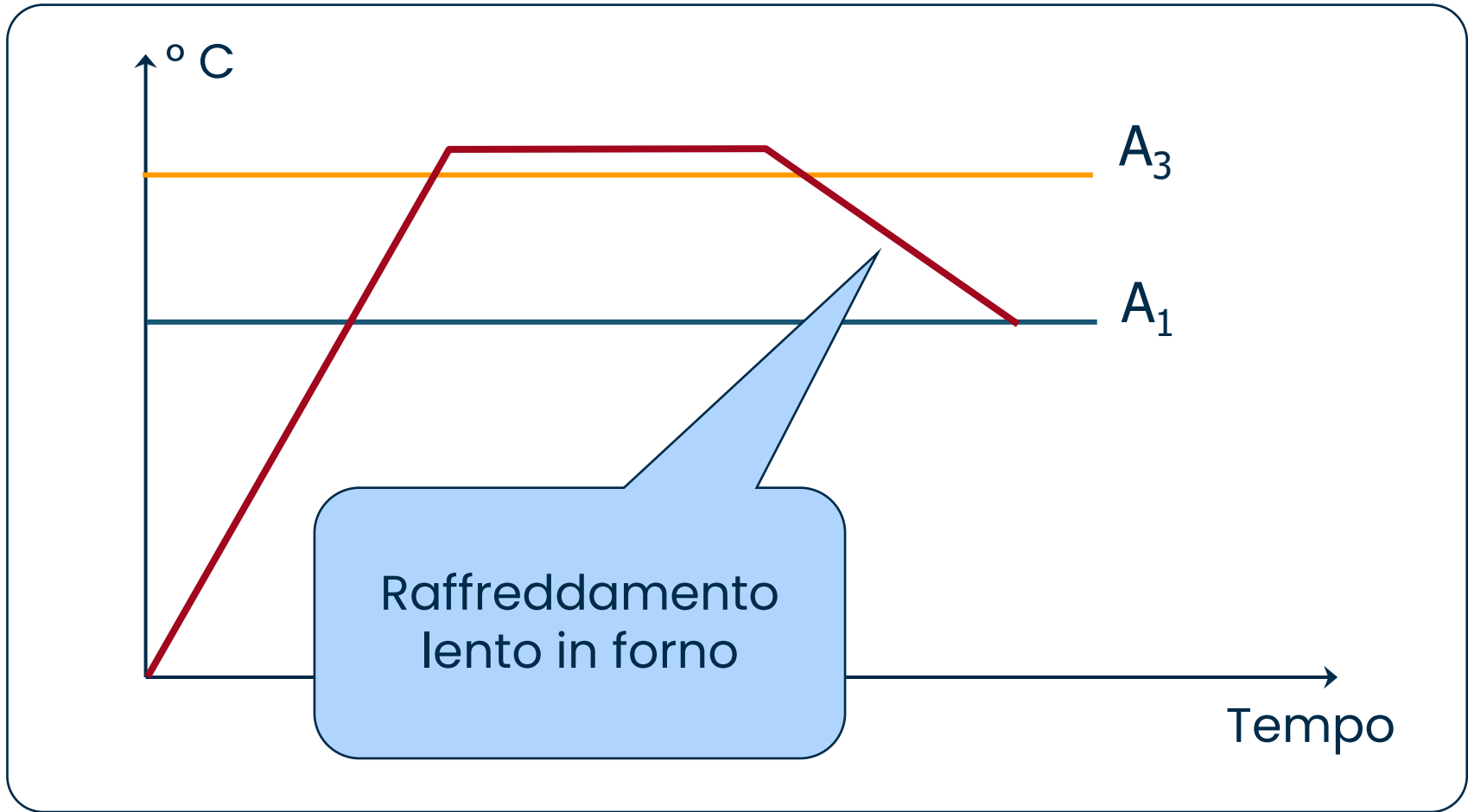


# La ricottura





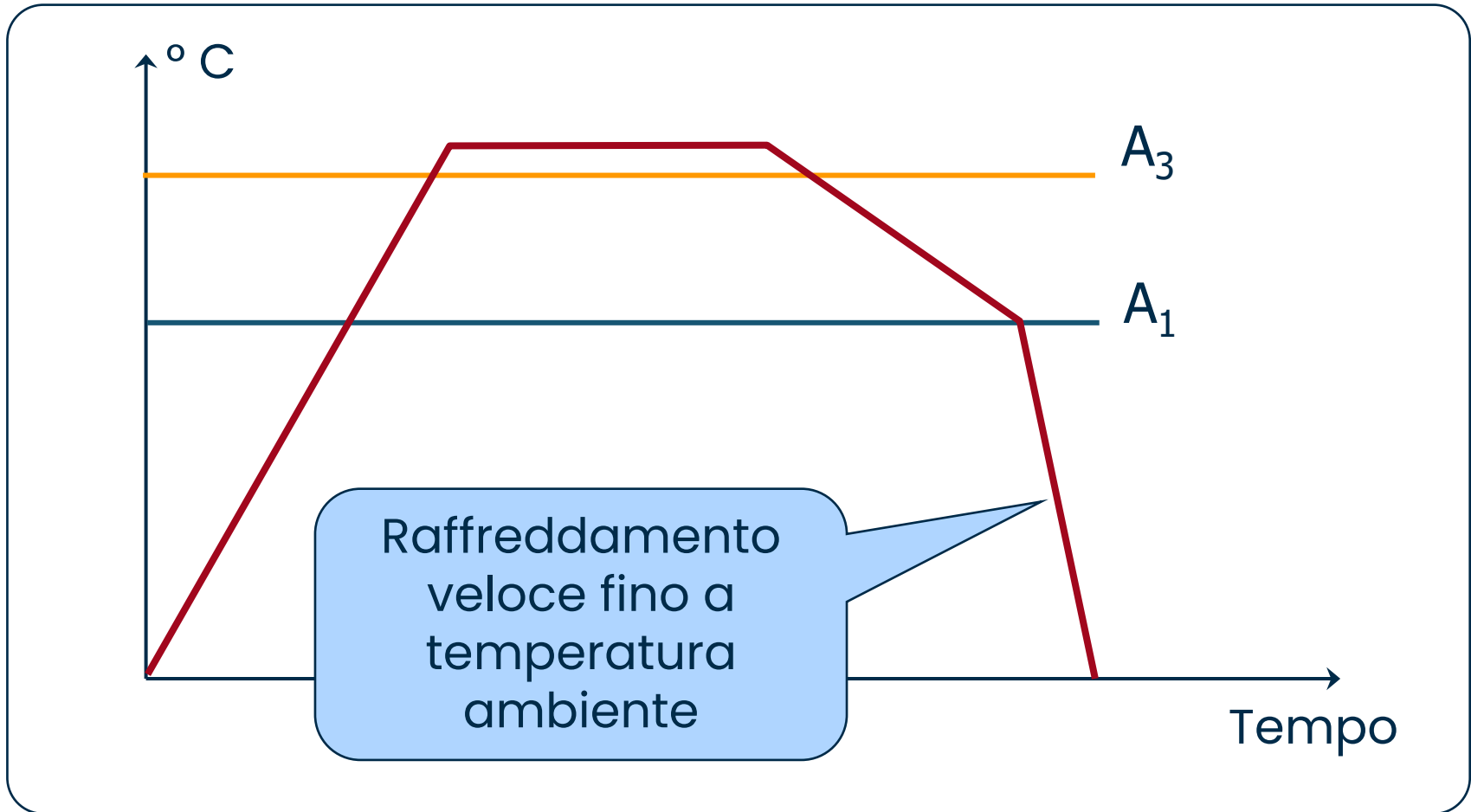
# La ricottura







# La ricottura





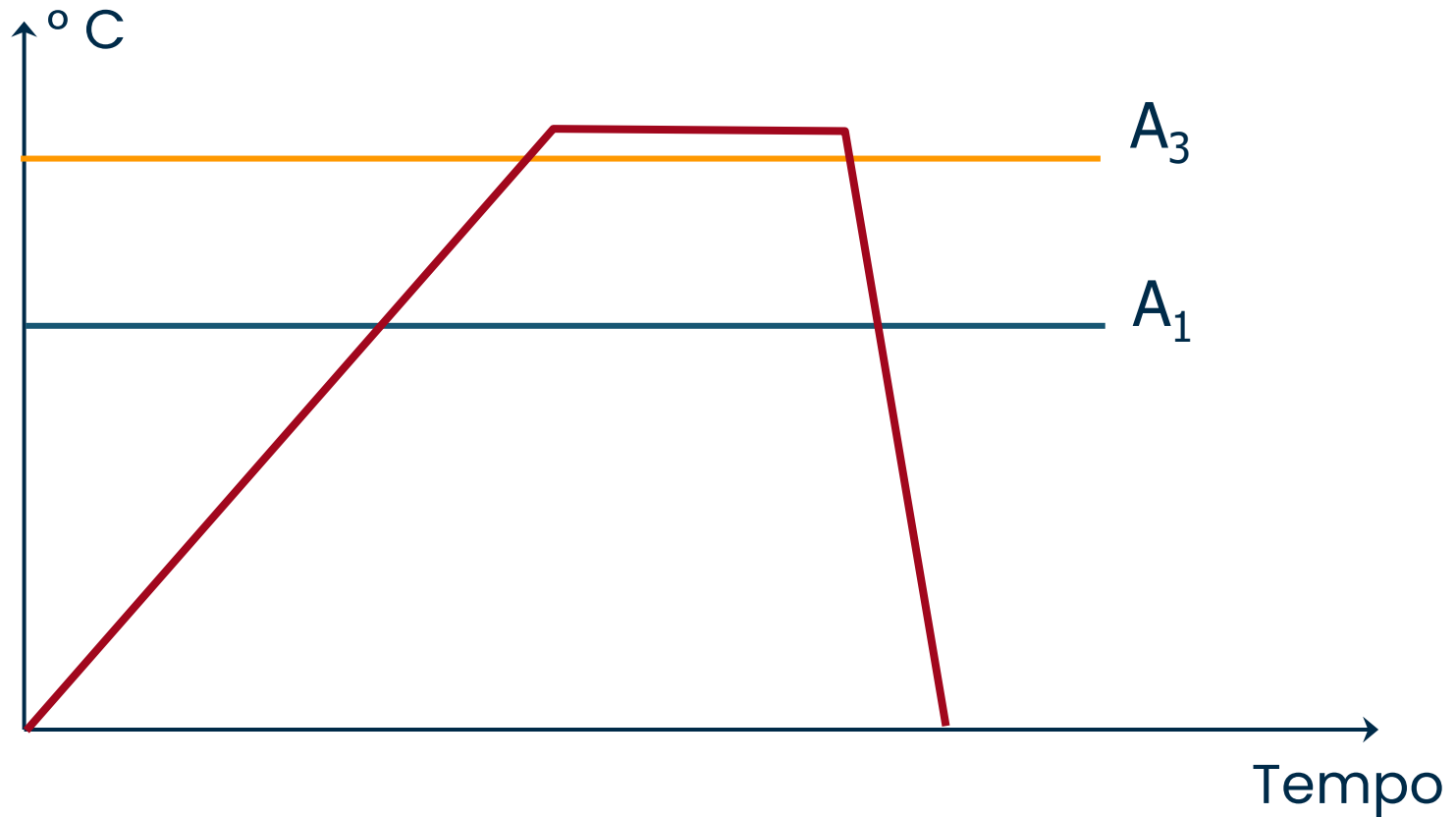
# La tempra

- Un riscaldamento a temperatura elevata (800–900°C) è seguito da raffreddamento rapido in acqua od olio
- L'austenite si trasforma in martensite
- L'acciaio assume elevate caratteristiche di durezza e di resistenza meccanica, ma accompagnate da fragilità a causa della struttura martensitica



