



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1603A -

ANNO: 2015

# A P P U N T I

STUDENTE: Raviola

MATERIA: Scienza e Tecnologia dei Materiali + Eserci.  
Prof.Lombardi

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.


Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

<b>CAPITOLO 4</b>	
$\sigma = \varepsilon E$	modul elastico
$E = \frac{\Sigma}{\alpha_0}$	modul elastico $\Sigma =$ <i>esigibilità</i> del legame
$\gamma = G \chi$	modul di taglio (G)
$P = K \Delta$	pressione idrostatica (modul elasticità cubica)
$\nu = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon}$	coefficiente di Poisson
$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$	coff di Poisson, modulus elastico e di taglio
$K = -\frac{E}{3(1-2\nu)}$	coff di Poisson, modulus elastico cubico
$W = \frac{\sigma^2}{2E}$	lavoro sollecitazione per unità di volume $[\frac{J}{m^3}]$
$f_m + f_f = 1$	pezioni volumiche compositi
$f_m = \frac{V_m}{V_m + V_f}$	pezione volumica matrice
$f_f = \frac{V_f}{V_m + V_f}$	pezione volumica fibre
$E_{max} = f_f E_f + f_m E_m$	modul elastico max in un composito
$E_{min} = \frac{1}{\frac{f_f}{E_f} + \frac{f_m}{E_m}}$	modul elastico min in un composito
$\rho_{SPECIFICA} = \frac{\text{VALORE ASSIUNTO PROPRITÀ}}{\text{DENSITA'}}$	

<b>CAPITOLO 8</b>	
$\sigma_{max} = \sigma_{nom} \left[ 1 + \alpha \sqrt{\frac{C}{\rho}} \right]$	sollecitazione massima $\alpha = 2 \times$ trazione; $\alpha = \frac{1}{2} \times$ compressione
$K_{SC} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = 1 + \alpha \sqrt{\frac{C}{\rho}}$	fattore di concentrazione di sollecitazione
$\sigma_{bcI} = \sigma \left[ 1 + \gamma \sqrt{\frac{\pi C}{2\pi r}} \right]$	sollecitazione locale di modo I
$K_I = \sigma \gamma \sqrt{\pi C}$	fattore di intensità di modo I
$K_{IC} = \sigma^* \gamma \sqrt{\pi C}$	fattore critico di intensità di sollecitazione di modo I
$G_c = 2\gamma$	teoria di Griffith
$G_c = 2\gamma + \gamma_p$	teoria di Orowan - Irwin
$G_c = \frac{K_{IC}^2}{2E}$	tangente e fattore critico di sollecitazione di modo I
<b>CAPITOLO 9</b>	
$\Delta \sigma N_p^b = C_1$	legge di Basquin $0,07 \leq b \leq 0,15$
$\Delta \varepsilon_p N_p^c = C_2$	legge di Coffin $C \approx 0,5 \div 0,6$
$\frac{d\varepsilon}{dN} = \Delta K^m$	legge di Paris: velocità da
<b>CAPITOLI 12 e 13</b>	
$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot \frac{1}{\Delta T}$	coeff. di dilatazione termica

29/09/2014




**Cap. 1 - Introduzione ai materiali**  
**Cap. 2 – Classificazione dei materiali**  
**Cap. 3 – Approccio al binomio materiale ← → progetto**

Prof. M. Lombardi - PTM - Capitolo 1.2.3


29/09/2014

**Come definiamo un materiale ?**



Prof. M. Lombardi - PTM - Capitolo 1.2.3

1



**Cosa è la Scienza e la Tecnologia dei Materiali?**  
**Disciplina ingegneristica di base**

Conoscere i materiali  
 → per operare scelte corrette  
 → per progettare (tailoring) nuovi materiali

Sono disponibili commercialmente più di 160000 materiali  
 Come operare la migliore selezione in un catalogo così vasto??????

Non è possibile conoscere tutti i materiali → linee-guida per la conoscenza e la scelta

Prof. M. Lombardi - PTM - Capitolo 1.2.3

**Come si definisce un materiale in Ingegneria?**  
 Materiale ←→ esigenza/funzione

Materiale: qualsiasi solido in grado di svolgere almeno una determinata funzione (meccanica, termica, ottica, magnetica, elettrica,...)

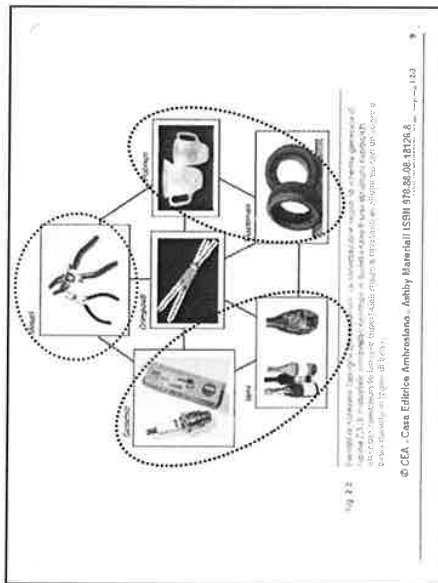
Vari materiali possono svolgere la stessa funzione: occorre saper operare la scelta migliore



Prof. M. Lombardi - PTM - Capitolo 1.2.3

2

29/09/2014



29/09/2014

### Processo produttivo

Le proprietà finali di un materiale dipendono dal suo percorso produttivo, dalle metodiche di formatura adottate.

A seconda del procedimento di fabbricazione usato, le proprietà del materiale possono variare, esercitando un'influenza diretta sul rendimento, sull'affidabilità, sulla durata del prodotto.

Un processo è un metodo per formare, giuntare o finire un componente.

- **Processi primari:** impartiscono una forma
- **Processi secondari:** modificano geometria e proprietà

Prof. M. Lombardi-STI-Capitolo 13.3

5

### Materiali e Processi

Gli ingegneri realizzano componenti usando materiali.

Per produrre un generico oggetto con un materiale è necessario accoppiargli un processo compatibile con il materiale che si desidera impiegare.

I requisiti di progetto definiscono le prestazioni richieste ai materiali, definite da valori soglia per certe proprietà che controllano il progetto.

Prof. M. Lombardi-STI-Capitolo 13.3

6

### Processo produttivo

Il diagramma illustra il processo produttivo in diverse fasi:

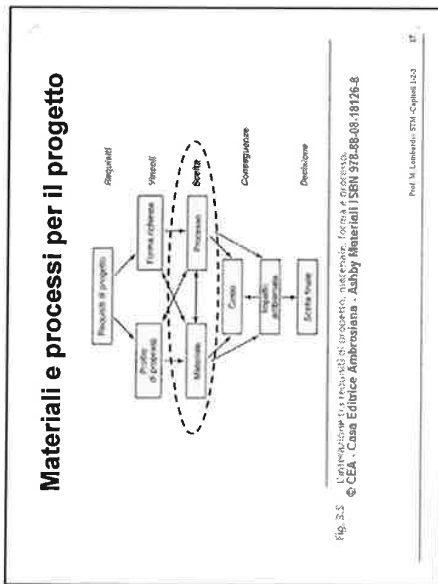
- Materiali scelti** (Materiali scelti)
- Formatura primaria** (Operazione di formatura, Per: Materiali, Processo, Metodo, Tecnica)
- Formatura secondaria** (Processi secondari: Foratura, Trattamento termico, Trattamento chimico, Trattamento meccanico)
- Qualità** (Controllo qualità, Analisi di causa, Distribuzione del processo)
- Trattamenti secondari** (Pulitura, Passivazione, Anodiatura, Cromatura, Verniciatura, Stampaggio)
- Prodotto finito**

Fig. 2.3 - Il ciclo del processo produttivo. La prima formatura (secondaria) produce il componente, che viene poi lavorato (secondaria) e infine assemblato (secondaria) nel prodotto finito.

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Raveralli ISBN 978-88-08-19126-8

Prof. M. Lombardi-STI-Capitolo 13.3

29/09/2014



### Esempio di riprogettazione

**Funzione**

- Contenere e proteggere un CD
- Trasparente
- Formabile per iniezione
- Riciclabile
- Più tenace del polistirene
- Di forma identica
- Spesso in PS
- Minimizzare il costo

**Vincoli**

- vincoli di funzione
- vincoli geometrici

**Obiettivo**

- Minimizzare il costo
- Scelta del materiale


Variabile libera

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materials ISBN 978-88-08-18126-8

Prof. M. Lombardi - STP - Capitolo 3-3

9

30/09/2014




### Ceramics: Materiali inorganici non metallici

Materiali formati dalla combinazione – in rapporti stechiometricamente definiti – di elementi metallici e non metallici, caratterizzati dalla presenza di legami **ionici e/o covalenti**.  
Possono essere costituiti da **strutture ordinate** di atomi (cristalli) oppure da **strutture caotiche** (vetri).

- Ceramiche tradizionali, soprattutto derivati dell'argilla (porcellane, gres, maioliche....),
- Cementi, calci,...
- Vetri (a base silice: vetri da bottiglie, da finestra, cristalli, vetri Pyrex®...)
- Ceramiche ingegneristiche (o avanzate o di alta tecnologia: ossidi, carburi, nitruri, boruri, ...).

Prof. M. Lombardi - STN, Capofila 1,2,3

30/09/2014




### Metalli: materiali inorganici metallici

- Opachi (cioè non trasparenti alla luce visibile), ma lucenti
- Ottimi conduttori di elettricità e calore
- Elevate resistenze meccaniche, pur essendo duttili, cioè deformabili plasticamente (cioè in modo irreversibile, permanentemente, prima di rompersi: sono duttili).
- Temperature di fusione assai variabili (Al= 660°C; Ti = 1660°C; W = 3420°C)
- Medio-alte densità (**Mg = 1,75 g/cm<sup>3</sup>; Al = 2,7 g/cm<sup>3</sup>; Ti = 4,5 g/cm<sup>3</sup> (metalli e leghe LEGGERE); Fe = 7,8 g/cm<sup>3</sup>; Cu = 8,9 g/cm<sup>3</sup>; W = 19,3 g/cm<sup>3</sup>**)
- Si corrodono facilmente (corrosione del Fe: formazione di ruggine)
- Formatura prevalentemente da fuso

Prof. M. Lombardi - STN, Capofila 1,2,3

4



### Ceramics: Materiali inorganici non metallici

Tipologia di ceramico	Esempi
Ossidico silicatico	Refrattari silicei, silico-alluminosi, multiliftici (mullite: $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ); costituenti del cemento Portland (silicati di calcio); <b>silice</b> $SiO_2$ e vetri silicatici
Ossidico non silicatico	<b>Allumina</b> $Al_2O_3$ , <b>Magnesia</b> $MgO$ , <b>Spinello</b> $MgO \cdot Al_2O_3$ , <b>Zirconia</b> $ZrO_2$ , <b>Titanato di bario</b> $BaTiO_3$ , <b>Biossido di uranio</b> $UO_2$ , <b>Toria</b> $ThO_2$ , <b>Ferrite di nichel</b> $NiFe_2O_4$
Non ossidico	<b>Carburo di silicio</b> SiC, <b>Nitruro di silicio</b> $Si_3N_4$ , <b>Carburo di titanio</b> TiC, <b>Carburo di tungsteno</b> WC, <b>Nitruro di boro</b> BN, <b>Carburo di boro</b> $B_4C$ , <b>Diamante</b> e <b>Grafito</b> C

Fonte: M. Lombardi - STN, Capofila 1,2,3

3



### Metalli: materiali inorganici metallici



30/09/2014

### Riciclo a fine vita

ACC (o FE) = acciaio;  
 AL (o ALU) = alluminio;  
 PE = polietilene;  
 PET (PETE) = polietilene tereftalato;  
 PP = polipropilene;  
 PVC (o V) = polivinilcloruro;  
 ABS = acrilonitrile butadiene stirene

PS = polistirene;  
 VE = vetro;

Prof. M. Lombardi-STN-Capanni 3-2-3

30/09/2014

### Le classi di Polimeri

TP  
 Elast.

