

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

***Relazione per la prova finale***  
***Leghe leggere nell'industria***  
***dell'automobile***

Tutor universitario: Prof. Katya Brunelli

Laureando: *Marco Lombardi*

Padova, 16/09/2025

## Obiettivi:

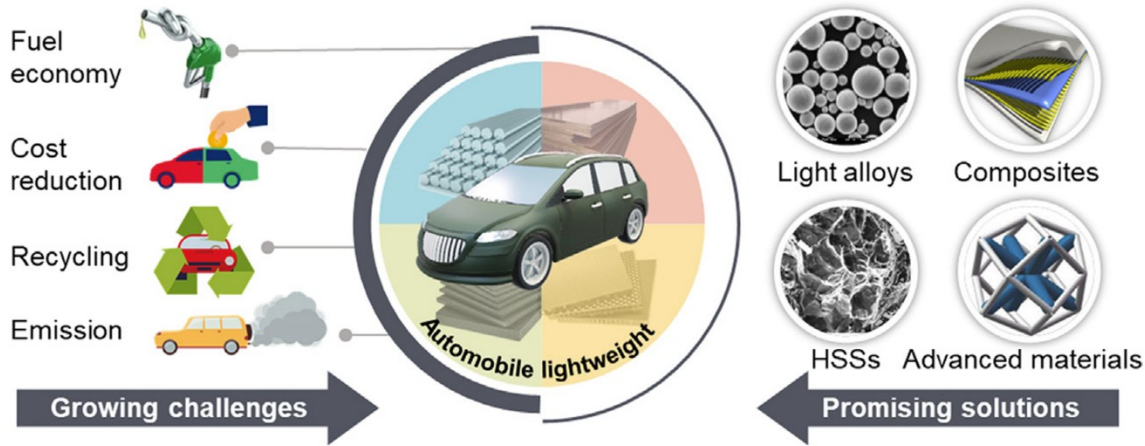
- Ridurre la spesa di energia/km
- Ridurre le emissioni/km

## Modalità:

- Incrementare l'efficienza dei sistemi di trazione
- Ridurre il peso dei veicoli

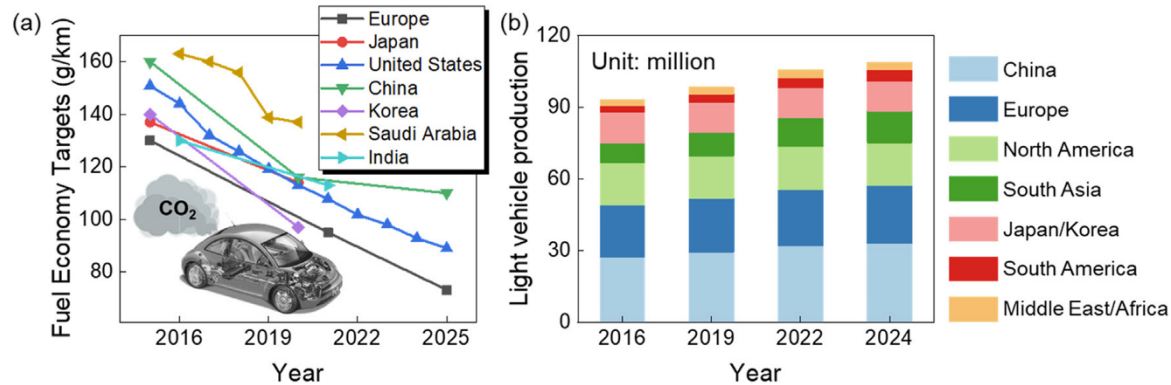
## Soluzioni (materiali ad uso strutturale):

- Acciai ad alta resistenza
- Materiali compositi
- **Leghe leggere**



**Alluminio** **Magnesio** **Titanio**

**Esigenze componenti**



Proprietà	Al	Mg	Ti
Densità $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	~ 2.70	~ 1.74	~ 4.51
Struttura cristallina	CFC	EC	EC / CCC (> 882°C)
Carico di snervamento $\sigma_y$ [MPa]	35–100	20–100	~ 275
Resistenza a trazione $\sigma_{UTS}$ [MPa]	90–150	100–200	350–600
Punto di fusione [°C]	660	650	1668
Modulo elastico $E$ [GPa]	~ 69	~ 45	~ 110
Resistenza specifica $\sigma/\rho$	40–55	55–65	80–130

**Esigenze**

**Scelta materiale**

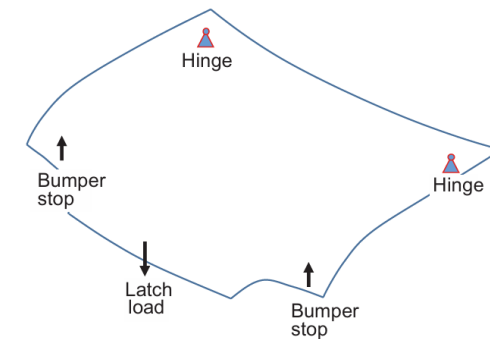
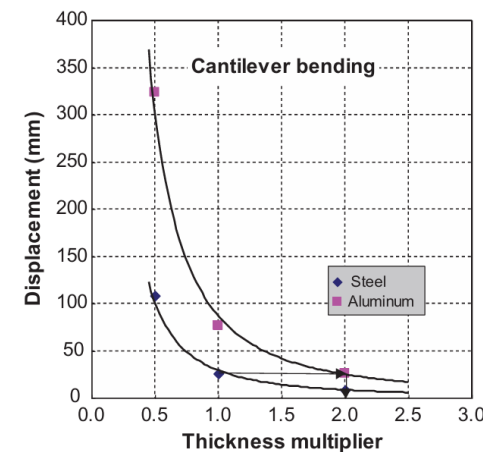
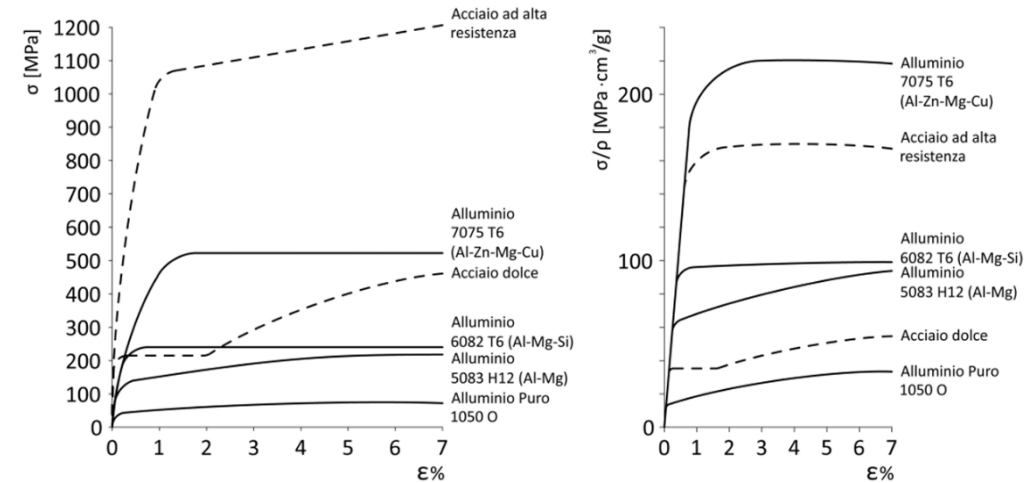
- *Costi*
- *Natura (densità, resistenza, durezza, corrodibilità, comportamento a caldo, ...)*
- *Trattamenti eseguibili*
- *Lavorabilità (caldo/freddo), compatibilità con processi produttivi*
- *Durabilità e riciclabilità*
- *Tecniche di assemblaggio*