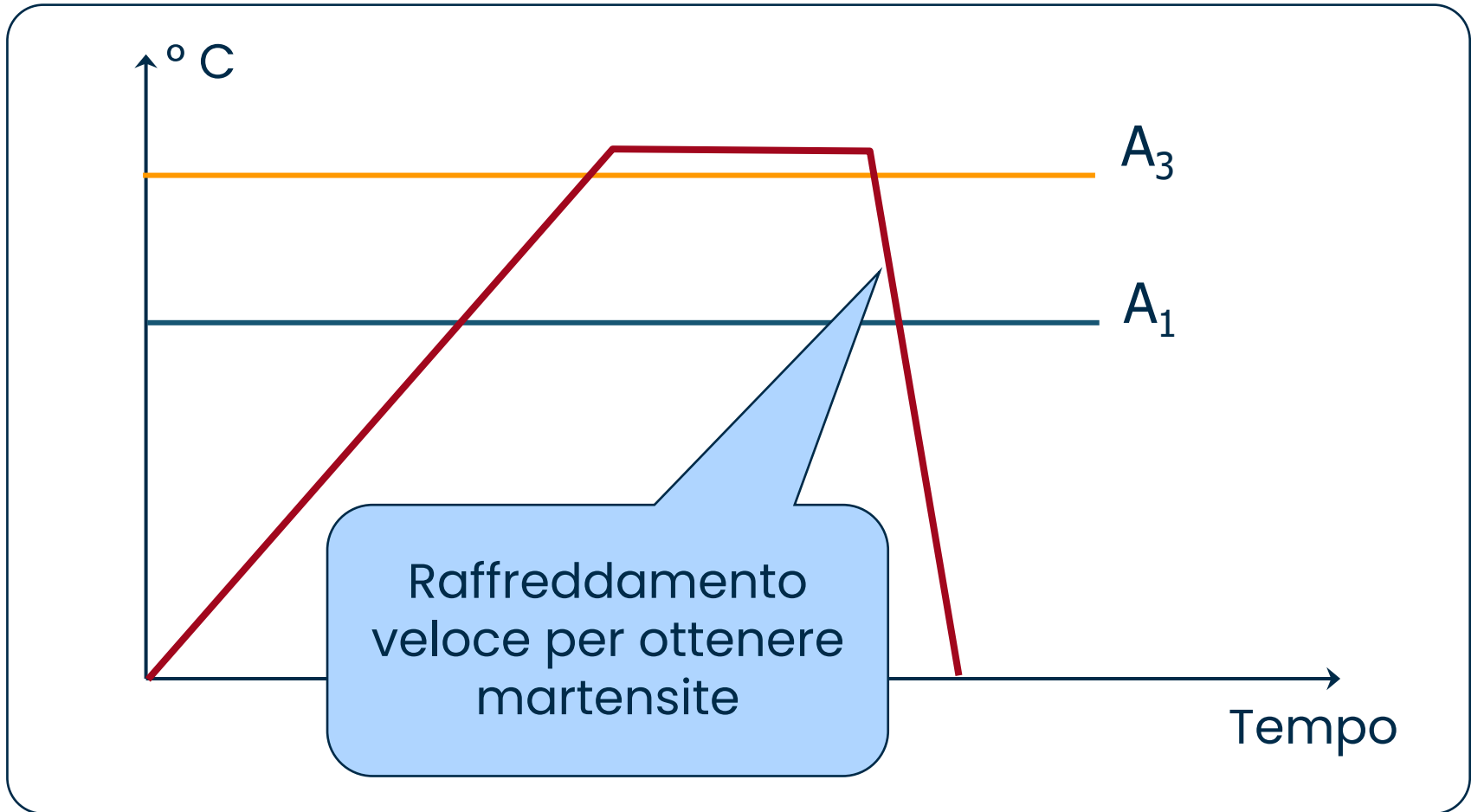


# La tempra





# La tempra





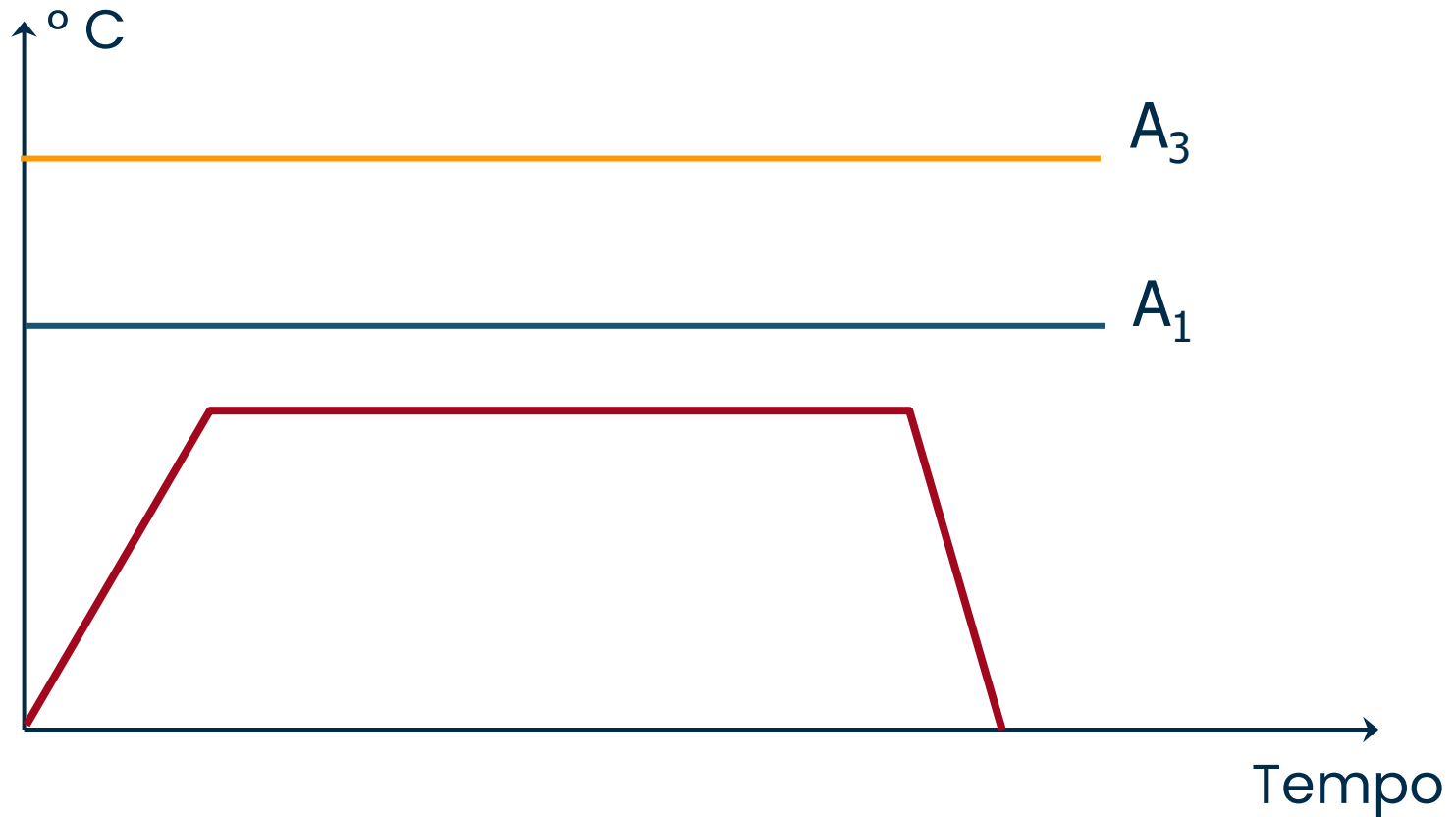
# Il rinvenimento

- Riscaldamento intorno a 500–600 °C sotto la temperatura di inizio formazione di austenite
- Riduce le distorsioni del reticolo della martensite
- Raffreddamento controllato per aggiungere agli effetti della tempra una buona tenacità, riducendo la durezza e la fragilità



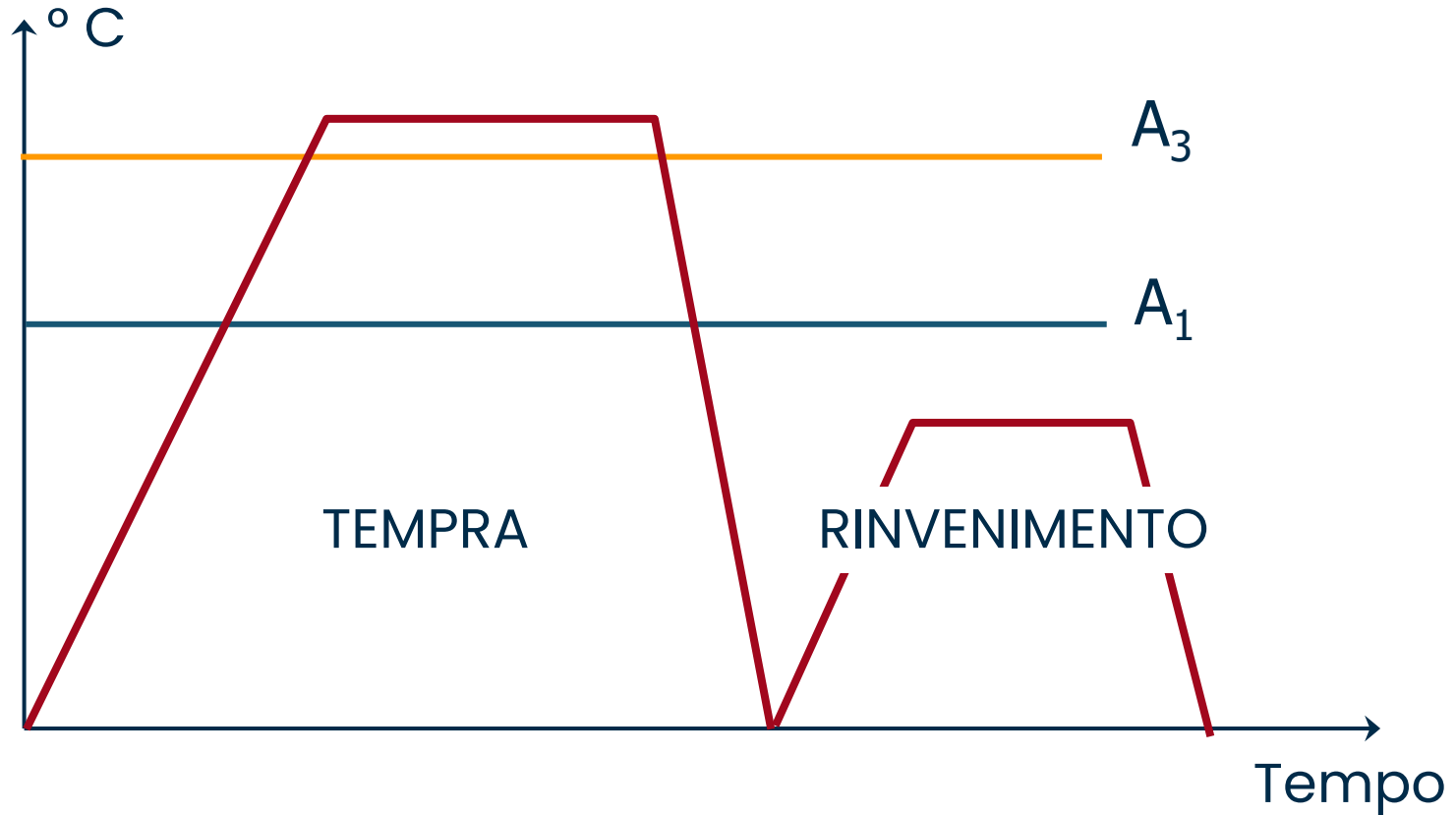


# Il rinvenimento





# La bonifica: tempra seguita da rinvenimento





# Trattamenti superficiali

- Cambiano solo le proprietà della superficie del pezzo
- I principali trattamenti sono:
  - per rimozione dello strato superficiale (meccanica, mediante solventi)
  - per conversione della superficie (ossidazione, anodizzazione, fosfatazione, cromatura)
  - termici (cementazione, nitrurazione)
  - per deposizione (elettrochimica, meccanica)







# Conversione della superficie

- Questi trattamenti hanno lo scopo di aumentare la resistenza alla corrosione
- **Ossidazione** con mezzi chimici o mediante riscaldamento ad elevata temperatura della superficie del pezzo (acciaio)





# Conversione della superficie

- Questi trattamenti hanno lo scopo di aumentare la resistenza alla corrosione
- Ossidazione con mezzi chimici o mediante riscaldamento ad elevata temperatura della superficie del pezzo (acciaio)
- **Anodizzazione dell'alluminio:**
- ossidazione controllata della superficie dell'alluminio per immersione in soluzione acquosa
- collegamento di un generatore di tensione all'anodo





# Trattamenti termici superficiali

- Comprendono:
  - trattamenti di tempra superficiale
  - trattamenti di diffusione di un elemento nello strato superficiale

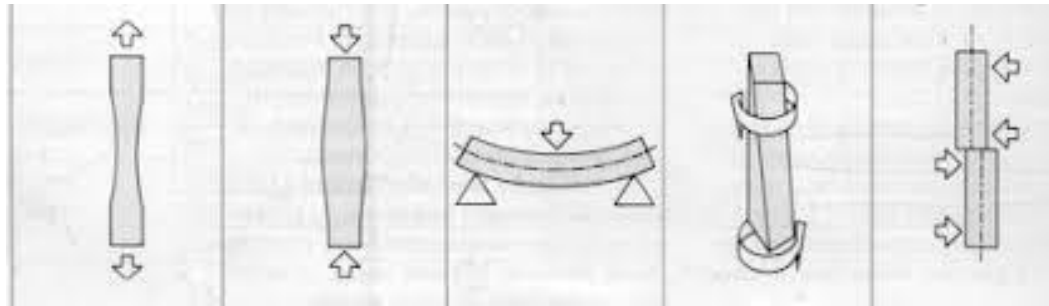




# Trattamenti termici superficiali

- Comprendono:
  - trattamenti di tempra superficiale
  - trattamenti di diffusione di un elemento nello strato superficiale
- I trattamenti di diffusione sono:
  - aggiunta di carbonio all'acciaio allo stato austenitico (**carbocementazione**)
  - aggiunta di azoto a 500 °C (**nitrurazione**) per formare dei nitrati con gli elementi leganti presenti nell'acciaio