Fig. 1.16 - Le classi dei polimeri in base alla loro struttura molecolare. TP: polimeri termoplastici; Elast.: polimeri elastomerici.

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Anby Materiali ISBN 3 78 08 18 26 8  
 Prof. M. Lombardi-STN-Capanni 3-2-3

8

### Compositi

Composito naturale: legno, nel quale la matrice di lignina è rinforzata dalle fibre cellulosiche

Combinazioni di due o più materiali diversi, finalizzate all'accoppiamento delle migliori caratteristiche di ciascuno di essi (effetto sinergico)

→ Matrice  
 → Rinforzo

Prof. M. Lombardi-STN-Capanni 3-2-3

7

### Materie plastiche - Polimeri

- Bassa densità
- Facilmente formabili
- Bassa resistenza meccanica
- Bassa temperatura di decomposizione oppure di fusione (o, meglio, di rammollimento)
- Alta reattività chimica
- Riciclabilità a fine vita (TP)



**RESISTENZA A ROTTURA:** sollecitazione massima necessaria alla rottura del materiale

**LIMITE ELASTICO:** capacità di opporsi alla deformazione plastica

**TENACITÀ  $G$ :** energia per unità di volume per portare a rottura il materiale

$G_c$  = energia per unità di volume per creare nuove superfici da frattura

**RESILIENZA:** energia per unità di superficie assorbita per allungare una superficie di lunghezza unitaria  $\rightarrow$  capacità di un materiale di resistere a sollecitazioni impulsive

**INCRUDIMENTO** = distorsione dei cristalli data da accumulo di dislocazioni indotta dalla deformazione plastica

**RIGIDEZZA** = resistenza del materiale al cambiamento di forma sotto sollecitazione

$E \rightarrow$  RIGIDEZZA

$\epsilon_R, \delta_R \rightarrow$  DUTTILITÀ

Area J-E  $\rightarrow$  TENACITÀ

$\sigma_{el}, \sigma_y, \sigma_{0,2}, \sigma_R \rightarrow$  RESISTENZA

LEGAME

E

covalente

200 ÷ 600

metallico

60 ÷ 500

ionico

32 ÷ 50

H

2 ÷ 12

Von

1 ÷ 4

30/09/2014

### Curva di Condon-Morse

A distanza infinita l'interazione è nulla. Al diminuire della distanza a tra gli atomi iniziano a manifestarsi forze attrattive o repulsive.

Avvicinandosi gli atomi si attraggono e l'energia diminuisce mentre a diminuisce. A partire da una certa distanza, avvicinandosi gli atomi si respingono e l'energia cresce mentre a diminuisce.

PROF. M. Lombardi - STM - Cap. 4 - Para. A

*ND punto a = 0 (dist. di legame) e l'Attrazione tende a -∞*

*L'energia di repulsione, come la forza, si manifesta solo da un certo punto in poi, cioè solo quando i 2 atomi hanno raggiunto una posizione critica di vicinanza*

30/09/2014

### Curva di Condon-Morse

A distanza infinita l'interazione è nulla. Al diminuire della distanza a tra gli atomi iniziano a manifestarsi forze attrattive o repulsive.

PROF. M. Lombardi - STM - Cap. 4 - Para. A

### Curva di Condon-Morse

A distanza infinita l'interazione è nulla. Al diminuire della distanza a tra gli atomi iniziano a manifestarsi forze attrattive o repulsive. Avvicinandosi gli atomi si attraggono e l'energia diminuisce mentre a diminuisce.

$E_0$  e la forma della curva di Condon - Morse dipendono dal materiale.

partendo da grandi distanze a, gli atomi si attraggono fino ad una certa distanza  $a_0$ , alla quale l'energia è minima  $E_{min} = E_0$  (situazione di MASSIMA STABILITÀ).

PROF. M. Lombardi - STM - Cap. 4 - Para. A

### Curva di Condon-Morse

A distanza infinita l'interazione è nulla. Al diminuire della distanza a tra gli atomi iniziano a manifestarsi forze attrattive o repulsive. Avvicinandosi gli atomi si attraggono e l'energia diminuisce mentre a diminuisce.

PROF. M. Lombardi - STM - Cap. 4 - Para. A

30/09/2014

**Legame secondario → POLIMERI**

**Energeticamente debole**


- **Bassa-bassissima Rigidezza**
- **Bassa-bassissima Resistenza a rottura**
- **Bassa-bassissima Temperatura "di fusione"**
- **Elevata Dilatazione termica**

**Elettroni NON liberi e meccanismi di trasporto termico/elettrico meno efficienti che nelle ceramiche**

- **I MIGLIORI ISOLANTI termici**
- **I MIGLIORI ISOLANTI elettrici**

Molte proprietà diverse tra TP, TI e Elastomeri.....

Proprietà anche dipendenti da T



**Caratteristiche del legame chimico influenzano:**

- Temperatura di fusione
- Conduttività termica ed elettrica
- Dilatazione termica
- Rigidezza
- Resistenza a rottura
- Duttilità o fragilità

.....

PROF. M. Lombardo - STM - Cap. 4 - Parte A

30/09/2014

**Legame covalente → CERAMICI**

**Energeticamente molto forte**

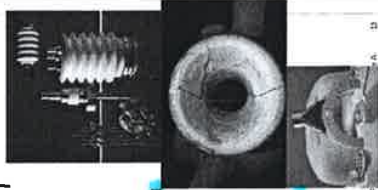
- **Alta Rigidezza**
- **Alta Resistenza a rottura**
- **Alta Temperatura di fusione**
- **Bassissima Dilatazione termica**

**Direzionale**

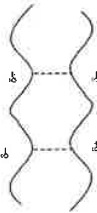
- **Fragilità**

**Elettroni NON liberi**

- **Pessimo conduttore termico (buon isolante)**
- **Pessimo conduttore elettrico (buon isolante)**



**Legame secondario (POLIMERI)**




Elettroni non liberi

Energeticamente debole/molto debole

PROF. M. Lombardo - STM - Cap. 4 - Parte A

30/09/2014

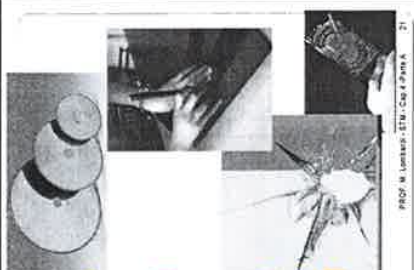


**La resistenza meccanica**, che i materiali oppongono in ogni momento quando sono sottoposti ad "azioni esterne" fino all'istante prima di rompersi, **dipende dall'energia** che tiene uniti atomi (ioni, molecole,...) nei materiali → **Energia di legame**

**La capacità di reagire agli stress esterni deformandosi elasticamente di più o di meno dipende dall'Energia e dal tipo di legame**  
→ Rigidezza (modulo elastico o di Young, E)

PROF. M. Lombardi - STM - Csg 4 - Pavia A 21

30/09/2014

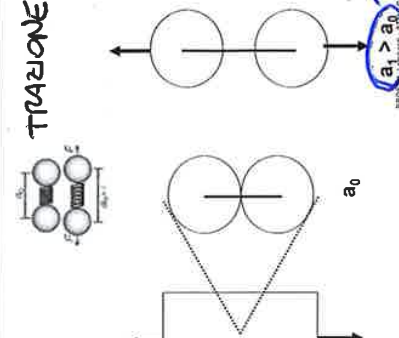


**Il diamante** subisce deformazioni solo elastiche (è **brittle**, fragile) ma non è certo poco resistente (non è **fragile**)

**Il vetro da finestra** è sia **brittle** che **fragile**, perché subisce deformazioni solo elastiche (è **brittle**, fragile) ma è anche poco resistente (è **fragile**)

PROF. M. Lombardi - STM - Csg 4 - Pavia A 21

12



**TRAZIONE**

$a_1 > a_0$

**PROF. M. Lombardi - STM - Csg 4 - Pavia A 21**

*a<sub>1</sub> = distanza di legame di eq. app l'applicazione della forza*  
*a<sub>0</sub> = distanza di legame iniziale (prima dell'applicazione della forza)*  
*↳ distanza di minima energia*

*a<sub>1</sub> > a<sub>0</sub> a causa della trazione*

11

**Valori di resistenza a rottura di alcuni materiali**

**LEGHE METALLICHE**

Acciaio 4340	1760 MPa (trazione)
Temprato e rinvenuto	
Legh Al 7075	572 MPa (trazione)
T6 - tratt. a caldo, invecchiata e rinv.	
Legh Ti-6-4	1172 MPa (trazione)
Solubilizzata a caldo e invecchiata	

**CERAMICI**

Allumina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1800-2000 MPa (compressione)
Zirconia ZrO <sub>2</sub>	1500 MPa (compressione)
SiC	2000 MPa (compressione)

**PROF. M. Lombardi - STM - Csg 4 - Pavia A 21**

30/09/2014

Peso dell'uomo: 90 kg      Peso della donna: 60 kg  
 Dimensioni singola impronta: 120 cm<sup>2</sup>      Dimensioni singola impronta: 40 cm<sup>2</sup>

90 kg / 120 cm<sup>2</sup> = 0,75 kg/cm<sup>2</sup>      60 kg / 40 cm<sup>2</sup> = 1,5 kg/cm<sup>2</sup>

PROF. M. Lombardi - STM - Cds. 4 - Par. A      31

*esempio che fa capire come anche una forza relativamente piccola rispetto ad un'altra può creare una pressione maggiore se l'area di azione è ristretta*

30/09/2014

**Dal livello atomico al comportamento macroscopico**

(a) Un atomo      (b) Una colonna

Cosa osserviamo macroscopicamente?

PROF. M. Lombardi - STM - Cds. 4 - Par. A      29

**Azione esterna: Forza F a trazione uniaxiale**

Ogni superficie perpendicolare a F sopporta la forza F: esiste una **Superficie portante A**

**Reazione: Allungamento ΔL** lungo la direzione di trazione ΔL = L - L<sub>0</sub>

Definire il binomio F ↔ ΔL dà informazioni sullo specifico componente avente quelle dimensioni e quella superficie portante...