## Qualità tipiche:

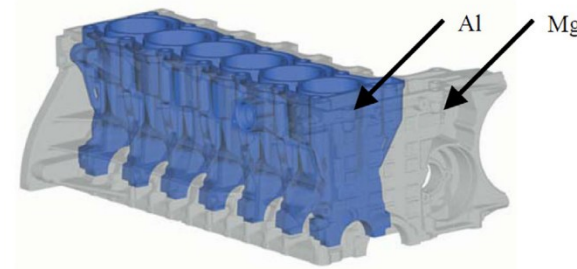
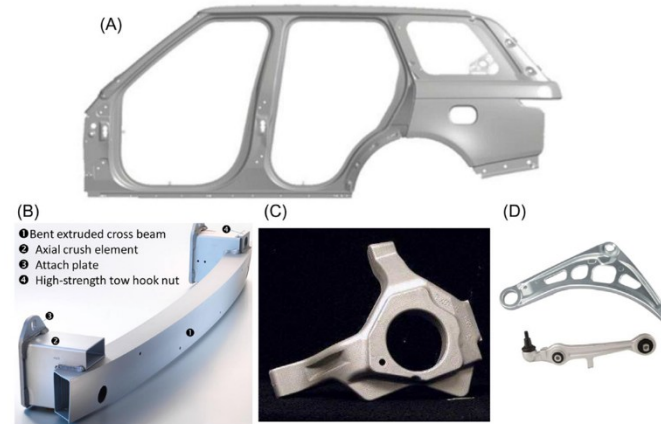
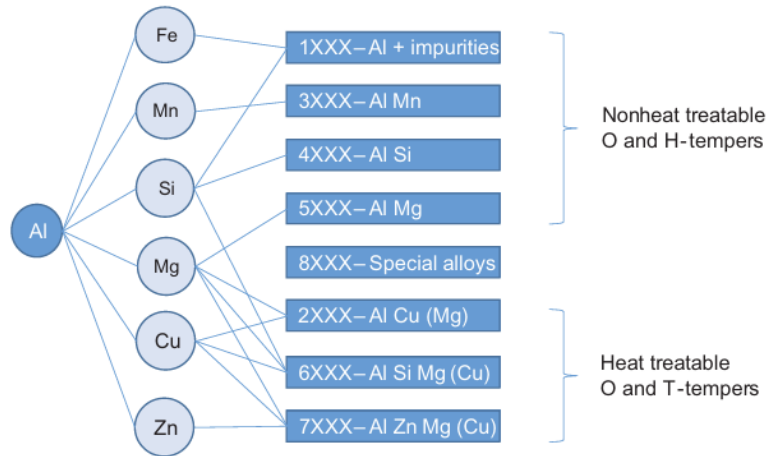
- Buone proprietà meccaniche specifiche
- Elevata capacità di assorbire energia negli impatti
- Buona resistenza alla corrosione
- Elevata qualità di superficie

## Altre Caratteristiche:

- Materiale metallico leggero ad oggi più diffuso nelle automobili, è il meno costoso
- Risparmio di peso reale rispetto agli acciai: 50%