# Principali proprietà tecnologiche



# Proprietà tecnologiche dei metalli

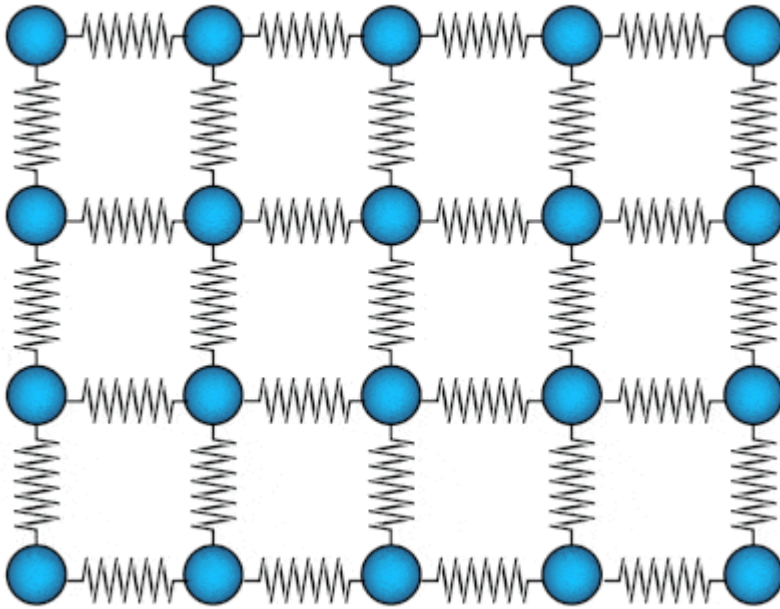
- **Deformazione plastica**
- Tribologia
- Ricristallizzazione
- Anisotropia
- Lavoro di deformazione



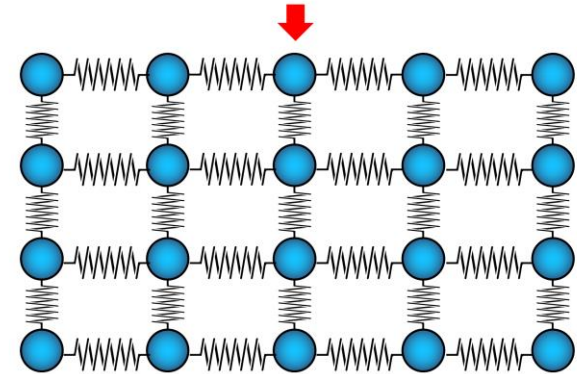


# Deformazione elastica

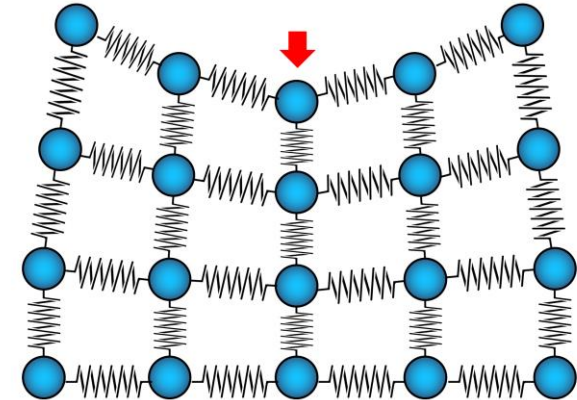
Analogia della molla



FINAL STATE  
VERY RIGID SPRINGS SCENARIO



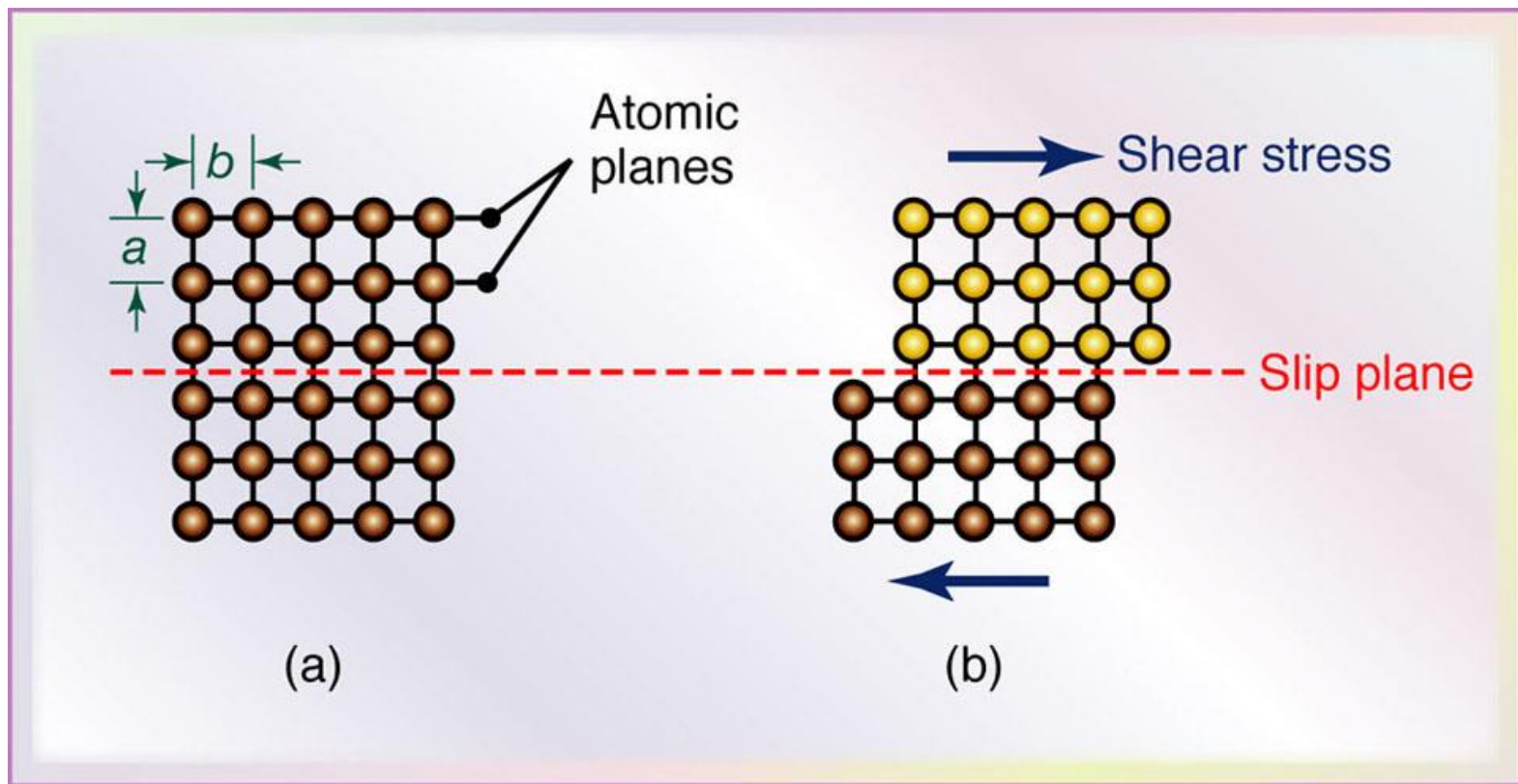
FINAL STATE  
VERY ELASTIC SPRINGS SCENARIO





# Modello ideale scorrimento plastico

- La deformazione avviene sotto l'azione di forze di taglio lungo i piani di scorrimento

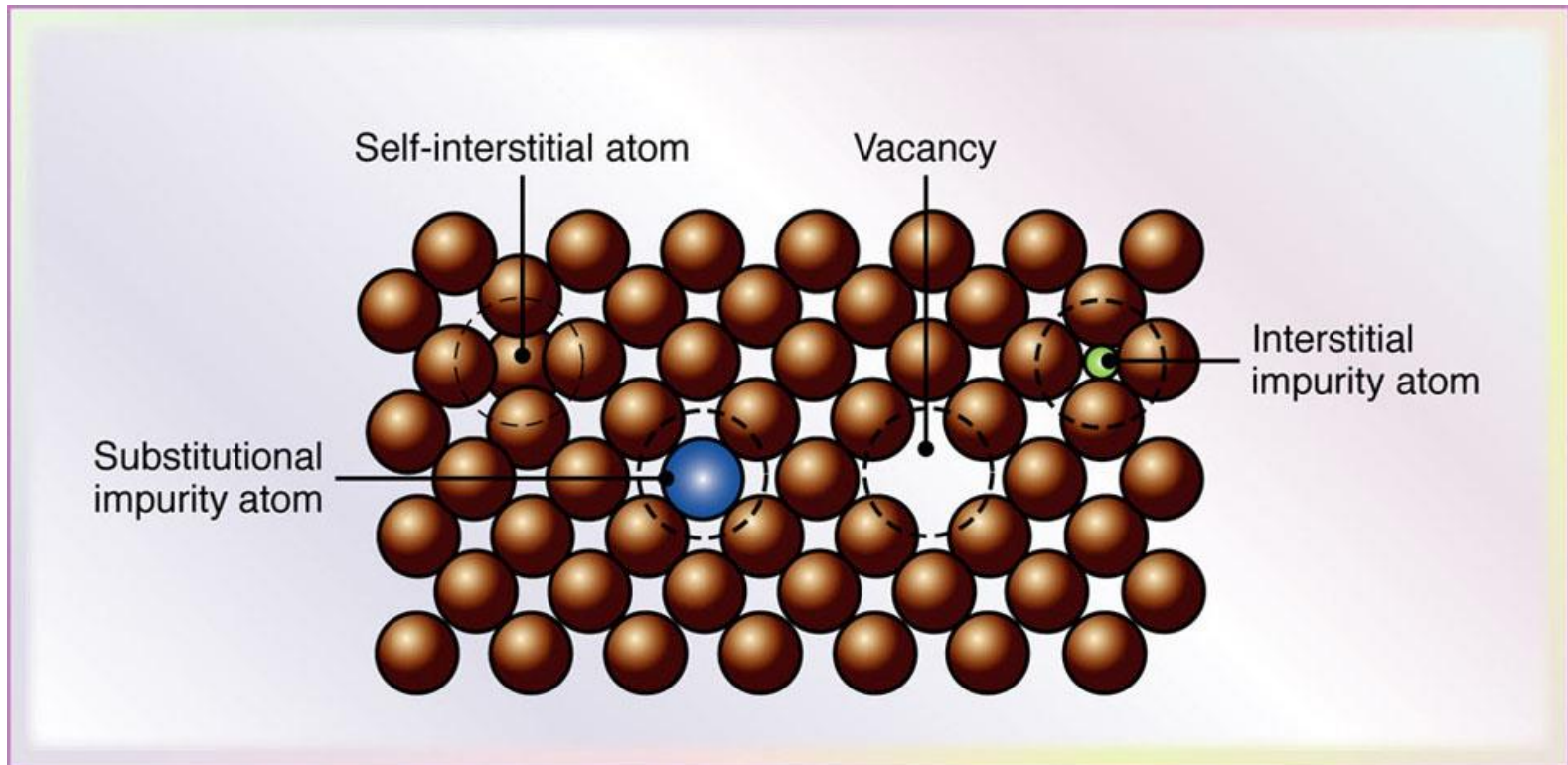






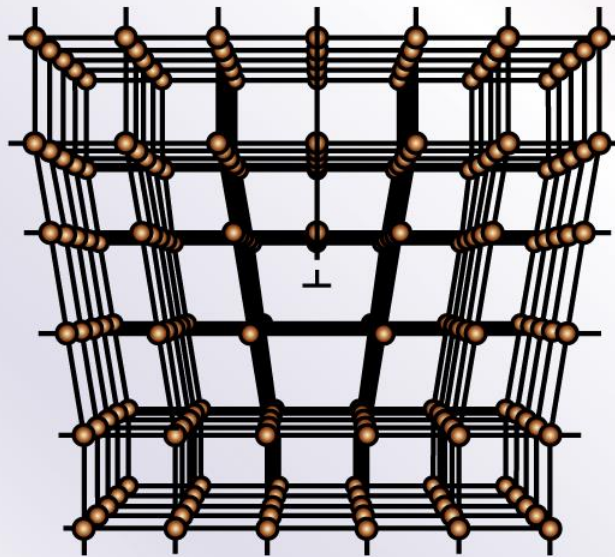
# Difetti puntuali in un reticolo cristallino

- Autointerstiziale, vacanza, interstiziale, sostituzione

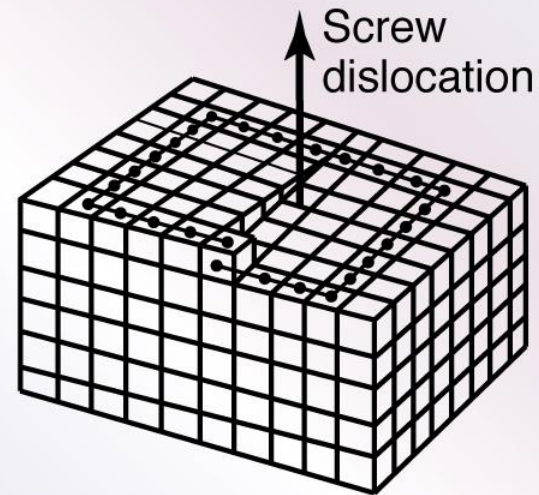




# Difetti lineari: dislocazioni



(a)