Svincolarsi dallo specifico per dare informazioni di valore assoluto per il materiale

PROF. M. Lombardi - STM - Cds. 4 - Par. A      30

15

**Sollecitazione e Deformazione**

Sollecitazione      Deformazione

Sollecitazione a trazione σ = F/A      Deformazione a trazione ε = ΔL / L<sub>0</sub>

Unità di misura MPa

σ → 1 MPa = 10<sup>6</sup> Pa = 10<sup>6</sup> N/m<sup>2</sup> = 1 N/mm<sup>2</sup>  
 1 Pa = 0,1019 · 10<sup>-6</sup> kg/mm<sup>2</sup>  
 1 MPa ≈ 10 kg/cm<sup>2</sup>      *1 kg P = 9,8 N*  
 1 GPa = 10<sup>9</sup> Pa

PROF. M. Lombardi - STM - Cds. 4 - Par. A      32

16

30/09/2014

Relazione livello atomico  $\leftrightarrow$  livello macroscopico

$E = S / a_0$

$S =$  rigidezza del legame;  $a_0 =$  distanza di equilibrio, distanza di legame

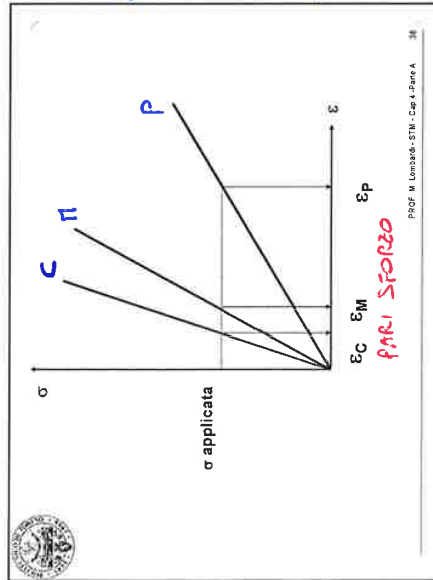
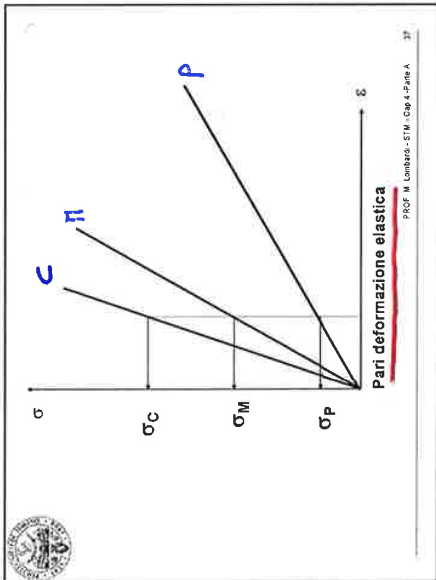
$E = \sigma / \epsilon$

$\rightarrow$  Diamante (C-C covalente puro):  $E = 1000$  GPa

PROF. M. Lombardi - STM - Cap. 4 - Parte A

*N.B. la pendenza della retta coincide con il modulo elastico che misura la RESISTENZA AL CAMBIO DI FORMA*

30/09/2014



**RAMMENTO ANALOGO PER GRAFICO SOTTO (PARI DEFORMAZIONE)**

*a parte di sforzo applicato a un materiale si ha una deformazione (ovvero spostamento) di un certo numero di atomi diverso a seconda che si abbia un materiale polimerico (P), metallico (M) o ceramico (C). Visto che i polimeri hanno legami più deboli, a parità di  $\sigma$ , si avrà una deformazione maggiore rispetto ai metalli e ancora di più ai ceramici (che hanno i legami più forti)*

19

20

Materiali	E (GPa)	Ceramici	E (GPa)	Mat. plastiche (a T <sub>amb</sub> )	E (GPa)
W	400	Diamante	1000	Melaniniche	0-7
Leghe Mo	320-365	WC	450-650	Polimidiche	3-5
Leghe Mg	45	SiC	450	PMMA	3-4
Leghe Ni	214-234	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	370-390	Polistirene	3-3.4
Leghe Co	200-248	BeO	380	Epossidiche	3
Acciai	190-200	TiC	379	Policarbonato	2.6
GHise	170-190	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	290	Poliestere	1-5
Leghe Cu	124-150	MgO	250	Polietilene	0.2-0.8
Leghe Al	69-79	ZrO <sub>2</sub>	160-240	Gomma	0.01-0.1
Leghe Ti	105-120	SiO <sub>2</sub>	72-94	PVC	0.003-0.01

PROF. M. Lombardi - STM - Cap. 4 - Parte A

30/09/2014

• un ragionamento simile a quello fatto a pag precedente può essere fatto con le Curve di Coulomb - Morse, mettendo al posto delle forze l'energia. Dopo la sollecitazione, gli atomi sono ad una distanza tale per cui la variazione di livello energetico uguaglia il lavoro che è stato compiuto dall'esterno. (vale sia in trazione che in compressione)

30/09/2014

$a$  = materiale - equid

Scomposizione in sollecitazioni semplici

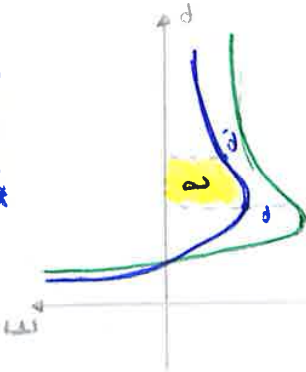
PROF. LOMBARDO - STM - Cap. 4 - Parte B 5

Trazione biassiale

Pressione interna P

(e) Un gasdolo

PROF. LOMBARDO - STM - Cap. 4 - Parte B 7



Trazione uniaxiale

Compressione uniaxiale

PROF. LOMBARDO - STM - Cap. 4 - Parte B 6

Pressione idrostatica P

PROF. LOMBARDO - STM - Cap. 4 - Parte B 8

NB sia per il lavoro che per le forze vale il principio di AZIONE E REAZIONE

• si modifica la distanza intermolecolare con una forza la nuova distanza è data dall'equilibrio tra forze applicate dall'esterno e forze intermolecolari

• se si considerava il buco (punto di vista energetico) allora ho un equilibrio tra il lavoro compiuto dalle forze esterne e l'energia interna di legame

30/09/2014

la pressione idrostatica provoca una variazione di volume nel corpo

**Le costanti elastiche**

**Pressione idrostatica P**

**Deformazione di volume ("dilatazione")**  $\Delta V = \Delta V/V_0$   $\rightarrow$  2.5% str. elastica

Volume  $V_0$

Deformazione di volume (dilatazione)  $\Delta V = V - V_0$

Pressione p

Modulo di elasticità cubica  $K$

$P = K \Delta$

$\beta = K/\Delta$

$K =$  Modulo di elasticità cubica

non lo più una deformazione in una sola dimensione, ma in tutte e 3  $\rightarrow$  deformazione volumica

NB in un oggetto in 3D, un allungamento in una direzione corrisponde una riduzione delle sezione trasversale e viceversa

Si assume comportamento isotropo

**Materiale isotropo:** valore della proprietà indipendente dalla direzione lungo la quale si misura

**Materiale anisotropo:** valore della proprietà dipendente dalla direzione lungo la quale si misura

Lungo le direzioni laterali (trasversali) x e y la deformazione è identica:

$\epsilon_x = \epsilon_y$   $\rightarrow$  **COMPARTAMENTO ISOTROPO**

La deformazione trasversale è negativa, se quella longitudinale è positiva  $\rightarrow$  trazione uniaxiale

La deformazione trasversale è positiva, se quella longitudinale è negativa  $\rightarrow$  compressione uniaxiale

PROF. LOMBARDO - STM - Cnr 4 - Parte B

per es i legni sono + resistenti lungo la verticale che l'ad esista

deformazione POSITIVA nelle direzioni di sollecitazione  $\rightarrow$  in accordo con la regola del verso in presso positivo se uscente dal corpo

30/09/2014

Un'altra importante costante elastica:

**il coefficiente di Poisson**

Deformazione trasversale  $v = -\frac{\Delta l}{l}$

Deformazione longitudinale  $v = \frac{\Delta L}{L}$

$v = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$

deformazioni che il materiale subisce quando viene sollecitato

$v = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$

donde  $\epsilon_x =$  deformazione trasversale (o laterale)  $\epsilon_y =$  deformazione assiale

$v = -\epsilon_x / \epsilon_y = -\epsilon_y / \epsilon_x$

Se  $v = 0,5$ :  $|\epsilon_x| = 1/2 |\epsilon|$  ma anche  $|\epsilon_y| = 1/2 |\epsilon|$  ma anche  $|\epsilon_x| + |\epsilon_y| = |\epsilon|$

Se  $v < 0,5$  Ad esempio  $v = 0,25$

$|\epsilon_x| = 1/4 |\epsilon|$  ma anche  $|\epsilon_y| = 1/4 |\epsilon|$   $\rightarrow |\epsilon_x| + |\epsilon_y| = 1/2 |\epsilon|$   $\rightarrow \Delta V > 0$

PROF. LOMBARDO - STM - Cnr 4 - Parte B

il materiale sottoposto a sollecitazione non subisce alcuna variazione di volume  $\Delta V = 0$

Se  $v \neq 0,5$  per una variazione di volume nel materiale



30/09/2014

un materiale elastico è in grado di immagazzinare energia elastica entro certi limiti

formo energia elastica a un materiale

$$F/A = \sigma ; \frac{dL}{L} = d\varepsilon ;$$

L = lunghezza iniziale  
A = area iniziale  
 $\sigma$  = sforzo  
 $\varepsilon$  = deformazione

**L'energia elastica**

Deformandosi elasticamente, il materiale immagazzina energia che rilascia quando la sollecitazione che lo ha deformato viene a cessare

Lavoro per unità di volume:  $dW = \frac{F dL}{AL} = \sigma d\varepsilon$

PROF. LOMBARDO - STM - CH 4 - PAV 8 21

30/09/2014

**Misura del modulo di Young**

Misure dinamiche

Misura della velocità di propagazione delle onde sonore nel materiale che dipende da:

$$\sqrt{E/\rho}$$

ove  $\rho$  è la densità

→ i valori del modulo di Young ottenuti tramite le curve sforzo-deformazione sono empirici

11

**L'energia elastica**

Lavoro per unità di volume:  $dW = \frac{F dL}{AL} = \sigma d\varepsilon$

$$W = \int_0^{\sigma^*} \sigma d\varepsilon$$

$$W = \int_0^{\sigma^*} \sigma (d\sigma/E)$$

$$W = \frac{(\sigma^*)^2}{2E}$$

PROF. LOMBARDO - STM - CH 4 - PAV 8 22

W = lavoro necessario per ottenere una certa deformazione elastica (area sotto la curva)

**CASO A)**  
Il materiale si rompe: comportamento elastico fino a rottura → materiali fragili

**CASO B)**  
Il materiale subisce, oltre alla deformazione elastica, anche deformazione irreversibile, plastica, prima di pervenire a rottura → materiali duttili

Ne parleremo tra breve.....