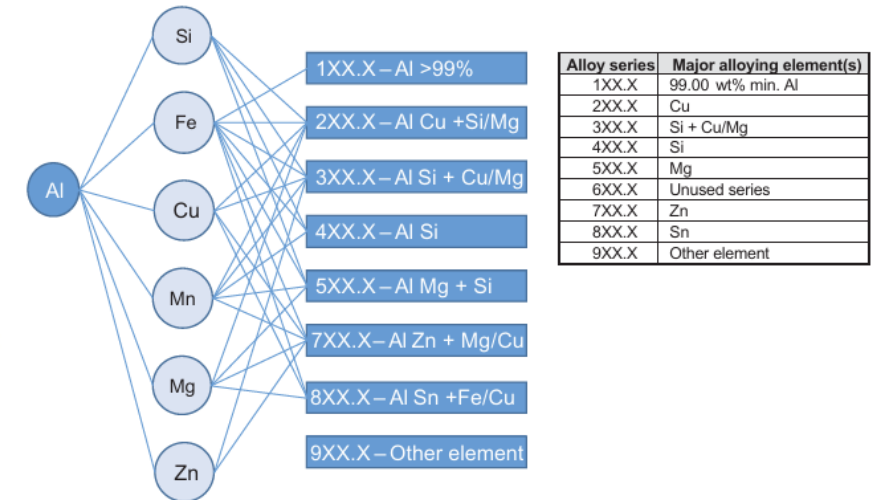
## Leghe da deformazione plastica



### Impieghi tipici:

- Pannelli carrozzeria esterni e interni, da estrusione e piegatura

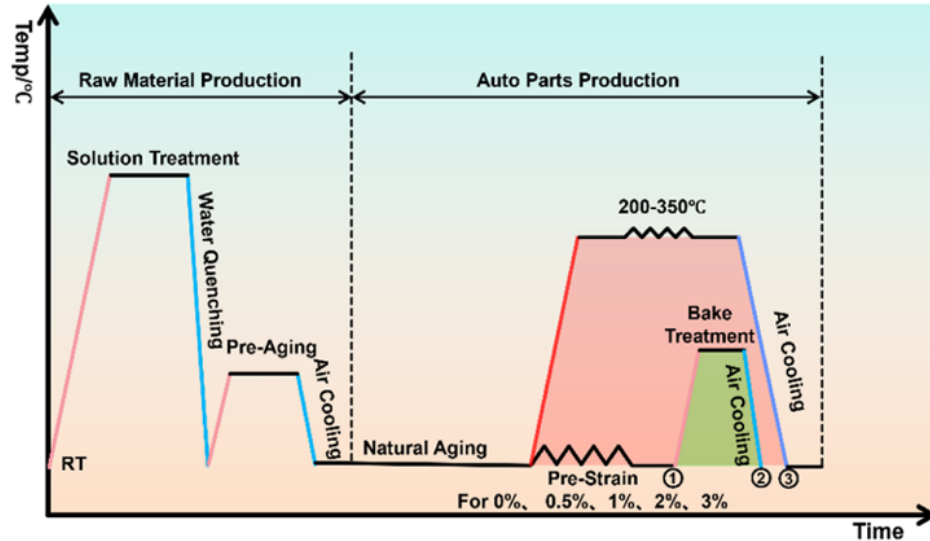
## Leghe da fonderia



### Impieghi tipici:

- Sospensioni, cerchi, supporti telaio, strutture motore

## Massimizzare le proprietà meccaniche dalla combinazione di diversi trattamenti



### Preparazione materiale (Ergal 7075):

- Proveni da foglio laminato a freddo
- Solubilizzazione, 460°C per 30 minuti
- Tempra, acqua a temperatura ambiente
- Invecchiamento, 160°C per 10 minuti

### Lavorazione pezzo:

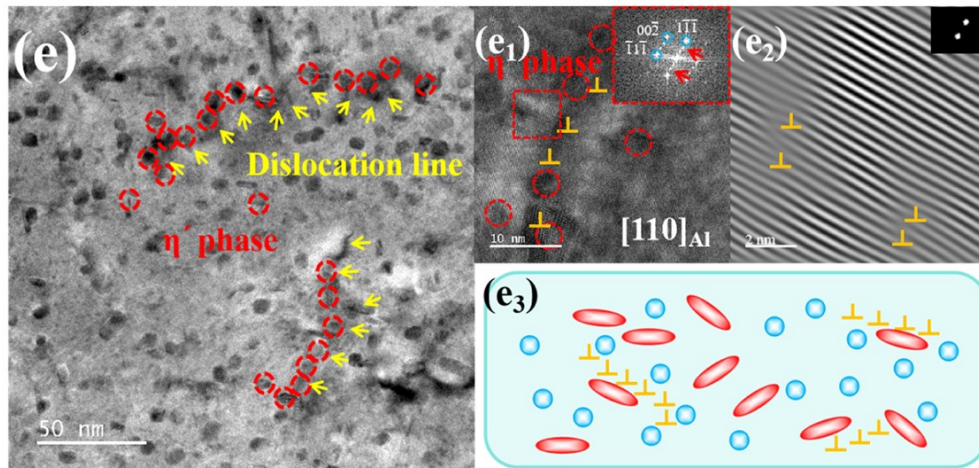
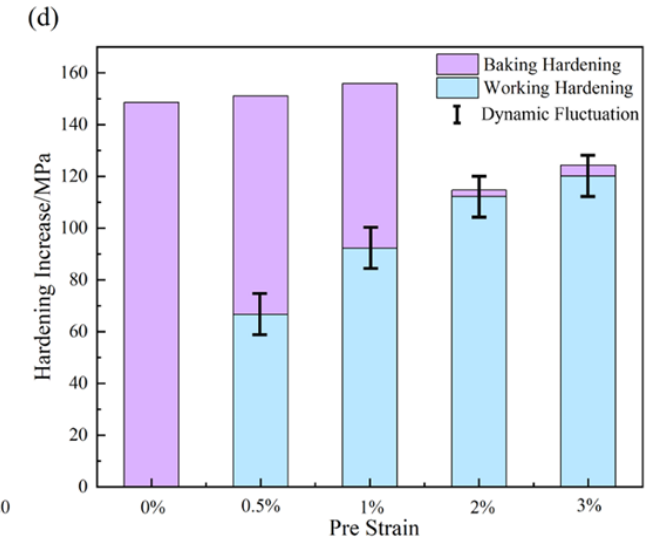
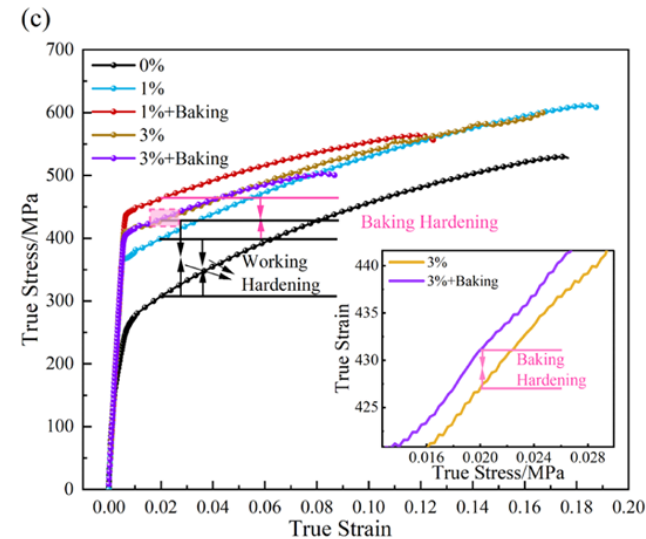
- Deformazione a freddo (**percorso 1**)
- Deformazione a freddo più nuovo riscaldamento (**percorso 2**)
- Deformazione a caldo (200-350°C, **percorso 3**)