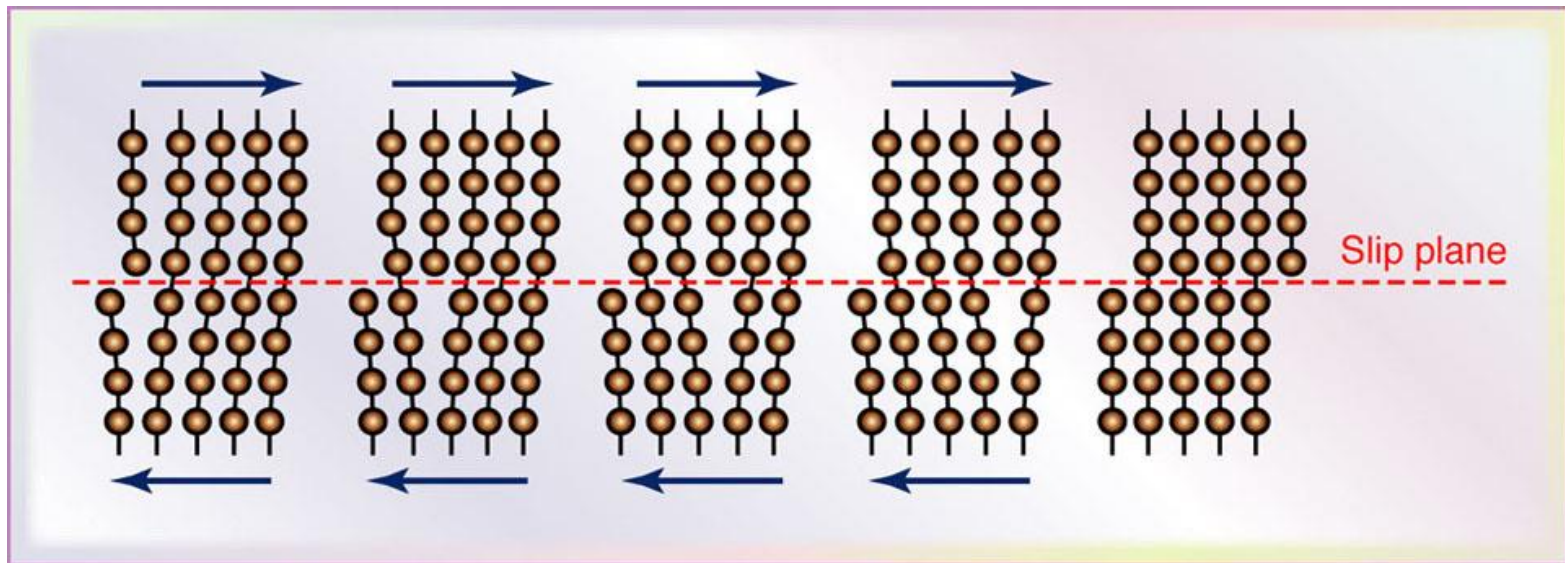


(b)





# Modello reale scorrimento plastico





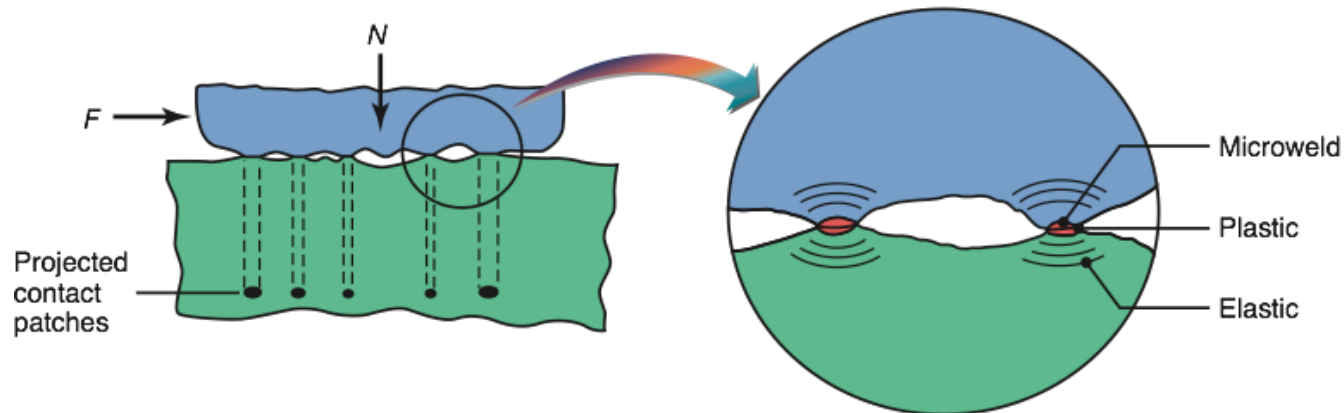
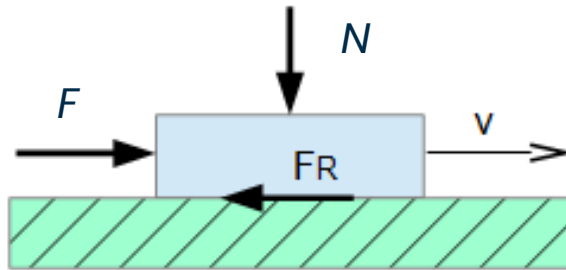
# Proprietà tecnologiche dei metalli

- Deformazione plastica
- **Tribologia**
- Ricristallizzazione
- Anisotropia
- Lavoro di deformazione





# Modello di attrito



Superficie apparente ( $S_a$ ) e superficie reale ( $S_r$ ) di contatto





# Tribologia

- Definizione di tensione tangenziale di attrito:

$$\tau_a = \frac{F_a}{S_a} = \frac{F_a}{S_r} \frac{S_r}{S_a} \quad \frac{F_a}{S_r} = \text{cost} \quad \frac{S_r}{S_a} \propto p$$

- $S_r \ll S_a$ : Modello di Coulomb (coefficiente attrito)

$$\tau_a = \mu \cdot p$$

- $S_a \approx S_r$ : Modello dell'adesione (fattore attrito)

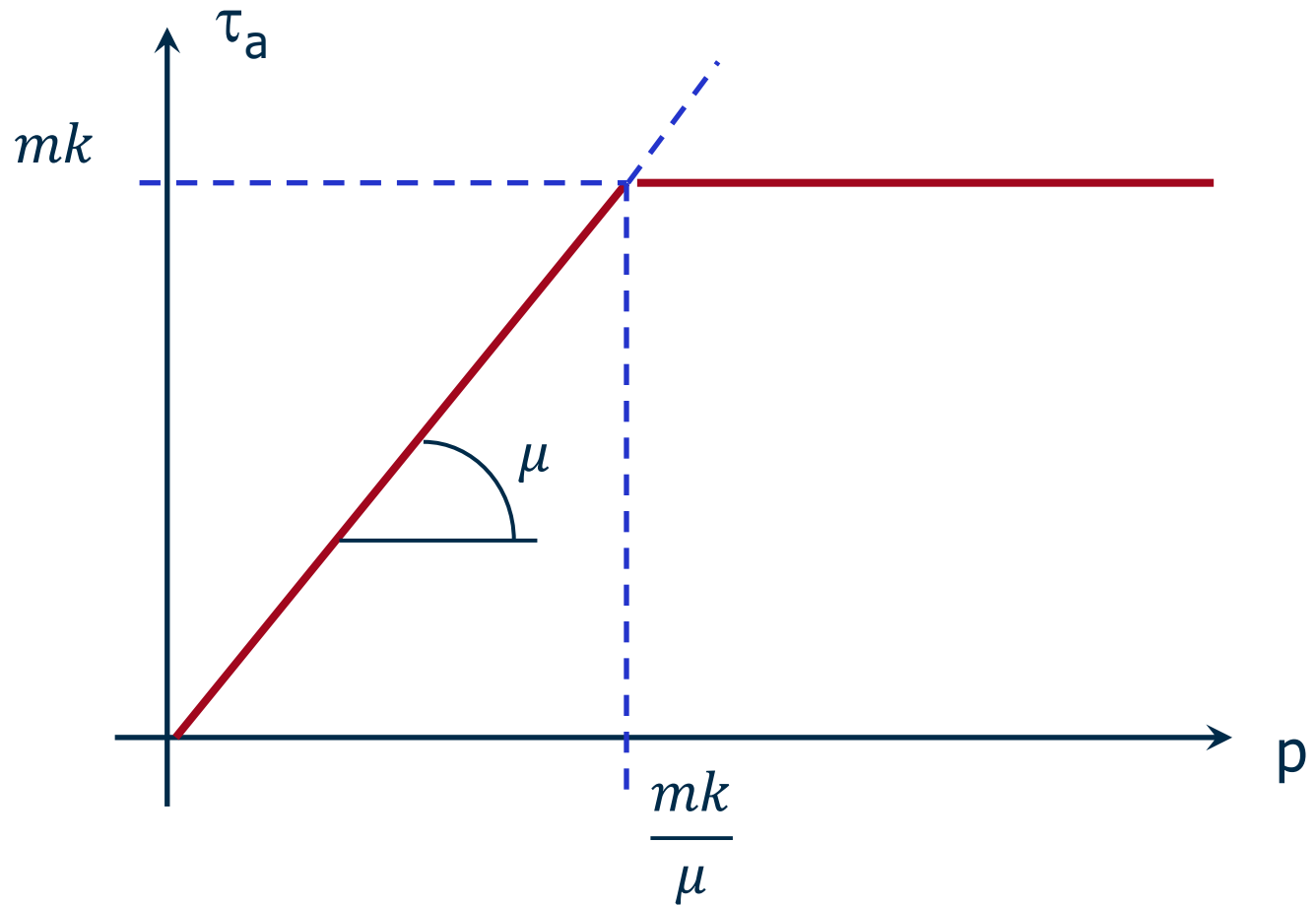
$$\tau_a = m \cdot k$$

$k$  = tensione di scorrimento al taglio



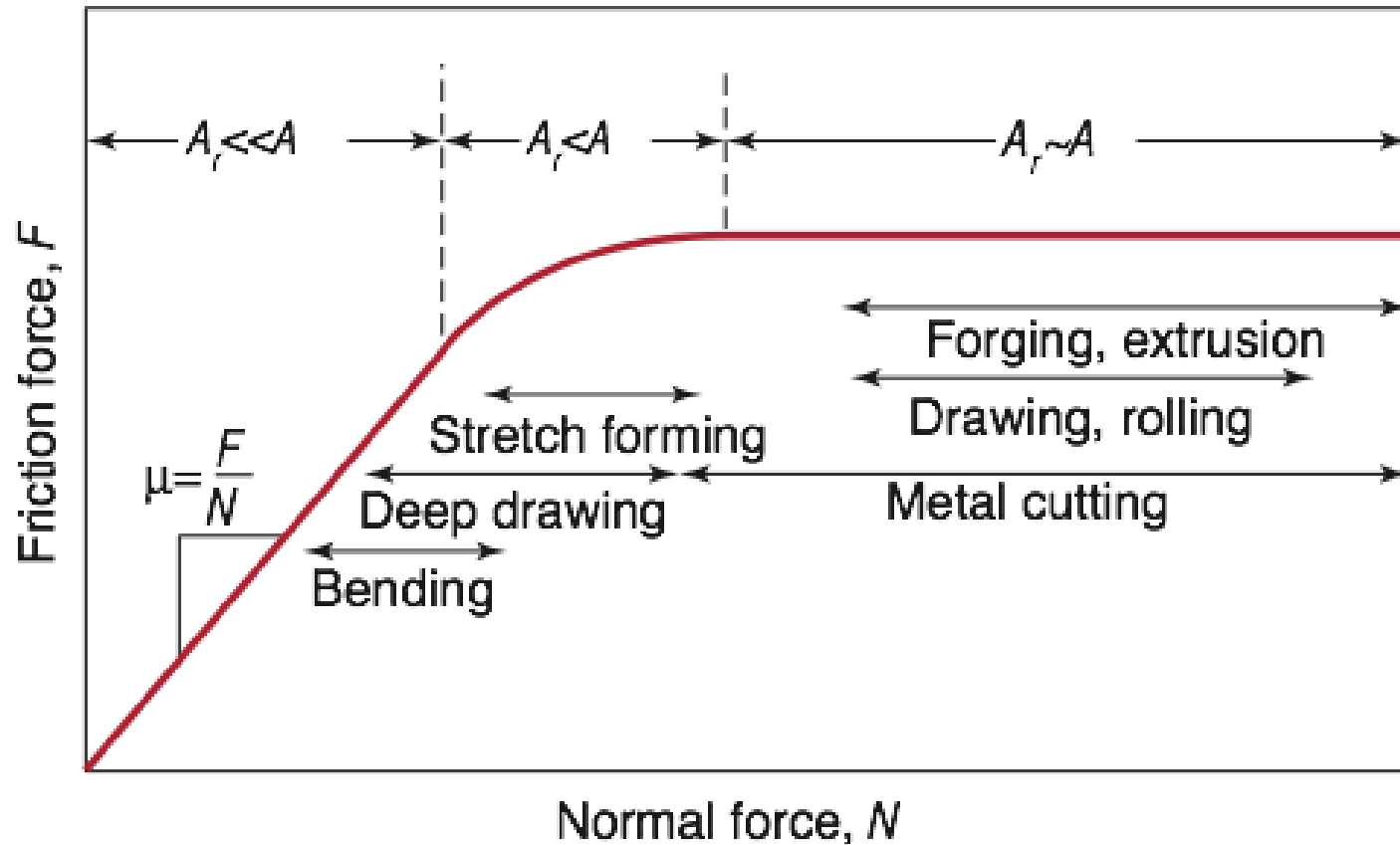


# Ambito di validità delle due leggi





# Meccanismi di attrito in produzione







# Proprietà tecnologiche dei metalli

- Deformazione plastica
- Tribologia
- **Ricristallizzazione**
- Anisotropia
- Lavoro di deformazione