PROF. LOMBARDO - STM - CH 4 - PAV 8 24

$\sigma^*$  = deformazione limite (non può rispondere in modo elastico per ogni deformazione che si applica) → un certo punto oltre a deformazione plastica e/o a rottura (a seconda se il materiale è duttile o fragile)

• se la F che applico è elevata, vuol dire che sto fornendo un'energia elevata

12

30/09/2014

### 114 RETICOLI cristallini di Bravais

PROF. LOMBARDI - STM - Cap. 4 - Parte C

30/09/2014

### Le celle elementari (3 TIPI)

Fig. 4.11 - Celle elementari. Tutti gli atomi sono dello stesso tipo, ma sono a posizioni di griglia diverse per analizzare le relazioni simmetriche. La struttura cristallina compatta (CCP) (B1) e la struttura compatta a impacchettamento a sfaccette cubiche (BCC) (B2) sono le strutture cristalline più comuni. La struttura cristallina compatta a sfaccette cubiche (BCC) (B3) è la struttura cristallina più comune per gli atomi pesanti.

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materials ISBN 978-88-08-18125-3

PROF. LOMBARDI - STM - Cap. 4 - Parte C

### 17 sistemi cristallini

Sistema	Parametri reticolari	Geometria
Cubico	$a=b=c$	
Tetragonale	$a=b \neq c$	
Ortorombico	$a \neq b \neq c$	
Monoclinico	$a \neq b \neq c$	
Trigonal	$a=b=c$	
Esagonale	$a=b \neq c$	
Trigonal	$a=b \neq c$	

PROF. LOMBARDI - STM - Cap. 4 - Parte C

### Le strutture dei metalli (3 TIPI)

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materials ISBN 978-88-08-18125-3

PROF. LOMBARDI - STM - Cap. 4 - Parte C

**CUBICO**  $a=b=c$ ;  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$   
**TETRAEDRONALE**  $a=b \neq c$ ;  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$   
**ORTOROMBICO**  $a \neq b \neq c$ ;  $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$   
**ROMBOEDRICO**  $a=b=c$ ;  $\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$   
**ESAGONALE**  $a=b \neq c$ ;  $\alpha=\beta=90^\circ$ ;  $\gamma=120^\circ$   
**MONOCLINICO**  $a \neq b \neq c$ ;  $\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$   
**TRICLINICO**  $a \neq b \neq c$ ;  $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$

4

3

30/09/2014

**POLIMERI**

Costituiti da atomi di basso PA (C, H, ..., O, N, S, ...)

Le lunghe catene polimeriche difficilmente danno vita ad impaccamenti efficaci

Strutture per lo più amorphe o con limitate zone cristalline

Densità bassa - bassissima

PROF. LOMBARDO - STM - Cap. 4 - Parte C 15

30/09/2014

Densità

$\rho = \text{massa} / \text{volume} \text{ (g/cm}^3, \text{Mg/m}^3\text{)}$

Dipende da:

- peso atomico PA
- F.I.A.

METALLI:

- PA elevati
- F.I.A. elevati

*filare di impacch. - merito atomico*

Densità ELEVATE

PROF. LOMBARDO - STM - Cap. 4 - Parte C 13

Metalli e leghe	Densità (g/cm³)	Ceramici	Densità (g/cm³)
Mo e sue leghe	16,6-16,9	Zirconia	5,9
Pb e sue leghe	10,7-10,9	Allumina	3,9
Nichel	8,9	Magnesia	3,5
Rame	8,9	Mullite	3,2
Ferro	7,9	Quarzo	2,6
Acciai	7,8-8,1	Polimeri	Densità (g/cm³)
Zn e sue leghe	5,2-7,2	PVC	1,3-1,6
Ti e sue leghe	4,5-5,1	Poliesteri	1,1-1,5
Al e sue leghe	2,6-2,9	Resina epossidica	1,1-1,4
Compositi	Densità (g/cm³)	Nylon	1,1-1,2
Poliesteri con fibre di vetro	1,8	Poliistirene	1,0-1,1
Legno comune	0,4-0,8	Gomma naturale	0,83-0,91
		Polipropilene	0,88-0,91
		Polietilene	0,91-0,97

PROF. LOMBARDO - STM - Cap. 4 - Parte C 14

**CERAMICI**

Per garantire rispetto stechiometria dei composti Me-nonMe,

→ Impaccamento meno efficace

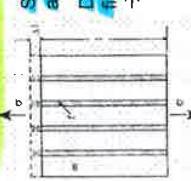
Ossidi, carburi, nitru, boruri → parte degli atomi (componente NON metallico) sono a basso PA

Densità mediamente inferiori a quelle dei metalli

PROF. LOMBARDO - STM - Cap. 4 - Parte C 14

30/09/2014

### LIMITE SUPERIORE DI E



Sollecitazione in direzione parallela alle fibre.

Deformazione subita da matrice e fibre in queste condizioni è identica → condizioni di isodeformazione

$$\sigma = f_f \sigma_f + f_m \sigma_m$$

$$\sigma = f_f E_f \varepsilon + (1-f_f) E_m \varepsilon$$

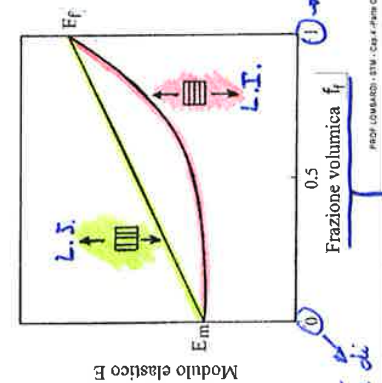
$$E_{\text{composito}} = \sigma / \varepsilon = f_f E_f + (1-f_f) E_m$$

PROF. LOMBARDO - STM - CDR 4 - Pagine C - 21

La geometria del rinforzo non ha influenza, come nel determinare la massima frazione di impaccamento del rinforzo e quindi il limite superiore di  $f$  (di solito 50%)  
 tanto matrice quanto materiali di rinforzo

30/09/2014

si noti come la presenza del materiale di rinforzo faccia aumentare il modulo elastico



Modulo elastico E

Frazione volumica  $f_f$

L.I.

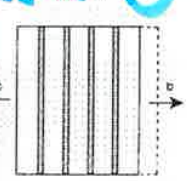
sb matrice di sempre fibre di rinforzo

sb fibre (materiale di rinforzo) e matrice

mi indica la % di fibre (o altro materiale di rinforzo) nella matrice

PROF. LOMBARDO - STM - CDR 4 - Pagine C - 22

### LIMITE INFERIORE DI E



Sollecitazione in direzione perpendicolare alle fibre.

Sollecitazione subita da matrice e fibre in queste condizioni è identica → condizioni di isosollecitazione

$$\varepsilon_{\text{composito}} = f_f \varepsilon_f + (1-f_f) \varepsilon_m$$

$$\varepsilon_{\text{composito}} = \frac{f_f \sigma}{E_f} + \frac{(1-f_f) \sigma}{E_m}$$

$$E_{\text{composito}} = \frac{\sigma}{\varepsilon_{\text{composito}}} = \frac{1}{\frac{f_f}{E_f} + \frac{1-f_f}{E_m}}$$

PROF. LOMBARDO - STM - CDR 4 - Pagine C - 23

### Il progetto in leggerezza: le proprietà specifiche

Proprietà specifica = Valore assoluto della proprietà

Densità	
UGUALE VOLUME	UGUALE RIGIDITA' RESISTENZA
Chiusa	Chiusa
Magnesio	Magnesio
Alluminio	Alluminio
Chiusa	Chiusa
Magnesio	Magnesio
Alluminio	Alluminio

Ripartire di peso

PROF. LOMBARDO - STM - CDR 4 - Pagine C - 24

20/10/2014

20/10/2014

I diagrammi di stato



Prof. Lombardi - STV

**SOLO QUANDO HO INTERSEZIONI CON LA LINEA DELL'EUTETTICO HO STRUTTURA LATERALE**

**LE LINEE SI INCROCIANO**

**Introduzione ai diagrammi di stato**

**Regola delle fasi (o di Gibbs)**


Il numero di variabili indipendenti necessarie per caratterizzare il sistema all'equilibrio si chiama grado di libertà o grado di variabilità o varianza

**Varianza V = numero componenti chimici indipendenti n**

**1 numero delle fasi compresenti all'equilibrio  $\phi$**

**4 fattori fisici attivi F (Temperatura e Pressione)**

**$V = n - \phi + F$**

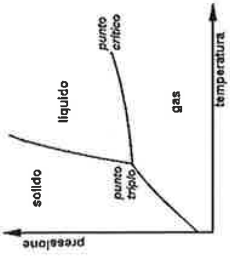


Prof. Lombardi - STV


**Diagramma di stato di una sostanza pura**

**Il diagramma di stato di una sostanza pura mostra le regioni di T e P in cui le fasi sono stabili**

Fase: uniformità di composizione chimica e di stato fisico



In una sostanza pura al variare di T e P, si verifica un cambiamento di fase. Si dispone quindi di due gradi di libertà



Prof. Lombardi - STV

**Diagramma di stato di una sostanza pura**

Per una sostanza pura si può variare a piacere T e P

**$V = n - \phi + F$**

un sola fase  $\Rightarrow V = 1 - 1 + 2 = 2$

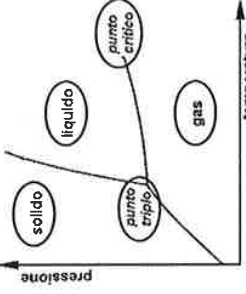

Variazione di P e T senza alterare il numero di fasi presenti

due fasi  $\Rightarrow V = 1 - 2 + 2 = 1$

Variazione di un parametro senza alterare il numero di fasi presenti (muovendosi sulla linea di equilibrio)

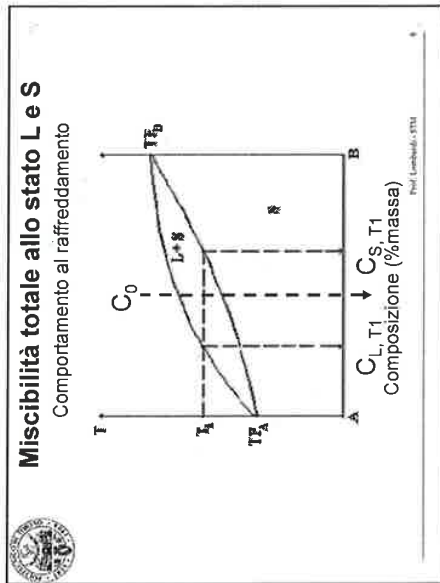
tre fasi  $\Rightarrow V = 1 - 3 + 2 = 0$