	Serie	System	Main hardening phase	Typical mechanical properties of wrought alloys (MPa)							
				0	100	200	300	400	500	600	700
Nonheat treatable	1000	Al		[Bar chart showing YS and UTS for Al alloy]							
	3000	Al-Mn		[Bar chart showing YS and UTS for Al-Mn alloy]							
	4000	Al-Si		[Bar chart showing YS and UTS for Al-Si alloy]							
	5000	Al-Mg		[Bar chart showing YS and UTS for Al-Mg alloy]							
Heat treatable (age hardening)	2000	Al-Cu-(Mg)	Al <sub>2</sub> Cu (Al <sub>2</sub> CuMg)	[Bar chart showing YS and UTS for Al-Cu alloy]							
	6000	Al-Mg-Si-Cu	Mg <sub>2</sub> Si Mg <sub>2</sub> SiCu	[Bar chart showing YS and UTS for Al-Mg-Si-Cu alloy]							
	7000	Al-Zn-Mg	MgZn <sub>2</sub>	[Bar chart showing YS and UTS for Al-Zn-Mg alloy]							
	7000 + Cu	Al-Zn-Mg-Cu	MgZn <sub>2</sub> Cu	[Bar chart showing YS and UTS for Al-Zn-Mg-Cu alloy]							

■ YS ■ UTS

## Percorso 2, caso migliore, 1% $\epsilon$ + riscaldamento

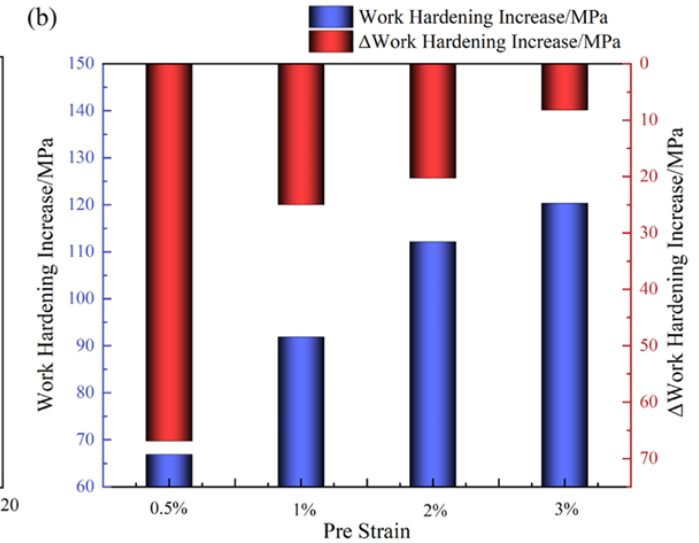
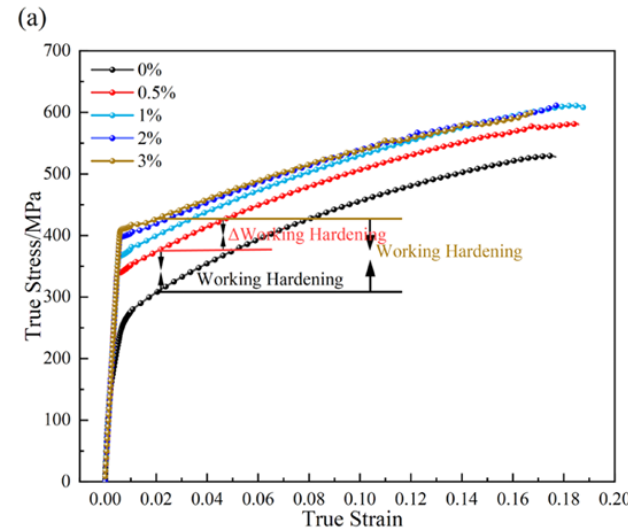
- 1% + riscaldamento offre le proprietà meccaniche migliori
- Dislocazioni come siti ad elevata energia, ospitano la formazione di precipitati
- Dislocazioni aiutano la ottimale dispersione del precipitato



- $\epsilon < 1\%$ : non viene raggiunta la dispersione ottimale di dislocazioni
- $\epsilon > 1\%$ : eccessiva densità di dislocazioni, calore induce principalmente annichilazione e riassetto
- $\epsilon = 1\%$ : omogenea e ottimale distribuzione di dislocazioni, precipitati ottimamente dispersi

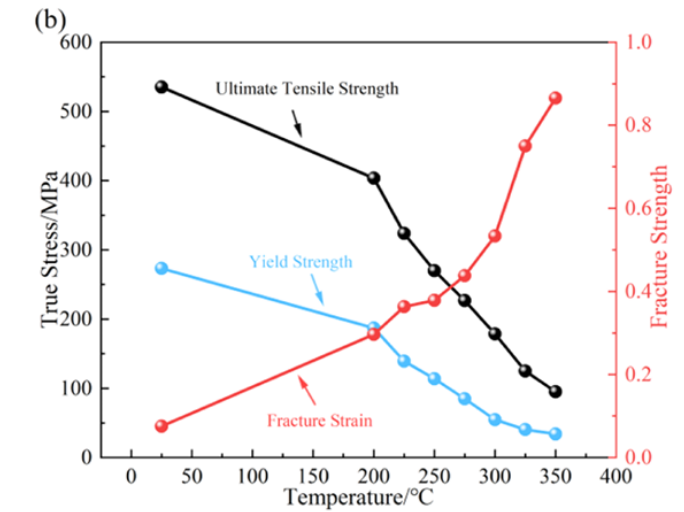
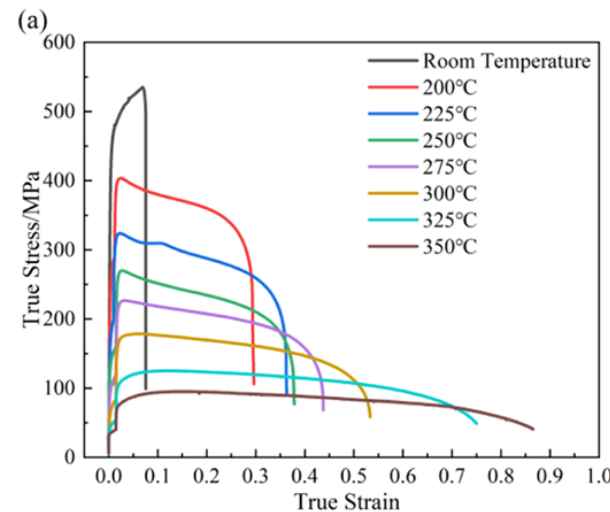
## Percorso 1