# Ricristallizzazione

- Formazione di una nuova struttura cristallina senza tensioni residue
- Avviene solo a temperature elevate
- Il tempo di ricristallizzazione diminuisce al crescere della temperatura
- Ricristallizzazione statica e dinamica
- Più il materiale è stato deformato più piccolo diventa il grano con la ricristallizzazione





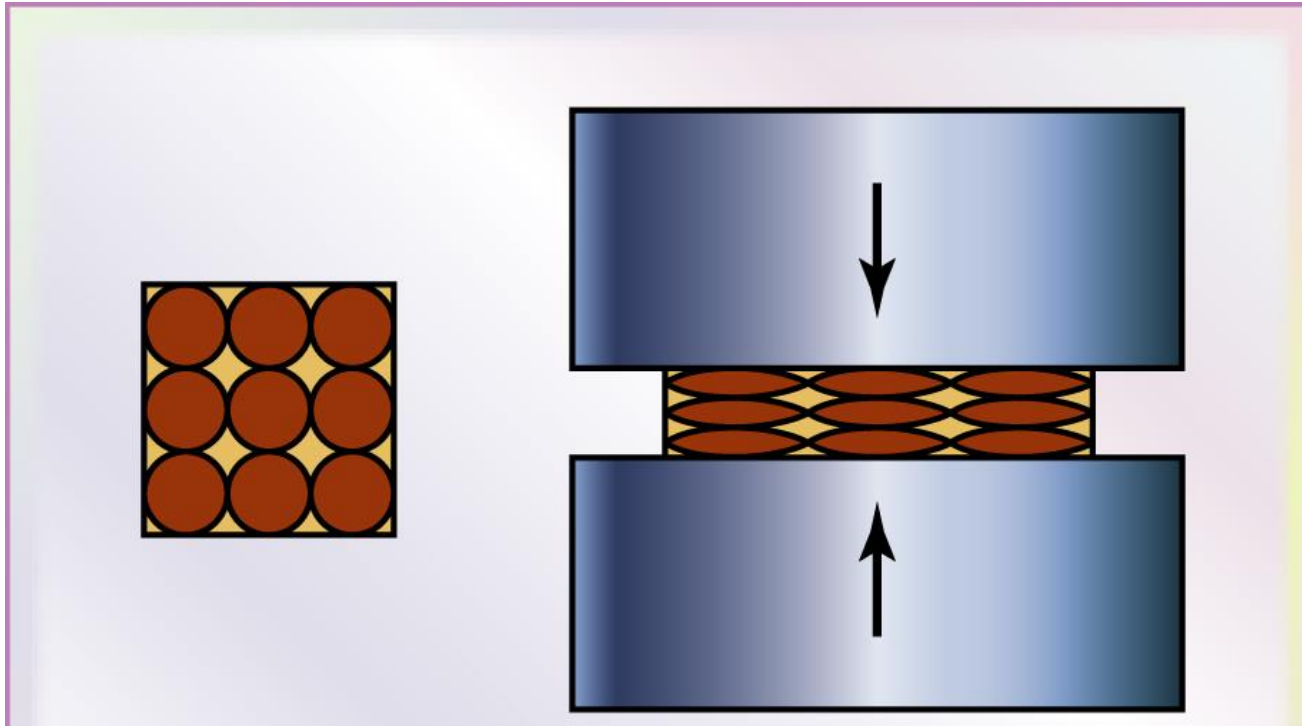
# Proprietà tecnologiche dei metalli

- Deformazione plastica
- Tribologia
- Ricristallizzazione
- **Anisotropia**
- Lavoro di deformazione





# Deformazione plastica dei grani



- I grani si allineano lungo la direzione normale alla deformazione.
- Orientamento preferenziale dei grani





# Anisotropia

- La deformazione plastica allunga il grano in una sola direzione
- La resistenza meccanica ora dipende dalla direzione
- Il materiale è detto anisotropo
- Anche le proprietà fisiche vengono cambiate (permeabilità magnetica, resistenza elettrica)
- Due tipi di anisotropia: cristallografica e orientazione delle fibre





# Proprietà tecnologiche dei metalli

- Deformazione plastica
- Tribologia
- Ricristallizzazione
- Anisotropia
- **Lavoro di deformazione**





# Il lavoro effettivo

- Lavoro generato durante il processo di deformazione:
  - lavoro ideale di deformazione uniforme
  - lavoro ridondante
  - lavoro di attrito

$$L = L_{id} + L_{rid} + L_{attr}$$

- Il lavoro effettivo può anche essere ottenuto dal lavoro ideale diviso il rendimento

$$L = \frac{L_{id}}{\eta}$$





# Generazione di energia termica

- Il lavoro di deformazione plastica è irreversibile
- Il lavoro di deformazione plastica viene trasformato in:
  - calore per il 90%
  - energia di legame per il 10%
- In condizioni adiabatiche il calore generato provoca un aumento di temperatura del corpo, altrimenti viene scambiato con utensili e macchina utensile







# I polimeri



# Polimeri

- Il primo polimero sintetico fu la fenol-formaldeide, un termoindurente sviluppato nel 1906 e chiamato Bakelite.

BAKELITE





# Proprietà dei polimeri

- I polimeri sono caratterizzati da:
  - bassi valori di densità;
  - resistenza;
  - rigidità;
  - bassa conducibilità elettrica;
  - elevata resistenza agli agenti chimici;
  - elevata versatilità d'impiego;
  - facilità di lavorazione.





# Monomero

Il **monomero** costituisce l'elemento costruttivo di base dei polimeri



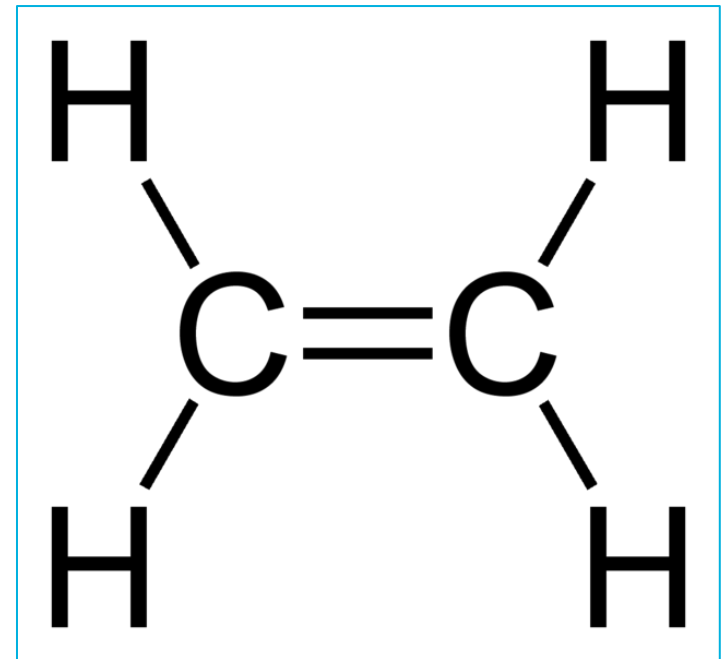
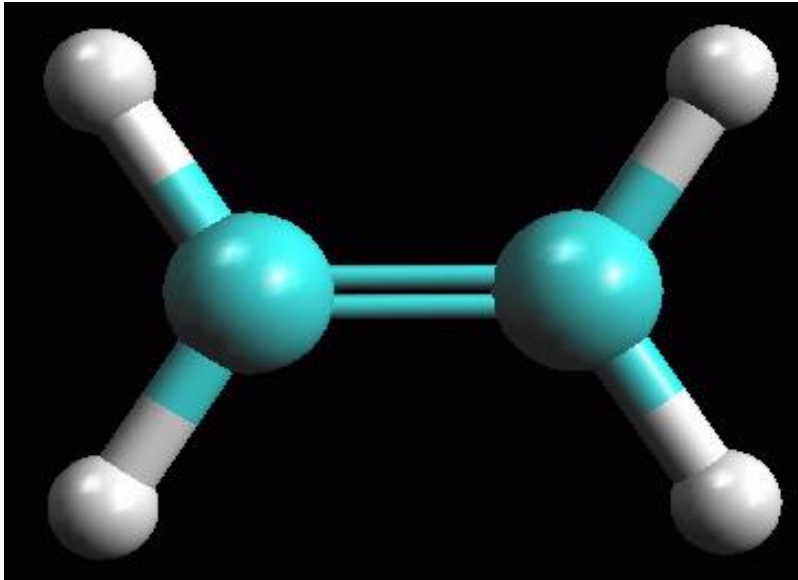
La maggior parte dei monomeri sono materiali organici nei quali gli atomi di carbonio sono legati con altri atomi quali idrogeno, ossigeno, azoto attraverso legami covalenti





# Etilene

- Un esempio di monomero è l'etilene ( $C_2H_4$ ).





# Polimerizzazione

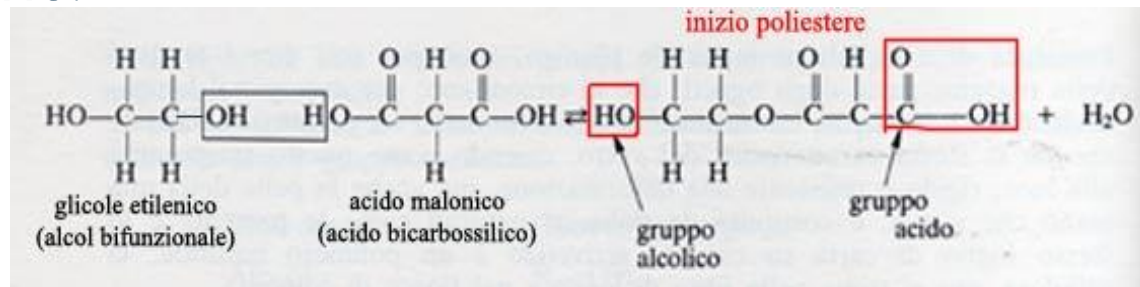
- I processi di polimerizzazione sono molto complessi e sebbene esistano numerose varianti, i due processi fondamentali sono:
  - Polimerizzazione per condensazione
  - Polimerizzazione per addizione



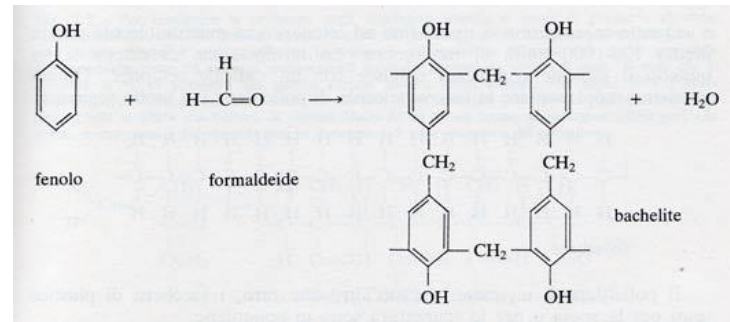


# Polimerizzazione per condensazione

- I polimeri vengono ottenuti attraverso la formazione di legami tra due tipi di monomeri reagenti. Si ha la condensazione di acqua come sottoprodotto della reazione.



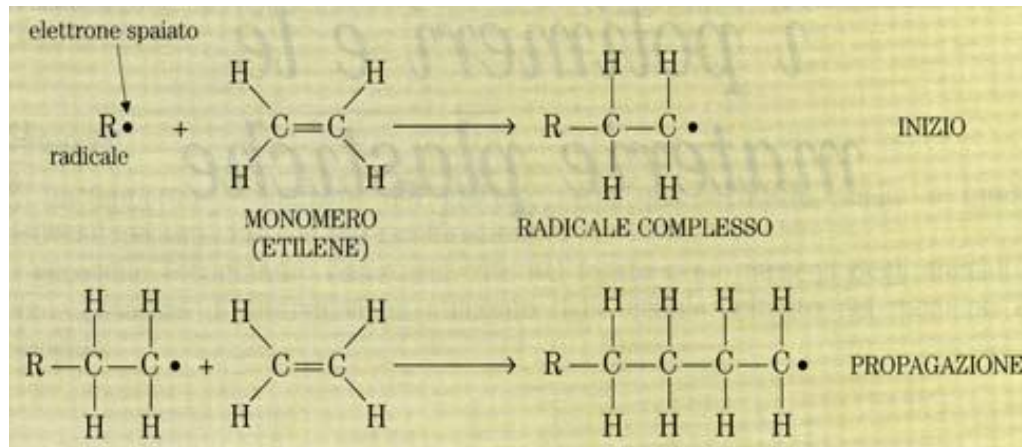
- Esempio di polimerizzazione per condensazione è la formazione della bachelite.