Variazione di un parametro  $\rightarrow$  alterazione del numero delle fasi

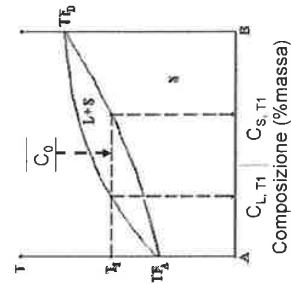
Prof. Lombardi - STV

20/10/2014



Miscibilità totale allo stato L e S

Comportamento al raffreddamento



Il primo solido che si forma ha composizione  $C_s$ , con un contenuto di B maggiore che nel liquido di partenza

tendiamo in cui indichiamo lo stato della materia

◻ = solido

indica formazione di solido

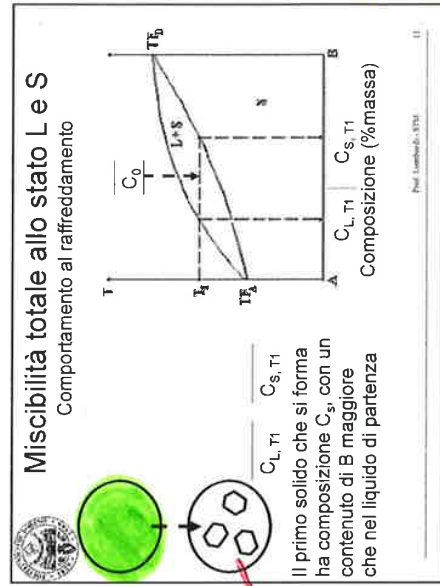
per avere la composizione della soluzione (% di A e % di B)

e una data T, traccio una retta orizzontale, vedo dove incontra il diagramma (2 punti) e tiro 2 rette verticali DEVO ANCHE INDICARE minimum LO STATO SOLIDO LIQUIDO (a seconda che si è ancora in fase di solidus o quella di liquidus)

se poi è diverso fare per una seconda T o per altre, al posto di tirare la linee, basta seguire le due curve di solidus e liquidus da P a P'

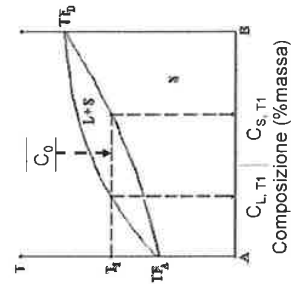
soluzione A+B allo stato solido

20/10/2014



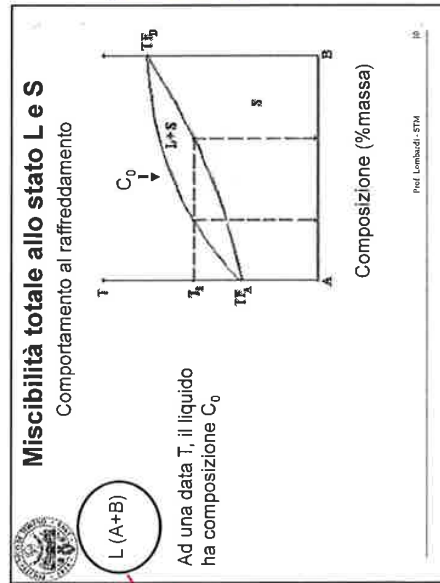
Miscibilità totale allo stato L e S

Comportamento al raffreddamento



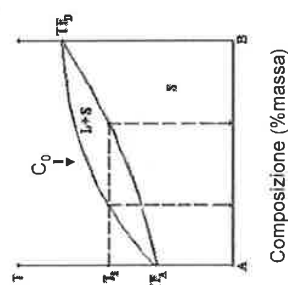
Il primo solido che si forma ha composizione  $C_s$ , con un contenuto di B maggiore che nel liquido di partenza

$C_L$  = composizione liquido  
 $C_S$  = composizione solido



Miscibilità totale allo stato L e S

Comportamento al raffreddamento



Ad una data T, il liquido ha composizione  $C_0$

soluzione A+B allo stato liquido

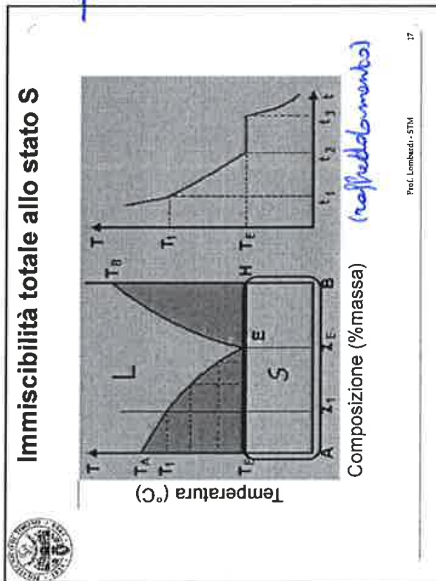


se poi è diverso fare per una seconda T o per altre, al posto di tirare la linee, basta seguire le due curve di solidus e liquidus da P a P'

La composizione del solido si arricchisce di A rispetto al solido di partenza

soluzione A+B allo stato solido

20/10/2014



Immiscibilità totale allo stato S

A e B sono completamente miscelabili allo stato liquido, ma del tutto separati in quello solido

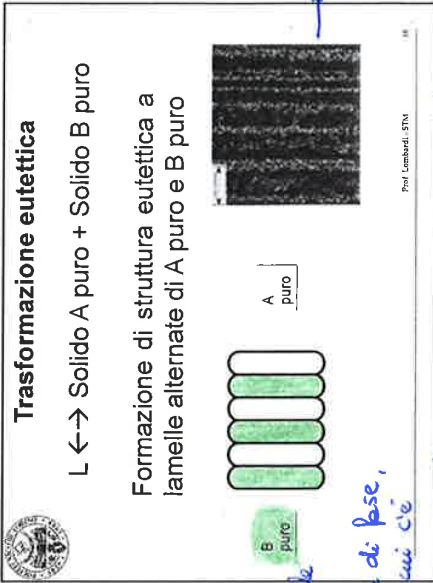
E = punto eutettico

EUTETTICO (lett = facile da fondere) è una miscela di sostanze il cui punto di fusione è più basso delle singole sostanze che la compongono (da qui il nome). Nel diagramma di fase, esso corrisponde a un punto in cui c'è un equilibrio invariante (cioè a varianza nulla, ovvero non si possono modificare le variabili del sistema senza che si alteri l'equilibrio, ovvero che compaiono una o più fasi).

Prof. Lombardi - STN

Prof. Lombardi - STN

20/10/2014



Trasformazione eutettica

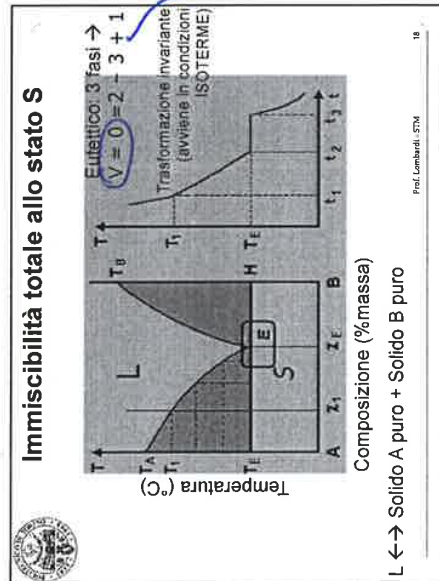
L  $\leftrightarrow$  Solido A puro + Solido B puro  
Formazione di struttura eutettica a lamelle alternate di A puro e B puro

immaginare il microscopio di una struttura a lamelle

io capisco che allo stato liquido le due sostanze sono completamente miscelabili perché lo sono sotto fase liquida e non due come per quella solida

Prof. Lombardi - STN

20/10/2014



Immiscibilità totale allo stato S

nel punto eutettico, quindi sono contemporaneamente presenti le 2 fasi solide delle sostanze pure + la fase liquido della miscela

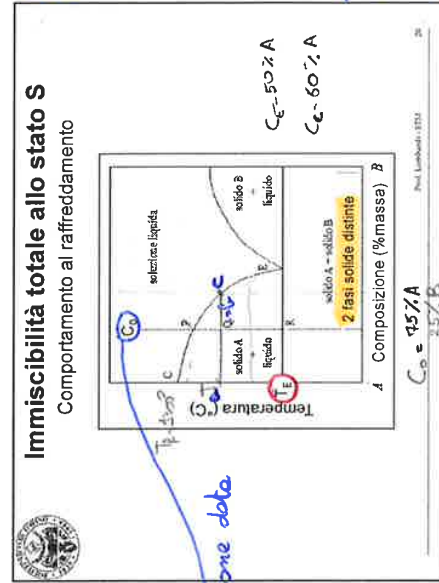
ci sono 3 fasi: 1 liquido e 2 solidi, quindi la varianza è nulla (esempio di composizione data dal problema)

io capisco che allo stato liquido le due sostanze sono completamente miscelabili perché lo sono sotto fase liquida e non due come per quella solida

Prof. Lombardi - STN

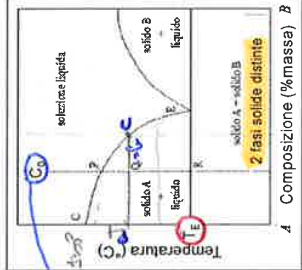
Prof. Lombardi - STN

20/10/2014



Immiscibilità totale allo stato S

Comportamento al raffreddamento



Composizione (%massa) B

$$m_s = \frac{b-c}{a-c} = \frac{0,45}{0,44} = 39,5\%$$

$$m_l = \frac{a-b}{a-c} = \frac{92,5}{0,44} = 62,5\%$$

C<sub>E</sub> = 100% A  
C<sub>L</sub>  $\rightarrow$  C<sub>E</sub> il liquido si arricchisce in B

orizzontale retta che è in corrispondenza della temperatura di eutettico

9

10

20/10/2014

linee di solubilità  
linee di liquidus  
regioni iperistiche

**Miscibilità parziale allo stato S**

Quando la soluzione inizialmente liquida (L) si raffredda, si ha che inizia a formarsi la fase solida alpha e con il proseguire del raffreddamento si forma sempre più fase solida beta. NB la composizione delle fasi solide e liquide, al proseguire del raffreddamento, sono diverse perché evolvono secondo le curve limite delle liquidus e di solidus. La solidificazione è completa quando la retta verticale attraversa la linea di solidus e si ha solo alpha.

linee di solubilità

(A, B = sostanze (alpha, beta = soluzioni solide))

LINEA (CURVA DI SOLUBILITÀ) mi rappresentano la massima % di atomi di una sostanza miscibile nell'altra.

linea alpha-x: % massima di B miscibile in A  
linea alpha-delta-x: % massima di A miscibile in B

**Trasformazione eutettica**

$L \leftrightarrow \text{Sol. solida } \alpha + \text{Soluz. Solida } \beta$

Formazione di struttura eutettica a lamelle alternate di alpha e beta

NUOVE INTERSEZIONI: CURVA E COSTITUZIONE SI HA UNA VARIAZIONE DELLA MICROSTRUTTURA (E COMPOSIZIONI), INVECE, UN TEMPO INALTERATO

20/10/2014

**Miscibilità parziale allo stato S**

Eutettico: 3 fasi  $\rightarrow V = 0 = 2 - 3 + 1$

Trasformazione invariante (avviene in condizioni ISOTERME)