- *Incrudimento*
- *Cresce il limite di snervamento*
- *Aumenta il numero di dislocazioni, comportamento fragile*
- *Diminuisce la duttilità*



## Percorso 3

- *Incrudimento bilanciato da addolcimento*
- *Deformazioni a rottura elevate, cresce la formabilità*
- *Ricristallizzazione dinamica in prossimità delle dislocazioni*



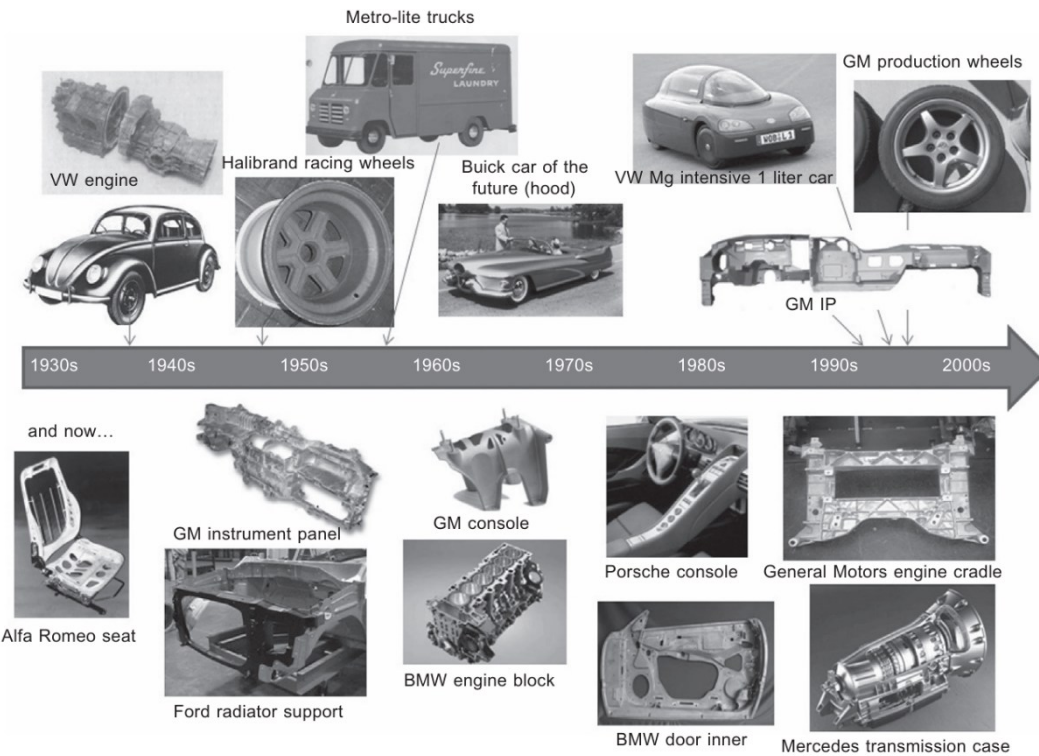
## Qualità tipiche:

- Più leggero materiale metallico ad uso strutturale, alte proprietà meccaniche specifiche
- Densità di  $1,74 \text{ g/cm}^3$  in competizione con i materiali compositi in fibra di carbonio, costi inferiori

## Altre caratteristiche:

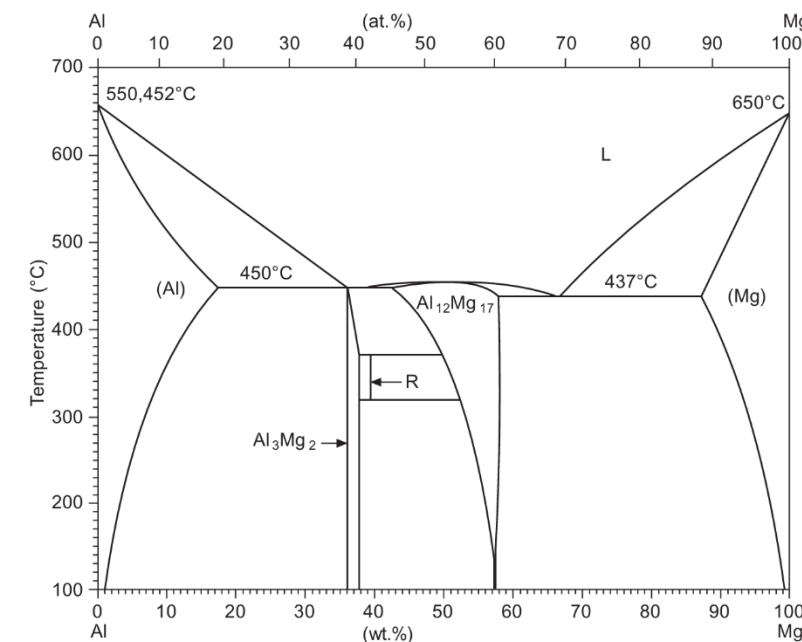
- Lavorabilità a freddo decisamente limitata, struttura EC poco duttile
- Elevata reattività, infiammabilità e tendenza alla corrosione
- Ridotta resistenza al calore, alla fatica e al creep

## Impieghi:



## Ruolo degli elementi alliganti

<b>Elemento</b>	<b>Effetto</b>
Alluminio	Principale alligante, aumenta resistenza, durezza e resistenza alla corrosione, riduce la duttilità sopra il 5% in peso
Zinco	Aumenta la resistenza, riduce la duttilità, aumenta la fragilità a caldo
Manganese	Aumenta la resistenza alla corrosione nelle leghe Mg-Al
Terre Rare	Aumentano resistenza e durezza, aumentano resistenza al creep
Silicone	Aumenta la fluidità nei processi di fonderia
Zirconio	Affina la grana cristallina nei processi di fonderia a bassa pressione
Litio	Riduce la densità e aumenta la duttilità, aumenta la tendenza alla corrosione
Torio, Ittrio, Calcio, Stronzio	Aumentano la resistenza al creep
Ferro, Carbonio, Nickel	Riducono la resistenza alla corrosione