# Polimerizzazione per addizione

- I legami hanno luogo senza sottoprodotti di reazione. Perché la reazione avvenga, è necessario introdurre un iniziatore per aprire il legame doppio tra gli atomi di carbonio.
- I monomeri di etilene si legano mediante una polimerizzazione per addizione per formare il polietilene.





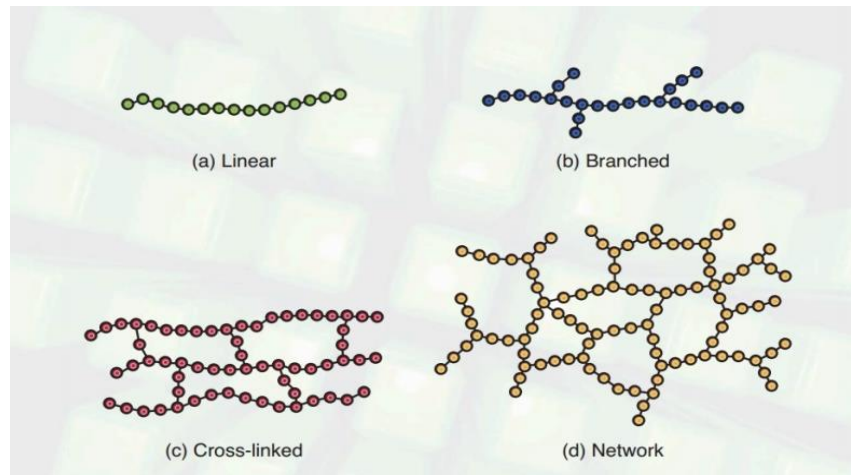


# Catene polimeriche

- Nel corso della polimerizzazione, i monomeri vengono uniti attraverso un legame covalente formando così una catena polimerica.



- Le catene polimeriche possono avere strutture differenti.





# I polimeri

- Si possono distinguere tre categorie di polimeri:

Materiali  
termoplastici

Materiali  
termoindurenti

Elastomeri





# Struttura dei polimeri

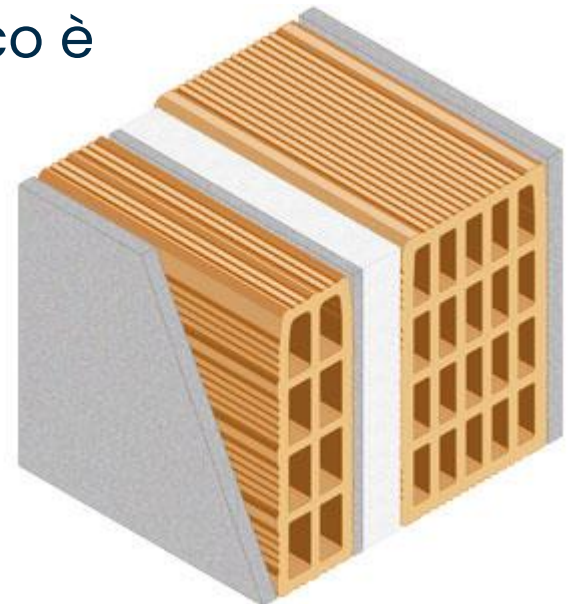
Monomer	Polymer repeating unit	
$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ \text{C} = & \text{C} \\   &   \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$	$\left( \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C} & -\text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{H} \end{array} \right)_n$	Polyethylene
$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ \text{C} = & \text{C} \\   &   \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array}$	$\left( \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C} & -\text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{CH}_3 \end{array} \right)_n$	Polypropylene
$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ \text{C} = & \text{C} \\   &   \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array}$	$\left( \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C} & -\text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{Cl} \end{array} \right)_n$	Polyvinyl chloride
$\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ \text{C} = & \text{C} \\   &   \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$	$\left( \begin{array}{cc} \text{H} & \text{H} \\   &   \\ -\text{C} & -\text{C}- \\   &   \\ \text{H} & \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} \right)_n$	Polystyrene
$\begin{array}{c} \text{F} & \text{F} \\   &   \\ \text{C} = & \text{C} \\   &   \\ \text{F} & \text{F} \end{array}$	$\left( \begin{array}{cc} \text{F} & \text{F} \\   &   \\ -\text{C} & -\text{C}- \\   &   \\ \text{F} & \text{F} \end{array} \right)_n$	Polytetrafluoroethylene (Teflon)





# Materiali termoplastici

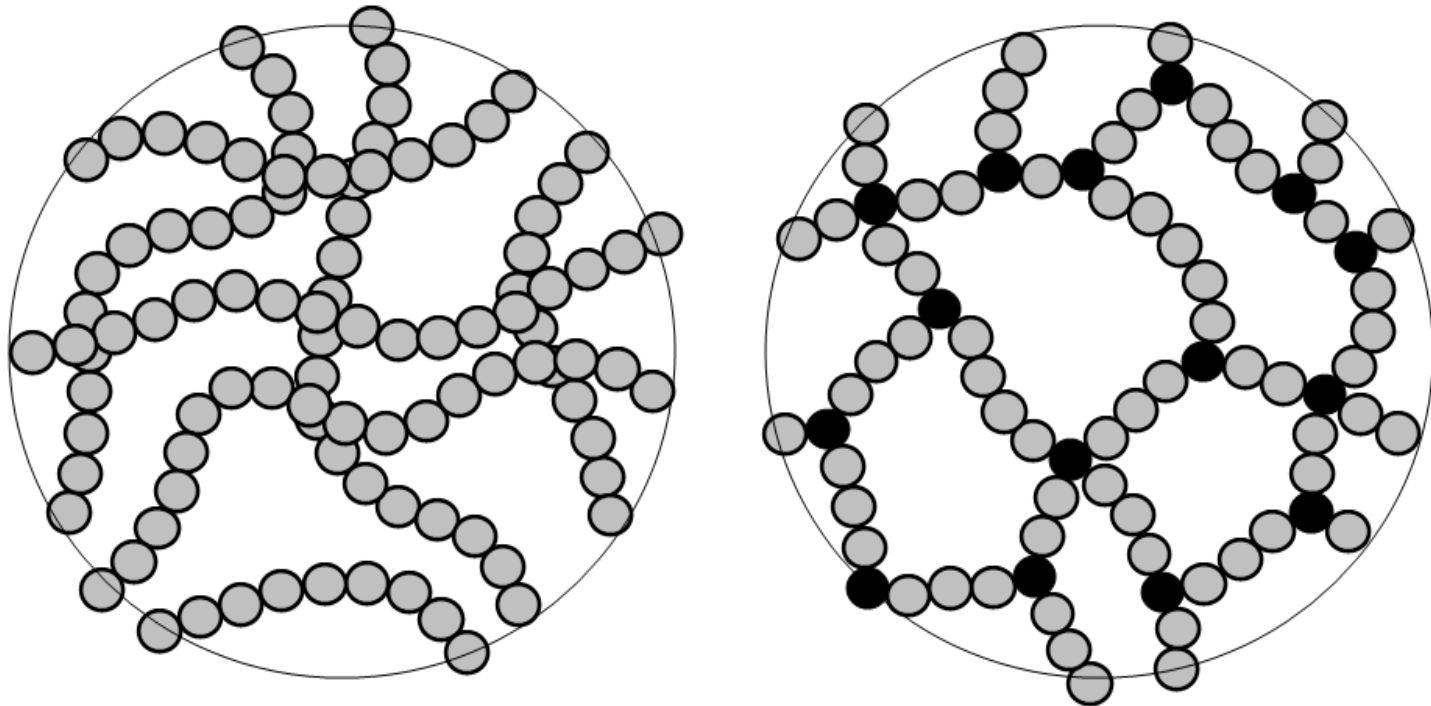
- Per essere portati allo stato di plastificazione e modellati, richiedono calore. Il polimero ritorna alla sua originale durezza se viene successivamente raffreddato; in altre parole, gli effetti del processo sono reversibili.
- Cicli ripetuti di riscaldamento e raffreddamento dei termoplastici possono causarne la degradazione (invecchiamento termico).
- Un esempio di polimero termoplastico è
- il polistirene:





# Materiali termoindurenti

- Quando le lunghe catene di un polimero vengono reticolate nelle tre dimensioni, la struttura diventa un'unica molecola gigante con forti legami covalenti (polimeri termoindurenti). Reazione di reticolazione irreversibile: un successivo riscaldamento non modifica la forma.





# Elastomeri

- Gli **elastomeri** sono materiali in grado di recuperare in modo sostanziale le dimensioni e la forma originaria dopo che un carico, ad esso applicato, è stato rimosso.





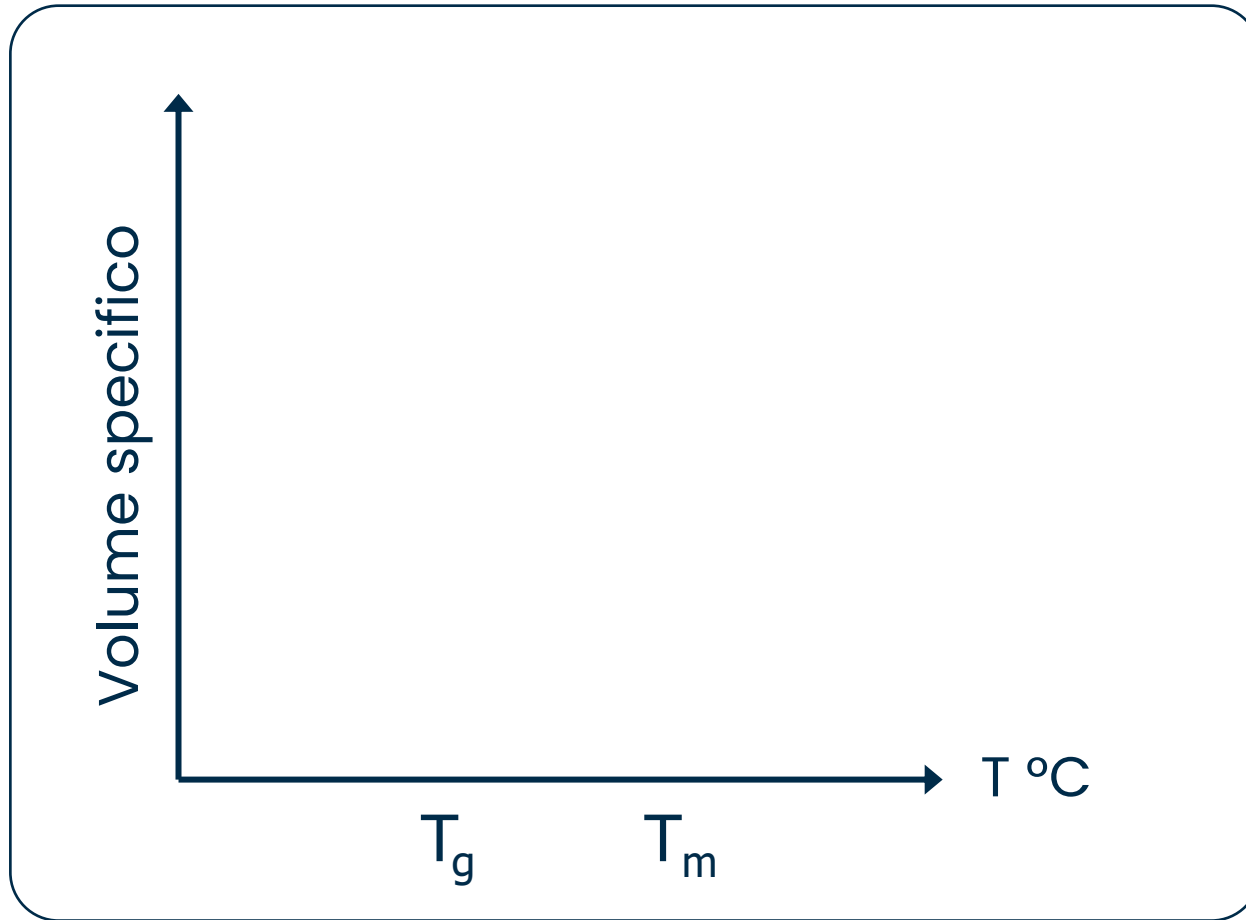
# La vulcanizzazione

Lo zolfo crea un legame di saldatura forte fra le macromolecole della gomma naturale