$L \leftrightarrow \text{Sol. solida } \alpha + \text{Soluz. Solida } \beta$

NB nella regione iperistica alpha+beta in cui le due sostanze sono allo stato solido io non posso scrivere A+B perché non ho gli elementi puri A e B, ma delle loro miscele:

delta = miscela in cui A è il solvente e B è il soluto -> delta è formato dal solido cristallino di atomi di A in cui ci sono atomi di B

beta = miscela in cui B è il solvente e A è il soluto -> beta è formato dal solido cristallino di atomi di B in cui ci sono atomi di A

**Miscibilità parziale allo stato S**

Temperatura (C)

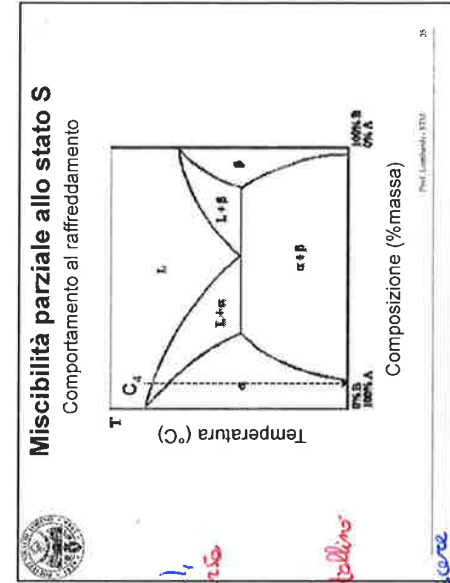
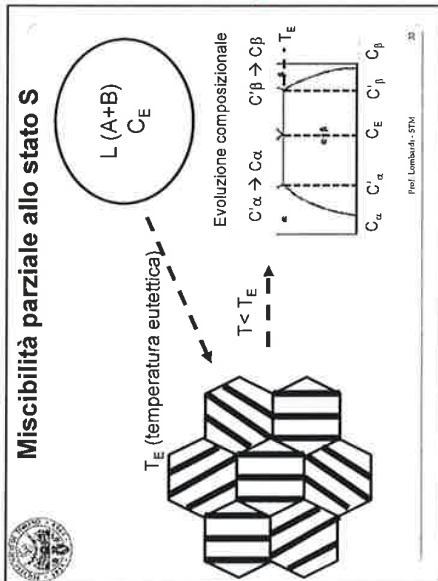
Composizione (%massa)

13

14

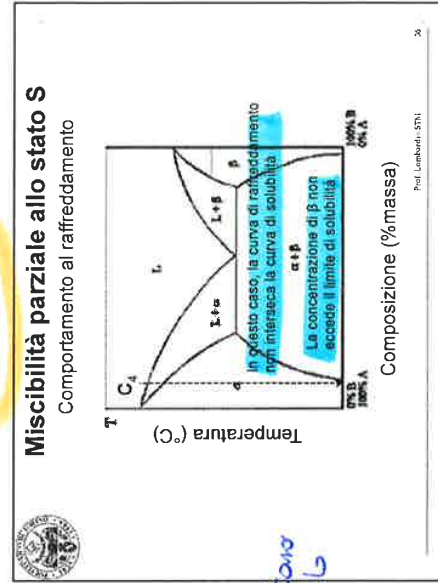
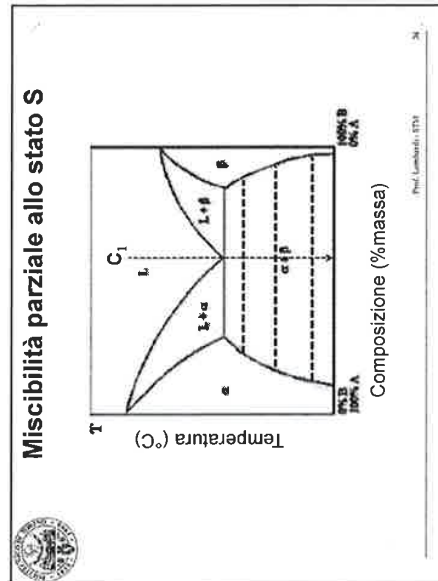


20/10/2014



$T_E$   $T_E$  (entro nella regione bifasica in cui  $\alpha + \beta$ ) il sistema  $C_{10} B_{10} A_{10}$  (la composizione totale  $C_1 = C_E$  euterica) la stessa così come si ha sempre una struttura lamellare globulare, ma la solubilità di A in B e viceversa cambia  
 ↓  
 più T diminuisce, più è difficile che atomi di B entrino nel reticolo cristallino di A e viceversa  
 ↓  
 applico la regola delle leve per conoscere le concentrazioni in quanto sono in una regione bifasica

**CASO 2**



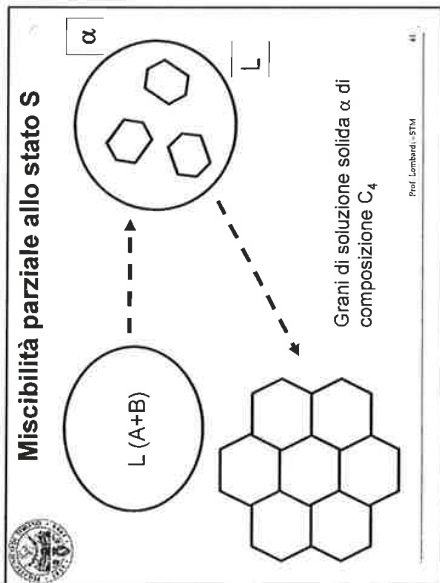
↓ T :  $\alpha$  si arricchisce in A  
 $\beta$  si arricchisce in B  
 b vede dalle linee di solvus che si allargano sempre di più  
 → le linee tratteggiate mi rappresentano esempi di T alle quali, applicando la regola delle leve, vedrei come le simple composizioni di  $\alpha$  e  $\beta$  variano, ma  $C_1 = \text{cost}$

20/10/2014

17

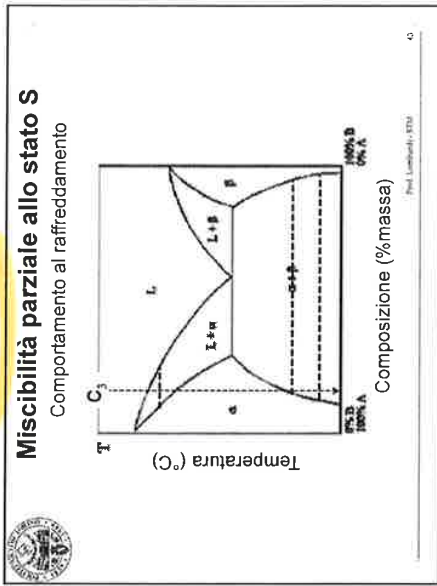
18

20/10/2014

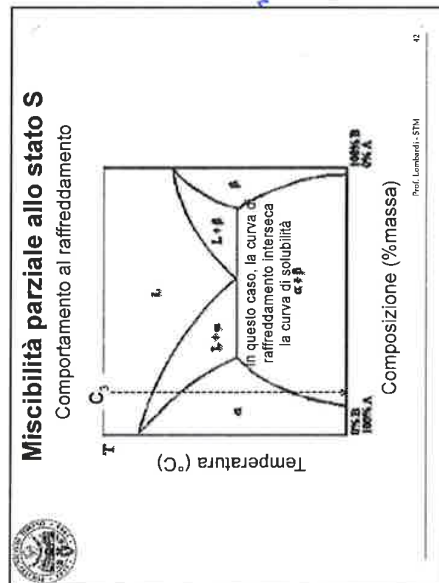


20/10/2014

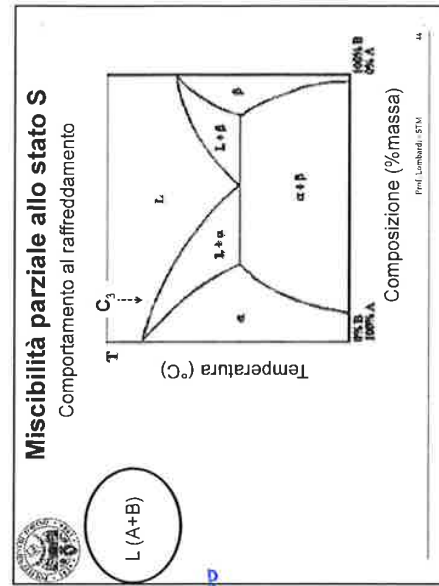
**CASO 3**



20/10/2014



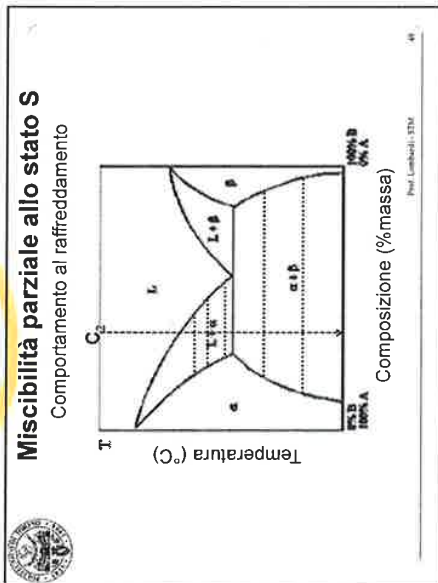
21



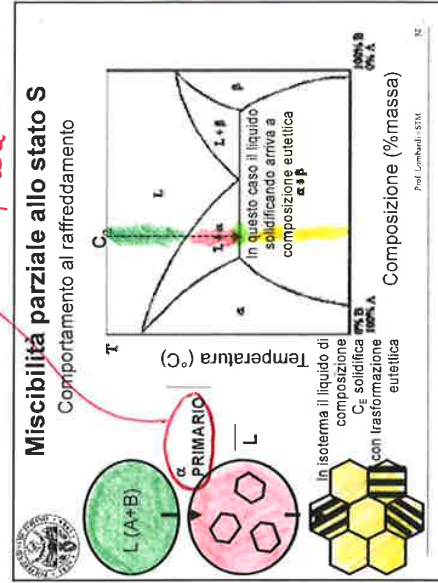
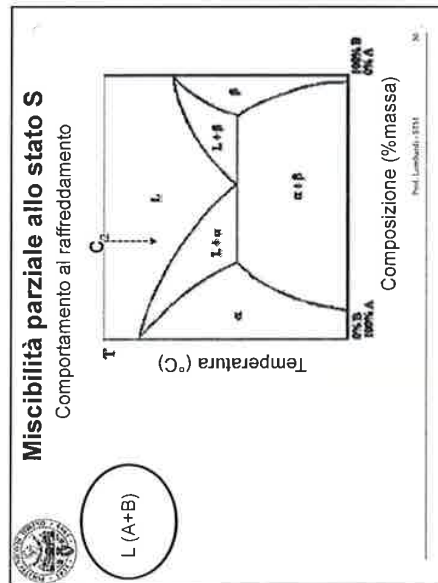
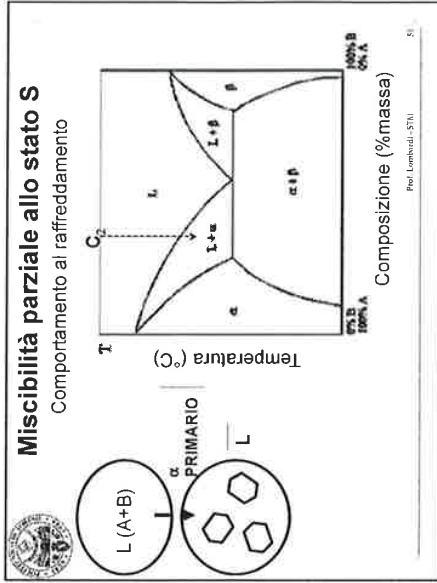
22