## Leghe da fonderia, influenza della composizione nella resistenza al creep

### AZ:

- Mg-Al-Zn-Mn
- Resistenti, poco duttili
- Scarsa resistenza al creep ( $Mg_{17}Al_{12}$ )

### AS:

- Al-Si
- $Mg_2Si$ , resistenza al creep
- Bassa resistenza meccanica

### AX-AXJ:

- Al-Alcalino terrosi
- Fasi stabili alle elevate temperature, buona resistenza al creep



### AM:

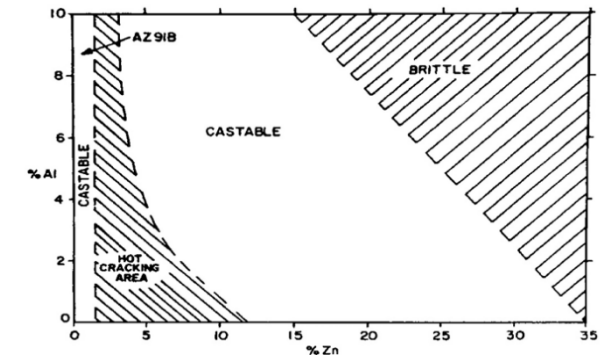
- Mg-Al-Mn
- Più duttili delle AZ (Al max 5-6%)
- Scarsa resistenza al creep ( $Mg_{17}Al_{12}$ )

### AE:

- Al-Terre Rare
- $Mg_9E$  e  $Al_{11}E$ , buona resistenza al creep ma fragilità a caldo

### ZA:

- Zinco come principale alligante
- $\tau-Mg_{32}(Al,Zn)_{49}$ , ottima resistenza al creep
- Rapporto Zn/Al regola la compatibilità con i processi di fonderia



## Qualità tipiche:

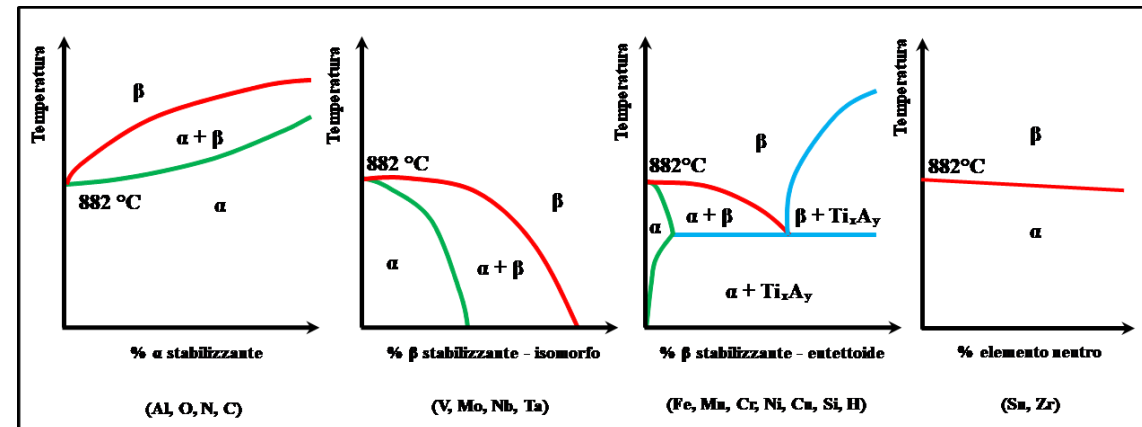
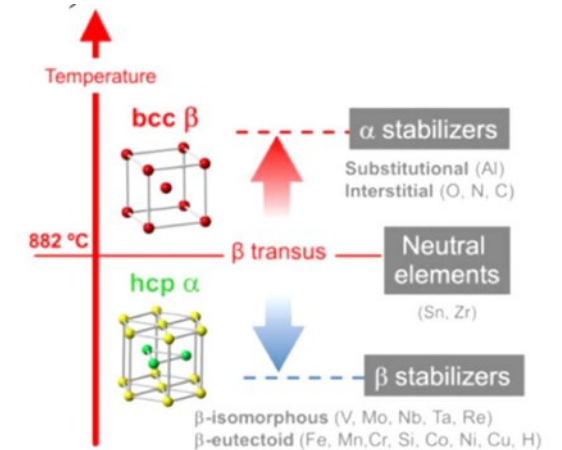
- Alte proprietà meccaniche specifiche
- Elevata capacità di assorbire energia negli impatti
- Alta resistenza alla corrosione
- Alta resistenza alle elevate temperature