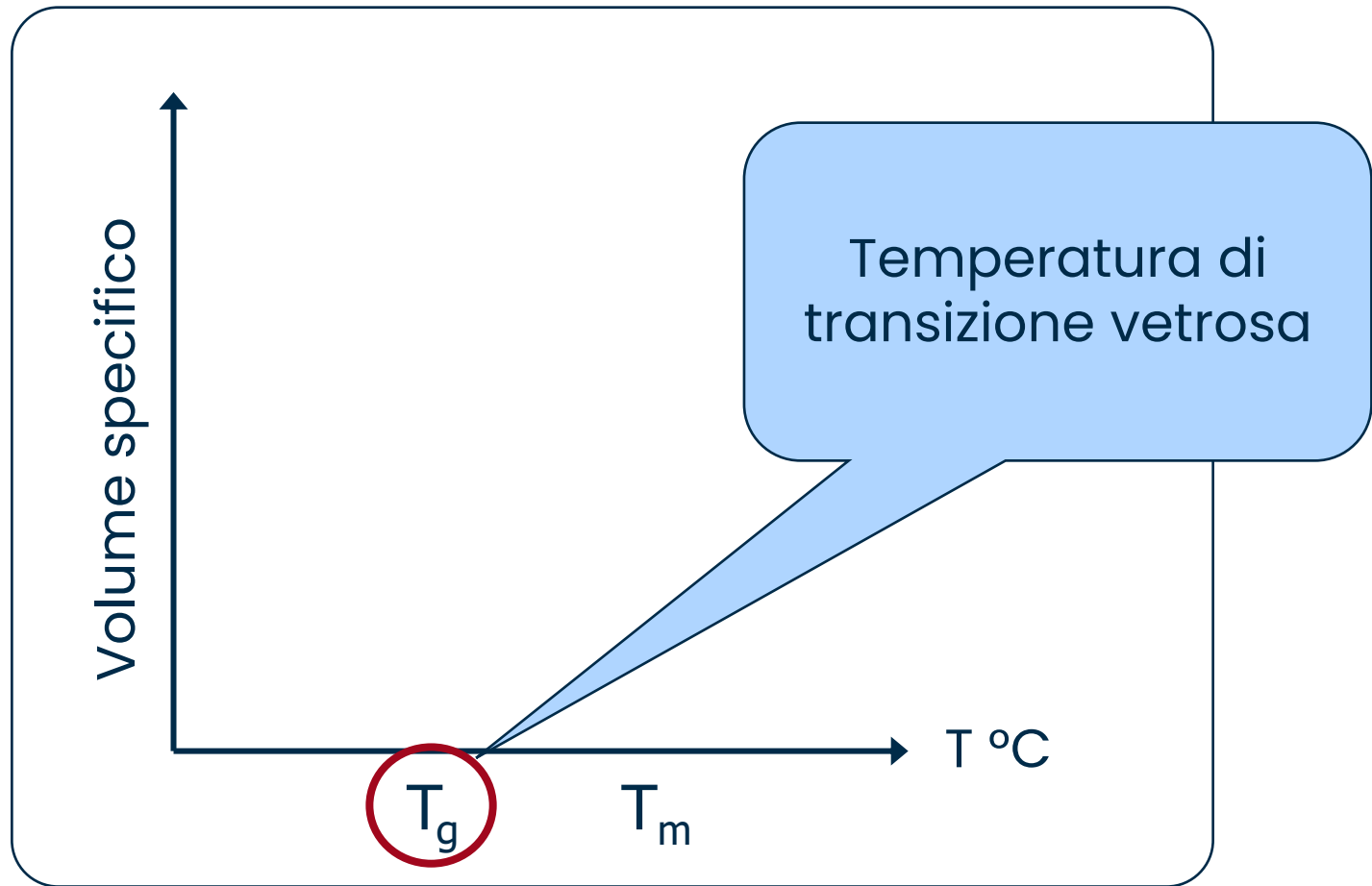
# Il processo di solidificazione





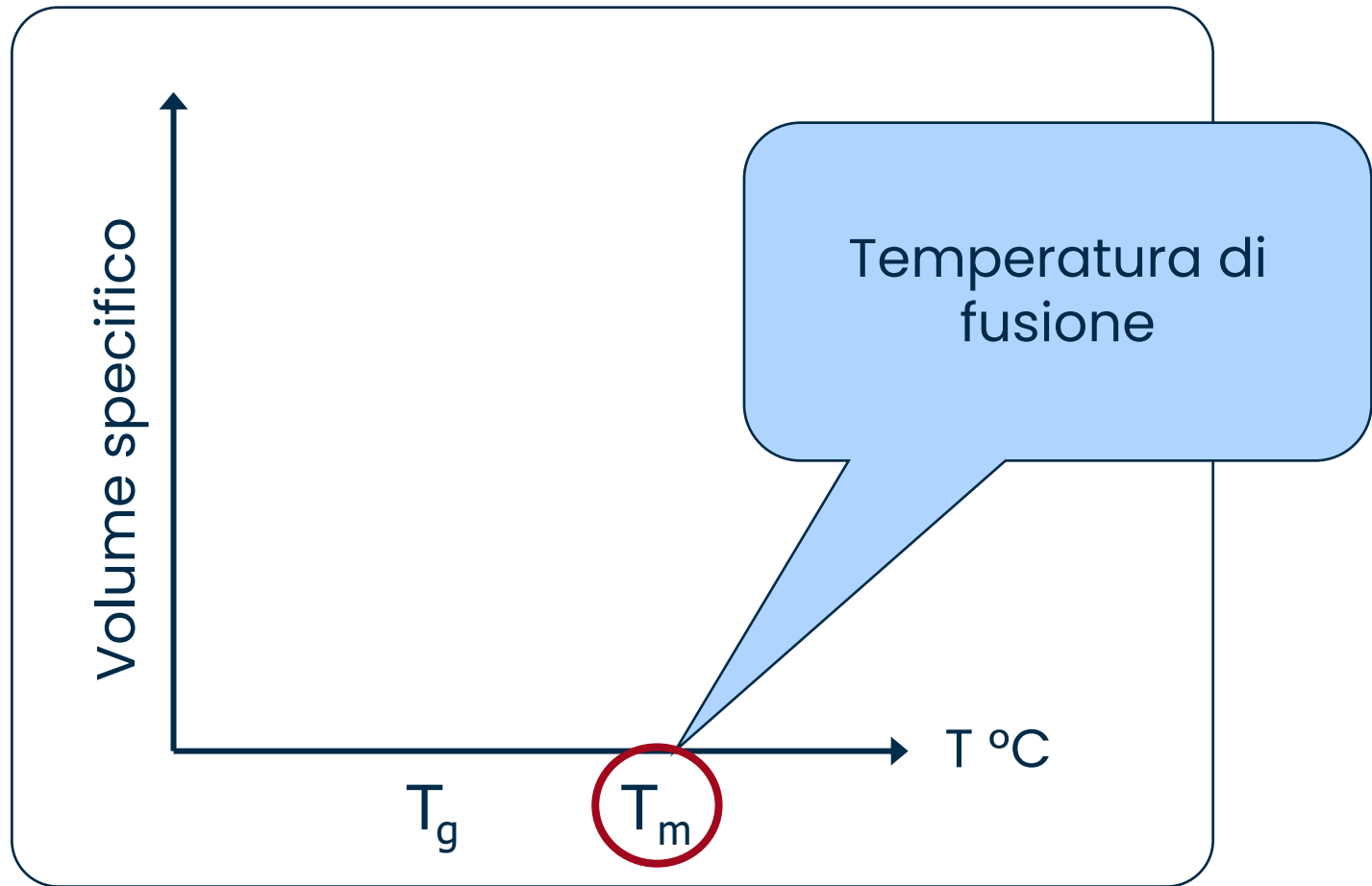


# Il processo di solidificazione



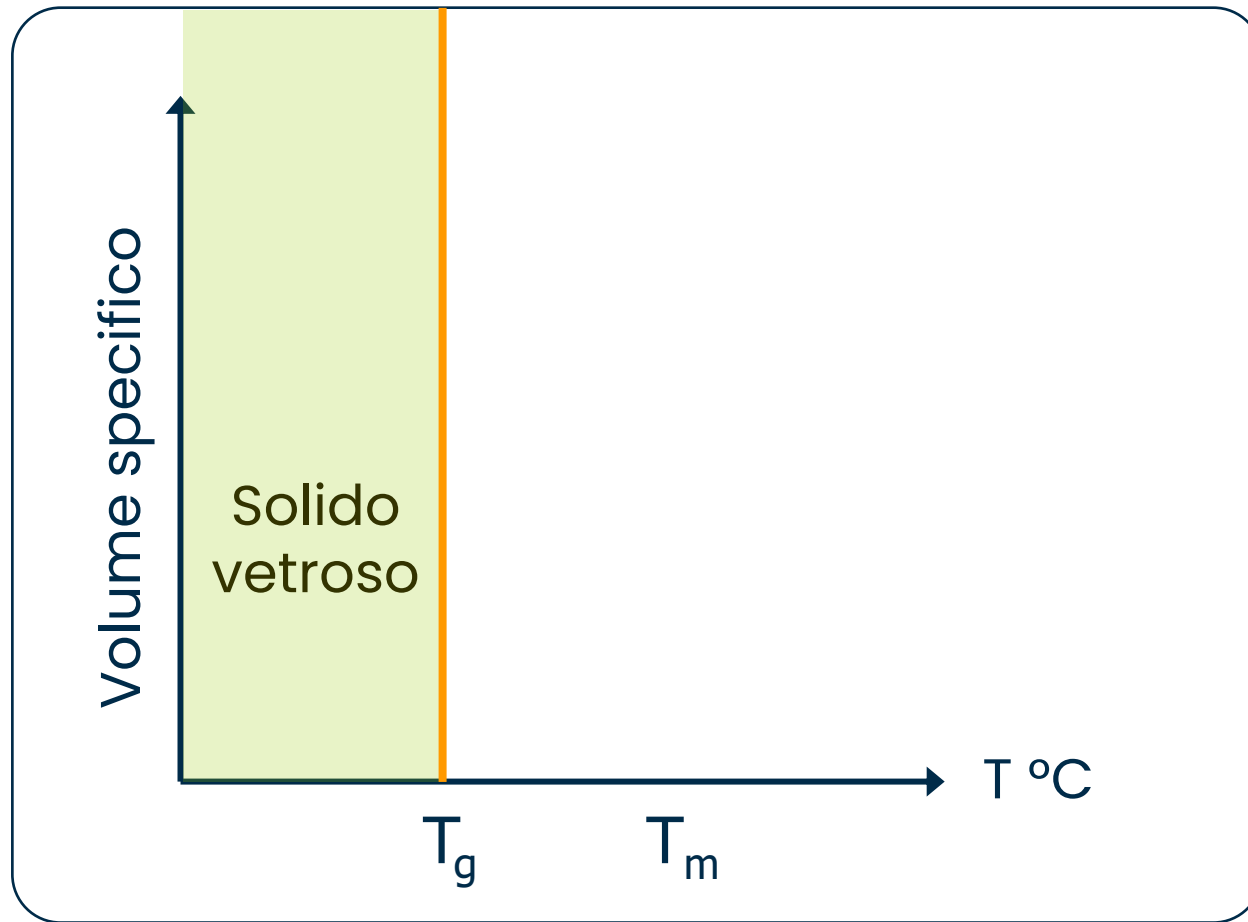


# Il processo di solidificazione



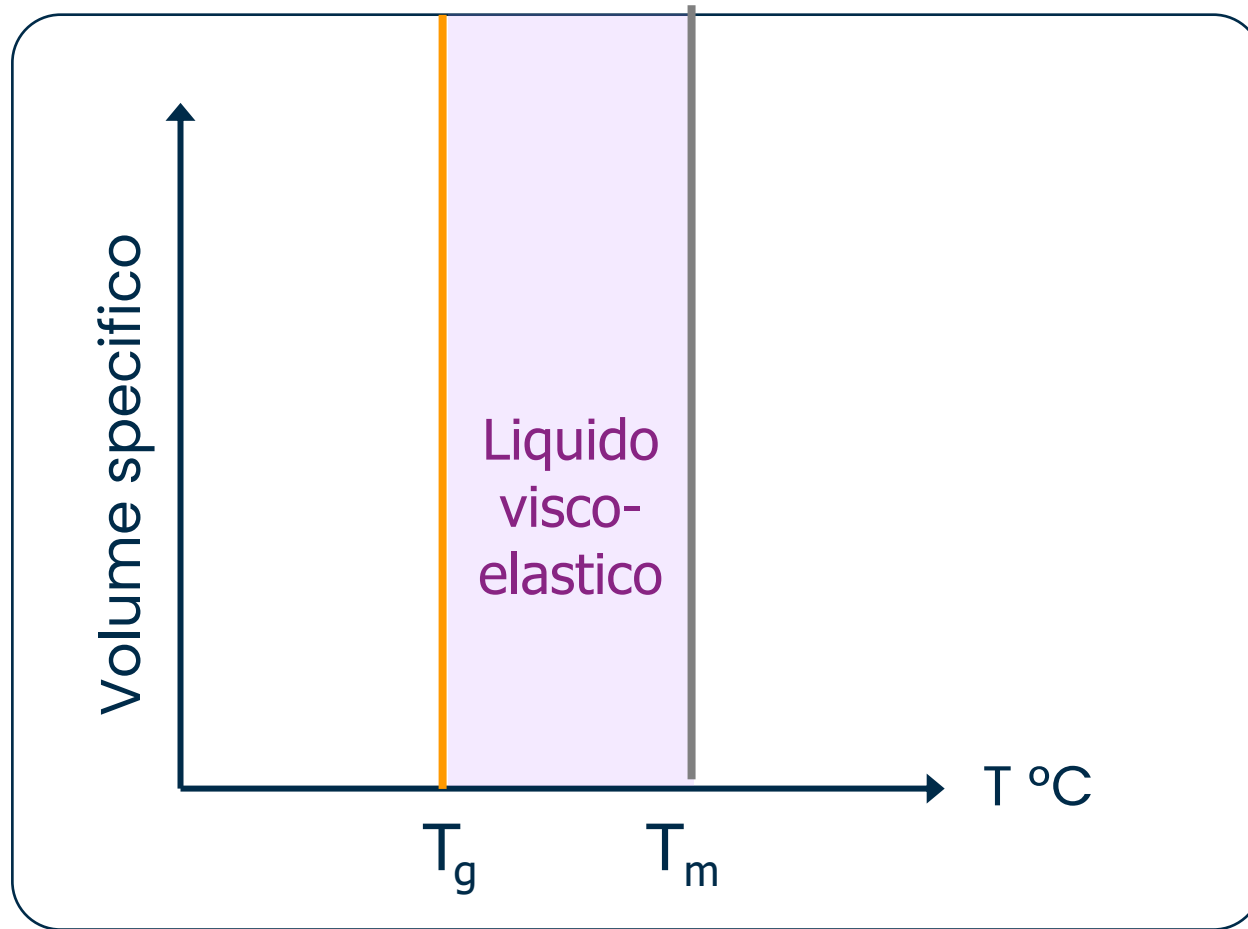


# Il processo di solidificazione



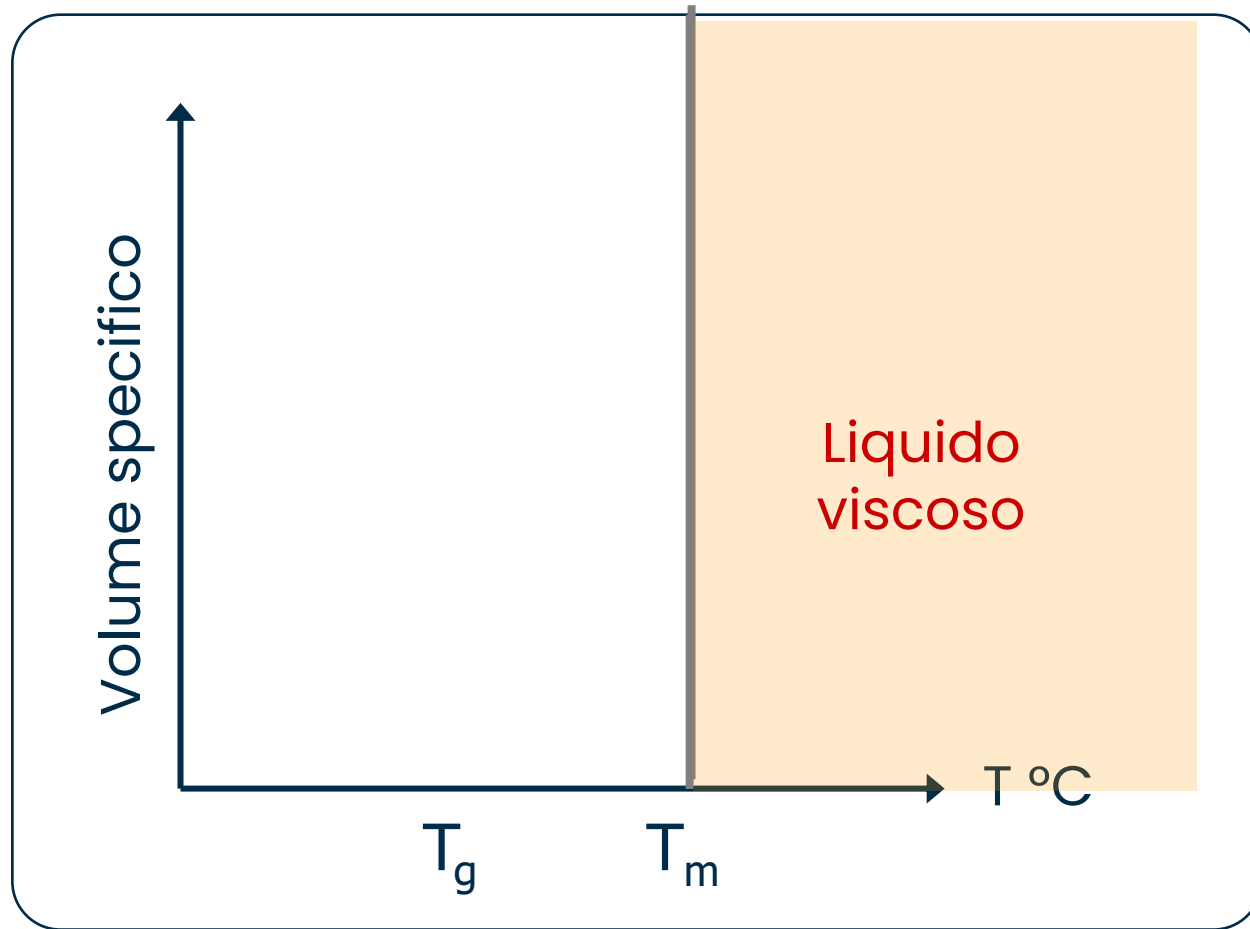


# Il processo di solidificazione



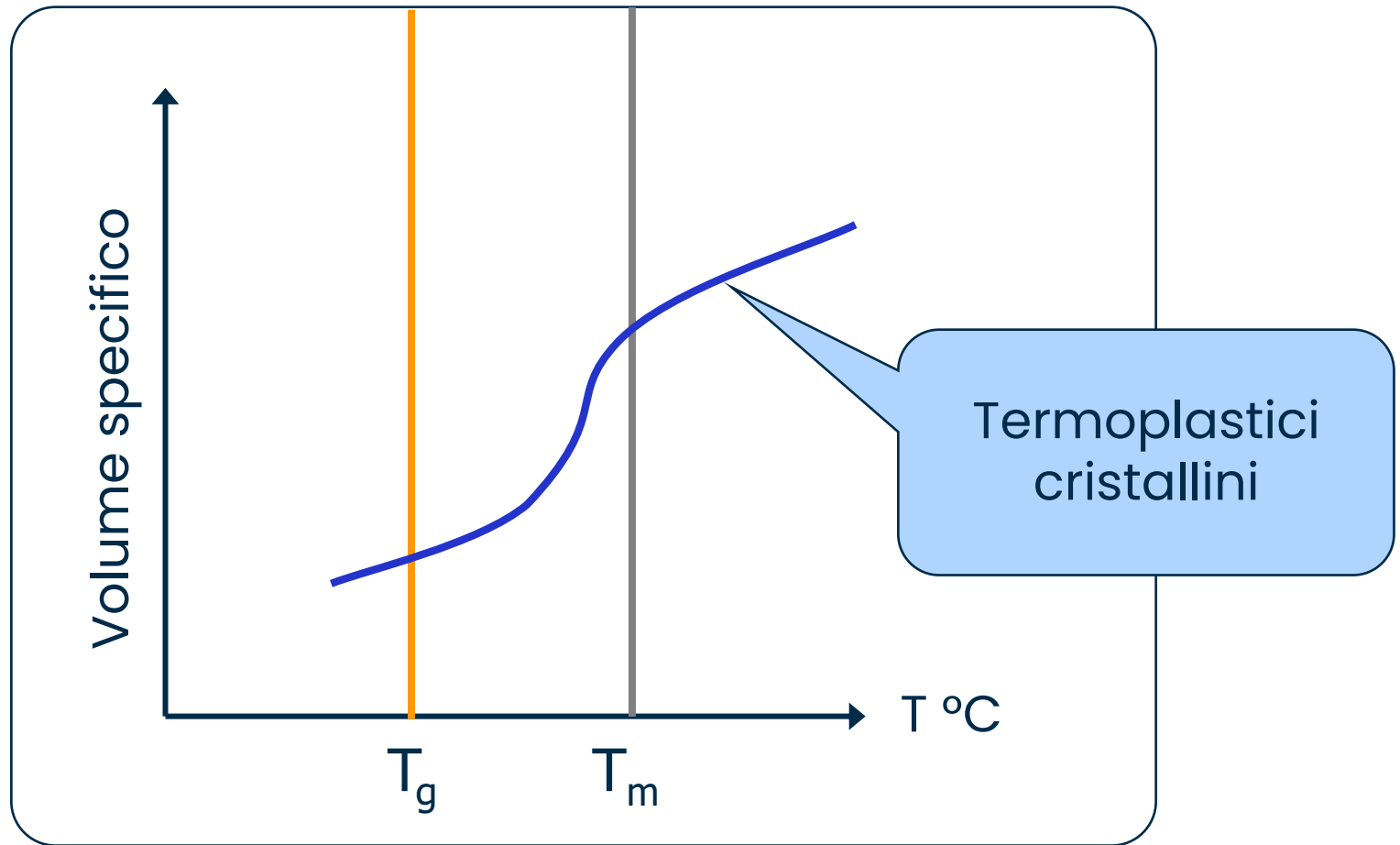


# Il processo di solidificazione



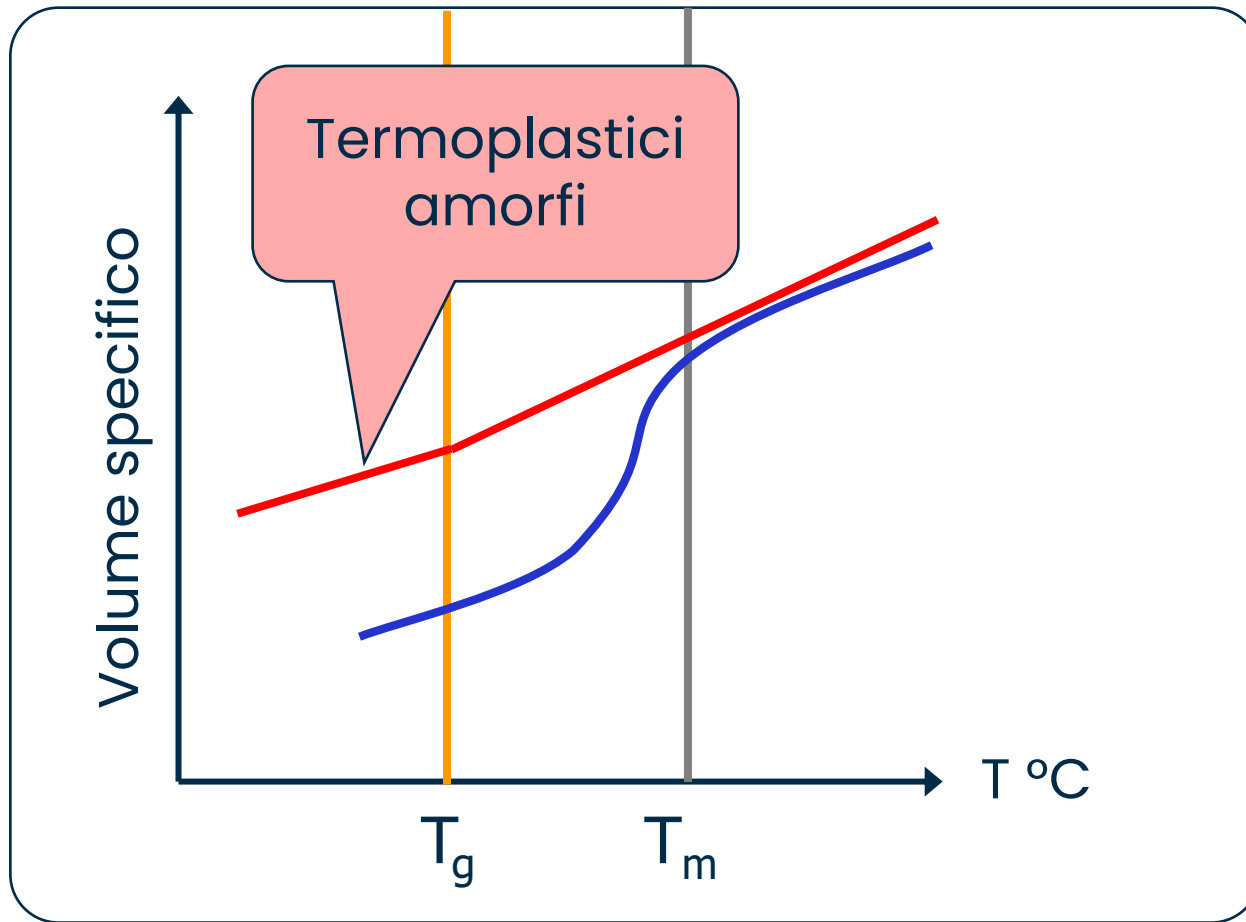


# Il processo di solidificazione





# Il processo di solidificazione





# Requisiti di un materiale polimerico

Un polimero  
termoplastico  
amorfo

- $T_g < T_{\text{esercizio}}$

Un polimero  
termoindurente

- $T_{\text{esercizio}} < T_g$  Rigidezza
- $T_{\text{esercizio}} > T_g$  deformabilità







# Caratteristiche fisico – chimiche

- Bassa densità ( $< 1 \text{ Kg/dm}^3$ )
- Resistenza a trazione su valori ( $R_M < 70 \text{ MPa}$ )
- Resistenza all'urto ( $21 \div 750 \text{ J/m}$ )
- Capacità di isolamento elettrico ( $15 \div 70 \text{ V/m}$ )
- Bassa T massima ( $50 \div 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ) eccetto il teflon ( $290^\circ\text{C}$ )





# Riepilogo

La struttura metallica  
Il reticolo cristallino  
I metalli: tipologie  
I metalli: i trattamenti termici  
I materiali polimerici



Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union