20/10/2014

**CASO 4**



20/10/2014



*promoli di 2 primario e T superiore*

*grande x raggiunge  
L TE se ha un sistema  
bifase: L+alpha+beta  
quando tutto il L si è  
solidificato T può tornare  
e diminuire e si antea  
nella regione bifasica*

*qui ho in parte una struttura  
laminare perche a T = Te ho  
onde liquidi  
Lo perché ho L+alpha, non solo L*

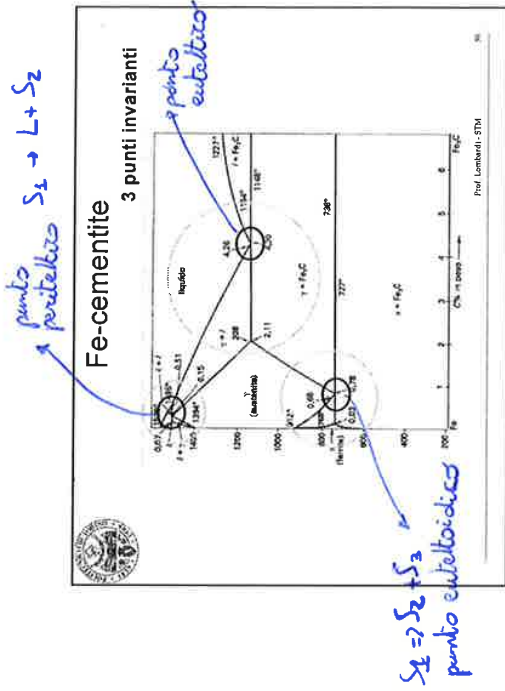
25

26

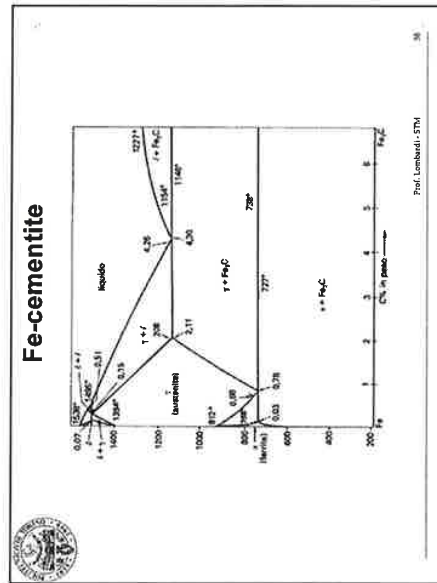
20/10/2014



20/10/2014



29



30

20/10/2014

zone del cristallo in cui viene meno l'ordine proprio del reticolo cristallino

**CATEGORIE DI DIFETTI CRISTALLINI**

Sono difetti sia **METALLI** che **MATERIALI TERMOPASTICI** ... ma per motivazioni diverse. Iniziamo a comprendere la duttilità nei materiali cristallini (METALLI)

CRISTALLI IDEALI  $\leftrightarrow$  CRISTALLI REALI

adimensionali, puntuali  $\rightarrow$  **VACANZE**

**LACUNE/INTERSTIZIALI**

monodimensionali, di linea  $\rightarrow$  **DISLOCAZIONI**

bidimensionali o di superficie  $\rightarrow$  (riguardano le superfici)

**BORDI DI GRANO**

tridimensionali o di volume  $\rightarrow$  (riguardano l'intero volume)

**INCLUSIONI, zone AMORFE, PORI**

**TIPICI DI DIFETTI:**

**INTERSTIZI** = atomi della termodinamica dello stato solido (presenti in tutti i cristalli)

**ESTRINSECI** = specifici di un dato composto cristallino

**BORDO DI GRANO** = superficie di contatto di un grano (= singolo cristallo). Si formano nei **MATERIALI PURI** quando tutti gli atomi sono uguali e nelle **LEGHE**. Fanno diminuire l'attività termica ed elettrica

provocano **picco di legge** inferiori quindi il materiale ha una resistenza minore agli urti

**DISLOCAZIONE** = scivolamento di una sezione rispetto a quella rimanente, può essere a vite o a spirale o a TASTA

**CRISTALLO AUTOINTERSTIZIALE**: gli interstizi sono occupati dagli stessi atomi che generano il reticolo cristallino.

**NB** gli atomi interstiziali inclusions lo spostamento (allentamento) degli atomi vicini  $\rightarrow$  il reticolo è sottoposto a **COMPRESSIONE**

**NB** **VACANZE**  $\rightarrow$  **TRAZIONE**  
**ATOMI INTERSTIZIALI**  $\rightarrow$  **COMPRESSIONE**

Prof. Lamberto STU - Cap. 8 - Pina A

20/10/2014

pressione una deformazione del reticolo cristallino  $\rightarrow$  **TRAZIONE** nell'intorno del difetto puntuali  $\rightarrow$  assenza nel reticolo di uno o più atomi che può essere data un copione raffreddamento e/o da deformazioni plastiche

**Difetti puntuali (VACANZE)**

difetti di Frenkel (A) e Schottky (B)

**SCHOTTKY**: si tratta di **CATIONI** che **ANIONE** sono assenti dal reticolo. Difficile da realizzare perché un solo dei due "ioni" carichi deve instabilitarsi nell'eq. di carica

**FRENKEL**: uno ione, in genere un **CATIONE**, che è piccolo si sposta da una posizione regolare a una **interstiziale**. Difetti meno probabili e poche hanno bisogno di energia per formarsi

è possibile un **TOTO DI VACANZE E DI ATOMI INTERSTIZIALI**

**Conseguenze della presenza dei difetti puntuali**

1) Creazione di soluzioni solide (leghe)  
2) Diffusione allo stato solido

1) Soluzioni solide

**Solvente**  
**Soluto**

Soluzione solida **SOSTITUZIONALE**

Soluzione solida **INTERSTIZIALE**

**NB** e vacanze aumentano la conducibilità elettrica

• i difetti aumentano la resistenza a causa dell'E di formazione dei difetti

Prof. Lamberto STU - Cap. 8 - Pina A

**CEMENTAZIONE:** processo usato per aumentare la resistenza all'usura degli acciai che consiste nell'arricchimento superficiale in CARBONIO e la conseguente formazione di carburi.

20/10/2014

**La diffusione allo stato solido**

Gradiente di concentrazione  
→ Driving force del fenomeno

Fig. 13.19 La diffusione in un metallo. (a) Concentrazione in un metallo. (b) Concentrazione in un metallo.

Prof. Lombardi - STM - Cap. 6 - Par. A

gradiente associato a una differenza di concentrazione di una stessa specie chimica tra due volumi adiacenti per es. alle estremità di una membrana semi permeabile

**SINTERIZZAZIONE:** trattamento termico ad elevate T che trasforma materiali in polvere in uno indivisibile → si usa al posto delle colate per certi materiali

avviene rimpicciolendo l'accoppiamento tra 2 superfici di contatto A e B → aumento l'energia degli atomi che quindi possono rompere i legami sul reticolo cristallino e passare da una parte all'altra

**La diffusione allo stato solido**

Prima legge di Fick:  $J_x = -D \frac{dc}{dx}$

$J_x$  = flusso atomico (quantità di materia che fluisce nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie) nella direzione x a causa del gradiente di concentrazione  $dc/dx$

Coefficiente di diffusione, diffusività  $[m^2/s]$   
 $D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}$   
 Q = energia di attivazione del moto atomico (dei difetti, vacanze o interstiziali)

Prof. Lombardi - STM - Cap. 6 - Par. A

non tiene conto della diffusione termica

**SOLUBILITÀ:** massima quantità di soluto che può essere disciolto in un solvente in determinate condizioni

**DIFFUSIVITÀ:** proporzionale al gradiente di velocità delle particelle nel mezzo all'interno del quale esse si trovano.

$\frac{Q}{-k_B T} =$  eq. di Maxwell-Boltzmann = probabilità che un atomo presenti un'energia maggiore di un dato valore  $\Phi$  in  $T_{oule}$

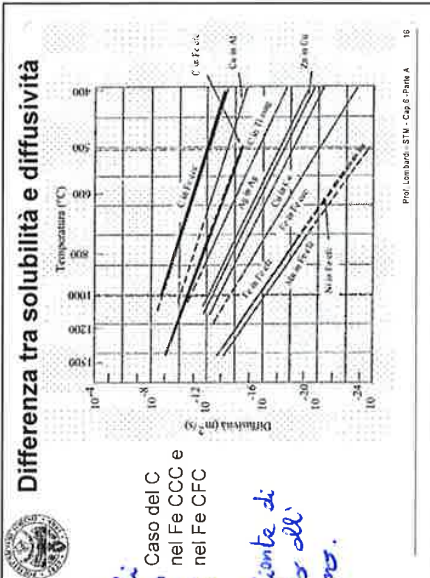
7

**Alcune conseguenze della diffusione allo stato solido**

**Cementazione (carburazione) degli acciai**  
 Metodi del ferro

**Densificazione (sinterizzazione) dei ceramici**

Prof. Lombardi - STM - Cap. 6 - Par. A



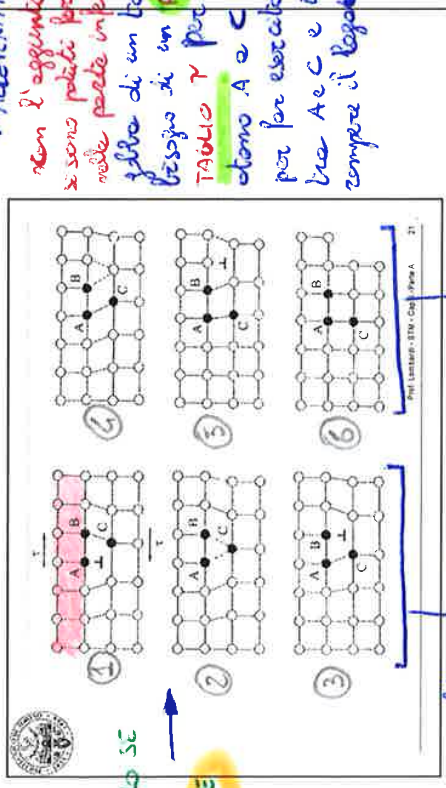
Caso del C nel Fe CCC e nel Fe CFC

massima quantità di soluto che può essere disciolto in un solvente in determinate condizioni

proporzionale al gradiente di velocità delle particelle nel mezzo all'interno del quale esse si trovano.