## Altre caratteristiche:

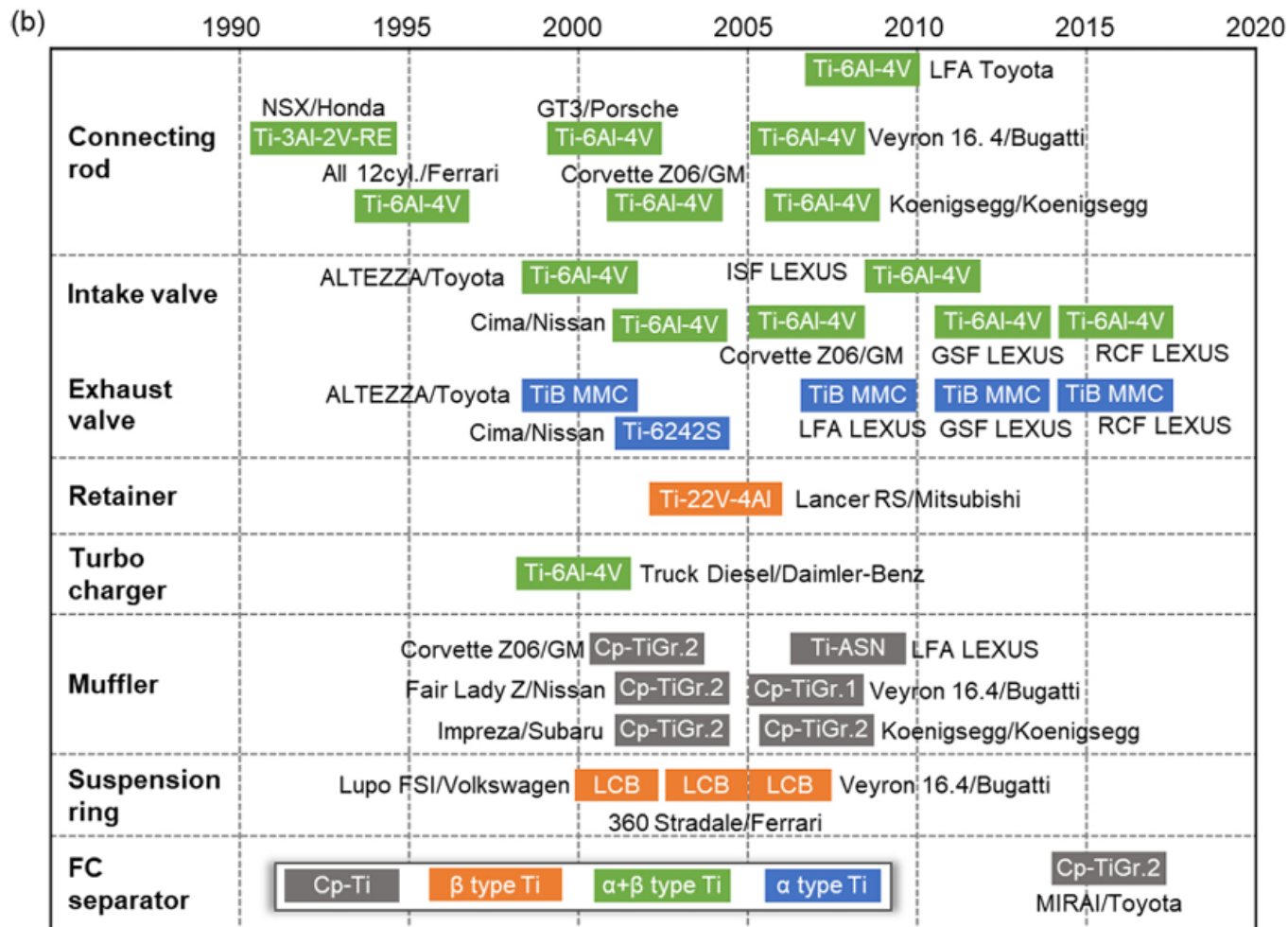
- Due forme allotropiche:  $\alpha$  EC e  $\beta$  CCC (trasformazione a 882°C)
- Duttilità  $\alpha$ -Ti migliore di quella del Mg, a parità di struttura cristallina
- Ridotta resistenza all'usura

## Famiglie:

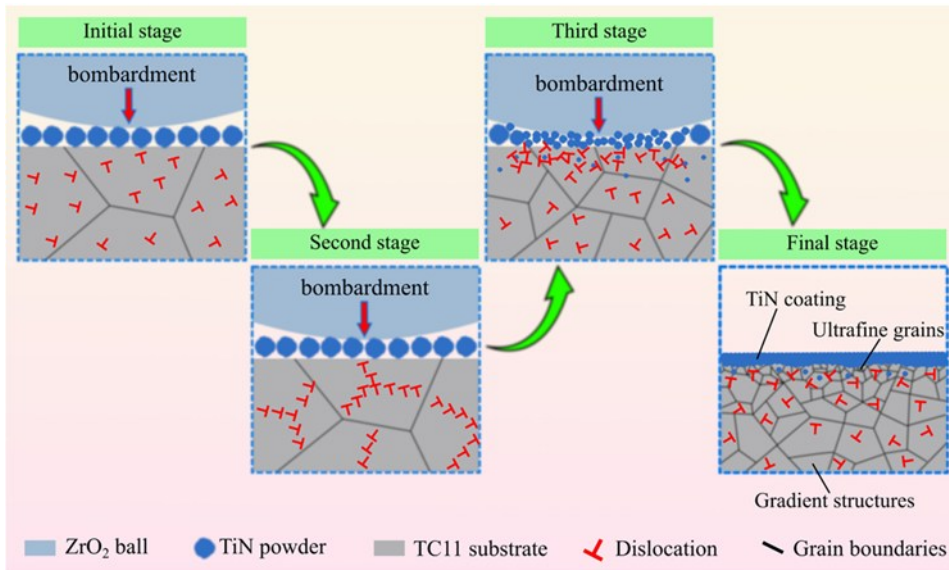
- $\alpha$ , EC elevata resistenza alla corrosione, proprietà meccaniche simili a quelle del Ti puro
- $\alpha+\beta$ , elevata resistenza al creep e alle elevate temperature
- $\beta$  mantengono struttura CCC dopo tempra, elevate proprietà meccaniche



## Impieghi:

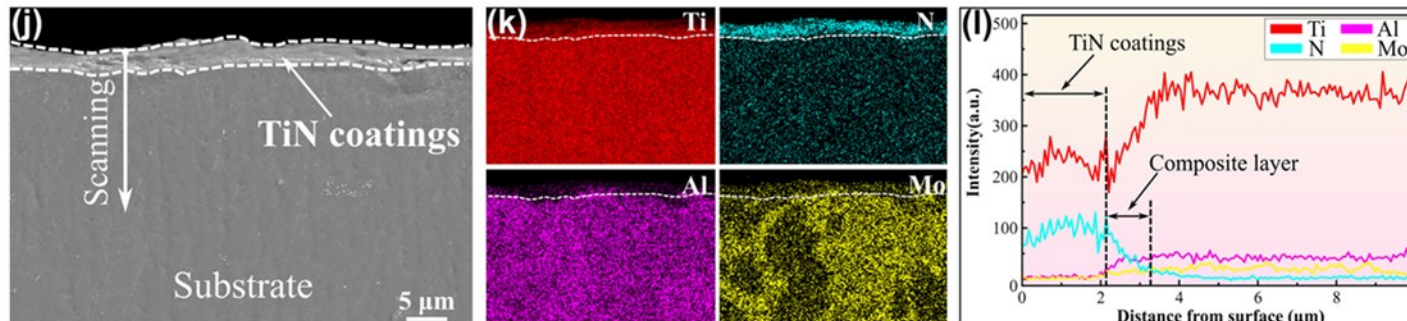


## Aumentare la resistenza all'usura tramite pallinatura e nitrurazione



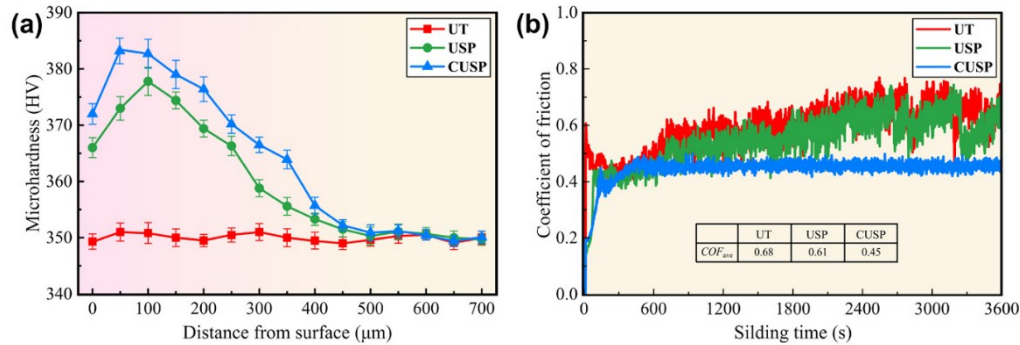
### Preparazione materiale (TC11, lega $\alpha + \beta$ ):

- Dischi di dimensione  $\phi 30 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , levigati e puliti
- Eseguita pallinatura più nitrurazione, gruppo CUSP (Combined Ultrasonic Shot Peening)
- Gruppo di controllo USP, pallinatura semplice
- Gruppo di controllo UT, non trattato



Immagini SEM e scansione EDS testimoniano buona penetrazione TiN

## Procedura ed effetti CUSP

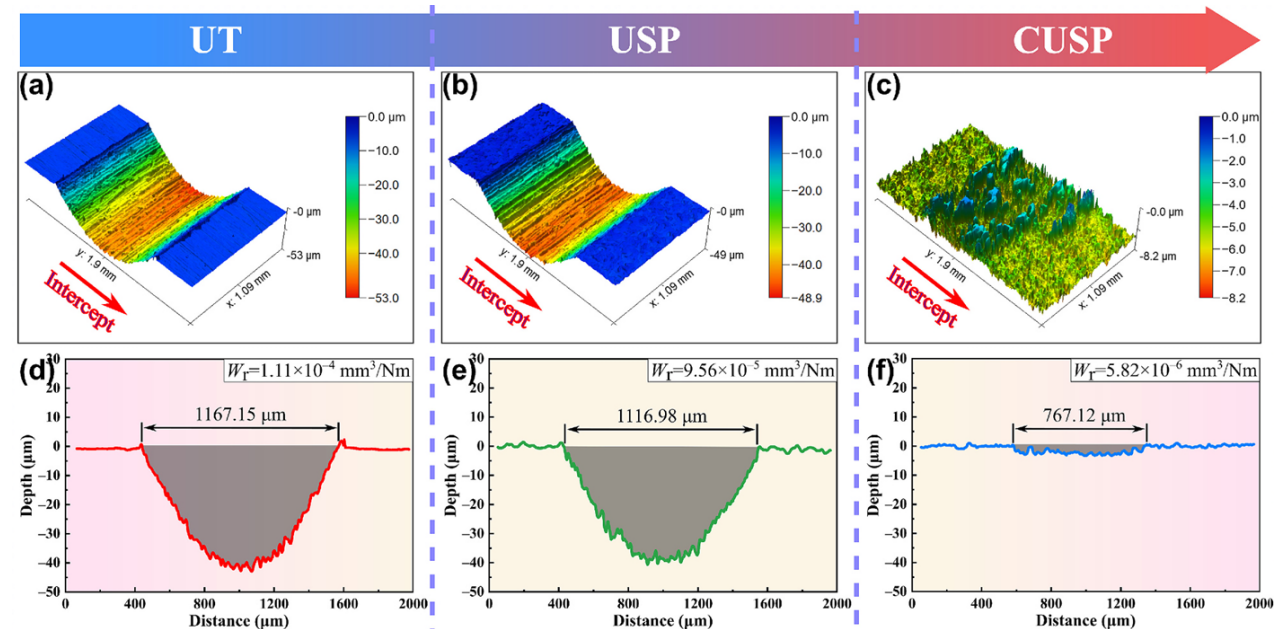


- *Bombardamento produce alto grado di incrudimento, elevato numero di dislocazioni in prossimità della superficie*
- *Si osserva ricristallizzazione dinamica, nuovi bordi grano*
- *Polvere di TiN viene incorporata, blocca le dislocazioni con meccanismo di Orowan*

- *Pallinatura con ossido di zirconio ( $ZrO_2$ )*
- *Aggiunta polvere di nitruro di titanio, TiN (rapporto palline polvere 9:1 in massa)*

## Risultati CUSP:

- *Durezza superiore rispetto a USP e UT*
- *Ridotto attrito e canale di usura da test con sfera di acciaio*



## Applicazioni, la scelta del materiale in base alle esigenze del componente

### Alluminio:

- **7075**, bracci sospensione, supporti sterzo, Ferrari 296 GT3
- **5754**, pannelli carrozzeria, cofano, portiere, Ford F-150
- **319**, blocco motore, testata, Alfa Romeo Giulia e Stelvio



### Magnesio:

- **AJ62**, BMW Composite Engine
- **AZ80**, cerchi OZ Ultimate Magnesio
- **AZ91**, supporti motore, pompe olio, coperchi, Volkswagen Golf, Fiat Tipo



### Titanio:

- **Ti-6Al-4V**, bielle, valvole di aspirazione/scarico, Porsche 911 GT3
- **LCB (Ti-Fe-Mo-Al)**, molle e componenti sospensione Volkswagen Lupo