8

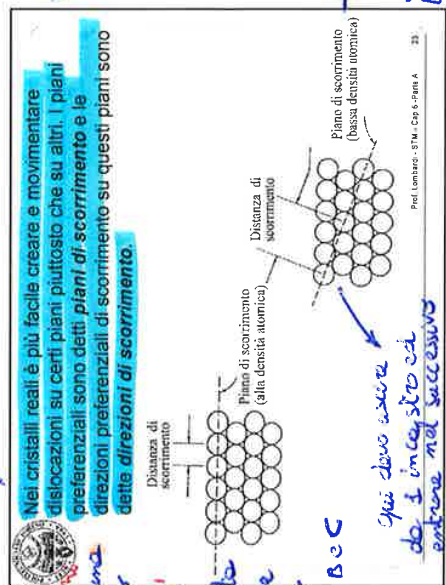
per far scivolare questa porzione di materiale se quello sotto stante  
 posso rompere tutti i legami e quindi si scacciano 20/10/2014 è stato  
 struttura, ma questo è **ENERGETICAMENTE COSTOSO** (devo fornire  
 molta energia agli atomi) → non va bene



**POSSIBILE SOLO SE  
 LEGAME  
 ADIREZIONALE**

**METODO ALTERNATIVO:**

non è l'aggiunta del semplice non  
 si sono potuti rompere alcuni legami  
 nella parte inferiore (un po' come una  
 gamba di un tappeto), quindi ho  
 bisogno di un **PIELOLO SPARCO DI  
 TAVOLINO** per far avvicinare il  
 tavolo A e C tanto quanto basta  
 per far esercitare forze attrattive  
 tra A e C e indebolire (fino a  
 rompere il legame) quello tra B e C



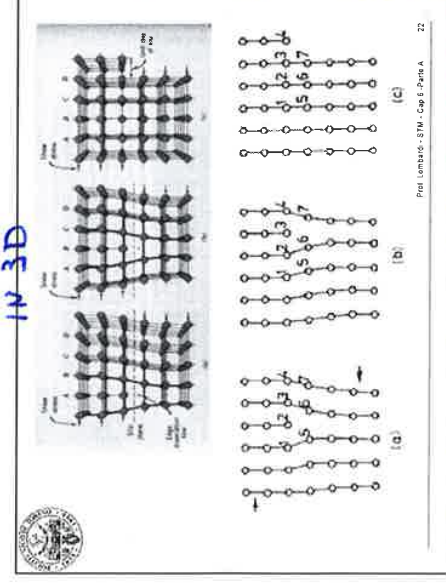
Nel cristalli reali è più facile creare e movimentare  
 dislocazioni su certi piani piuttosto che su altri. I piani  
 preferenziali sono detti **piani di scorrimento** e le  
 direzioni preferenziali di scorrimento su questi piani sono  
 dette **direzioni di scorrimento**.

**NB meglio avere una DISTANZA DI SCORRIMENTO PICCOLA (GRANDE COMPATIBILITÀ) in modo che sia sufficiente un solo SPARCO DI TAVOLO PICCOLO**

più gli atomi sono vicini meglio è

scorrimiento + difficile perché gli atomi sono incastrati tra loro

non basta però solo scorrere con una piccola  $\gamma$



quando sono vicini, quindi l'ATTORE DI SOTTO È ATTRATTO DALLA DISLOCAZIONE e viene interpretato dove la distanza media tra gli atomi è maggiore (dove c'è + post) in quanto il suo movimento richiede un'energia di attivazione **NB** qui anche la **DISLOCAZIONE RISULTA STABILIZZATA** in quanto il suo movimento richiede un'energia di attivazione maggiore (rafforzamento per soluzioni sostituzionali)

Struttura cristallina	Piani e direzioni di scorrimento	Geometria	Esempi
CCO	$\langle 110 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	Mo, W, Fe $\alpha$
CCF	$\langle 111 \rangle$	$\langle 110 \rangle$	Al, Cu, Ni, Fe $\gamma$
enclonite compilate	$\langle 0001 \rangle$	$\langle 1120 \rangle$	Cd, Mg, Zn, Ti $\alpha$

**DISLOCAZIONI + ATOMI SOSTITUZIONALI O INTERSTIZIALI**

La deformazione del reticolo attorno all'apice di una dislocazione influenza il moto degli atomi sostituzionali in quanto i due campi tensionali (della dislocazione e dell'atomo sost) posso interferire

**DISLOCAZIONI + BORDI DI CRISTALLI**

Lo scorrimento delle dislocazioni grazie ad azioni di taglio vicino **INTERDOTTO NEI PRESSI DEL BORDO DI CRISTALLI (ACCURTO DELLA DISLOCAZIONE)** come conseguenza del diverso orientamento dei bordi

20/10/2014

si possono disporre in 2 modi:  
 - **ORDINE GRANDE** dove è più facile posizionarsi a causa dei difetti di bordo di grano  
 - **INTERGRANO** in quanto gli atomi sono sufficientemente piccoli da disporsi nelle cantine interstiziali

**DIFFERENZE A LIVELLO DI PETFICIO**

### I difetti tridimensionali precipitati di una seconda fase

Esempio → Leghe di Alluminio  
**Leghe Al-Cu: DURALLUMINIO**  
 S.S. α  
 Cu soluto in Al solvente  
 Precipitato θ  
 CuAl<sub>2</sub> (composto stechiometricamente definito, di tipo INTERMETALLICO, con sua autonoma struttura cristallina)

Prof. Lombardi - STM - Cap 6 - Pagina A 31

20/10/2014

Prof. Lombardi - STM - Cap 6 - Pagina A 29

### I difetti tridimensionali precipitati di una seconda fase

**coerente**  
**incoerente**

si può dire che coerenza è dall'ordine, ma cambia sb una piccola zona  
 dovuto alla stechiometria della matrice del materiale

si organizzano in strutture disordinate rispetto alle strutture ordinate

stessa struttura

il raggio è come estensione del materiale stesso → atomi dell'elemento estraneo concentrati in una zona precisa

in fluisce sulla resistenza del materiale  
 i materiali porosi vengono spesso usati per l'isolamento termico (riservano a catturare molta aria che è un ottimo isolante).

Prof. Lombardi - STM - Cap 6 - Pagina A 32

### I difetti tridimensionali: porosità, inclusioni, precipitati

La porosità

$P = (V_p / V_{tot})$   
 $E = E_0 (1 - 1.9 P - 0.9 P^2)$   
 $\sigma_r = \sigma_0 e^{-nP}$

$P = n^3$  porosità  
 $V_p = \text{volume porosità}$

Prof. Lombardi - STM - Cap 6 - Pagina A 30



03/11/2014

**Cap. 6 – Oltre l'elasticità:  
la duttilità**

Prof. Lombardi - STM - Corso di Prova

**Le curve meccaniche: curve  $\sigma-\epsilon$**

**Prove statiche**

- a trazione
- a compressione
- a flessione
- di durezza

*prove distruttive*

*prova non distruttiva*

Il carico è progressivamente aumentato fino a rottura (trame che nel caso della prova di durezza).

la prova a flessione è una combinazione delle prime 2 (trazione e compressione)

- nelle prove a DUREZZA non c'è la rottura del materiale → non sono prove distruttive

03/11/2014

**Le curve meccaniche: curve  $\sigma-\epsilon$**

**Prove meccaniche**

- **statiche**, quando la sollecitazione viene applicata al provino in maniera gradualmente crescente fino a rottura del provino stesso;
- **dinamiche**, quando la sollecitazione viene applicata bruscamente sotto forma di impulso di energia;
- **di fatica**, quando la sollecitazione è applicata ciclicamente per un gran numero di volte fino a produrre, dopo un certo numero di cicli, la rottura.

Normativa: EN UNI, ISO, ASTM, ...

Prof. Lombardi - STM - Corso di Prova

**Le curve meccaniche: curve  $\sigma-\epsilon$**

**PROVINO AD OSO DI CANE**

parte del provino in cui la sezione è maggiore in modo che avvenga una presa maggiore agli allungamenti. Qui non lo sollecitazioni impuntate.

parte del provino maggiormente sollecitata dovuta all'applicazione di carichi

**(TUTTO UTILE)**

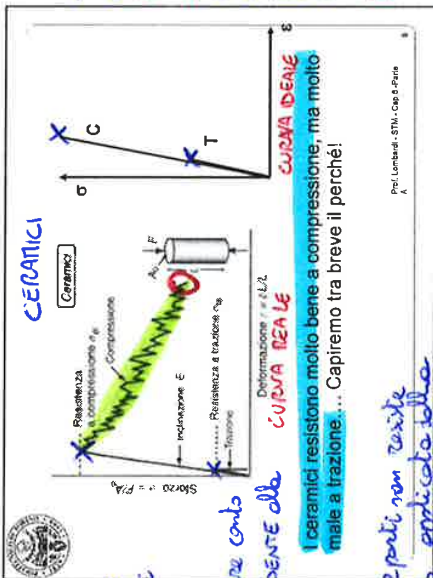
è coprire le proprietà / caratteristiche del materiale che costituisce il provino

1

03/11/2014

O = aumento dello sforzo per avere deformazioni crescenti dovuto all'INCREDIAMENTO = il metallo risulta rafforzato in seguito a una deformazione elastica e plastica  
 nell'intorno di  $\sigma_y$  la curva subisce variazioni non sempre lineari

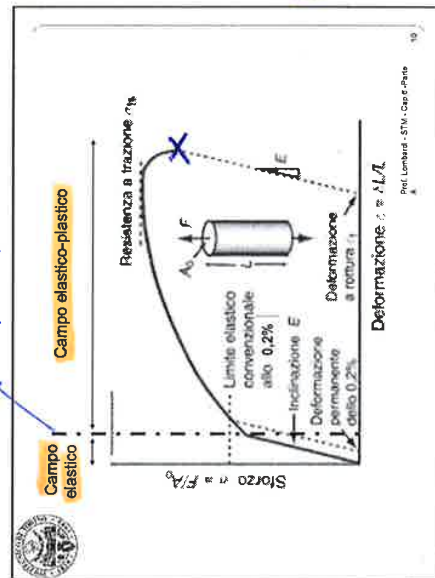
X = punti di rottura del materiale



→ dopo la rottura rimane anche nella macchina il provino se resiste in parte ai carichi applicati  
 → me lo devo sempre conto solo del tratto presente alla rottura  
 O = una volta che il provino si è rotto in 2 punti non resiste più a nessuna forza applicata alla macchina

→ dal grafico destro si nota come per i materiali ceramici le curve sforzo-deformazione si distinguono tra trazione e compressione  
 i materiali ceramici resistono molto bene a compressione e molto male a trazione (il materiale ceramico resiste a carichi più elevati)  
 la plasticità delle due curve non varia in quanto E dipende dal tipo di materiale non dal tipo di carico applicato

→ da qui in poi (in orizzontale) iniziano le deformazioni plastiche



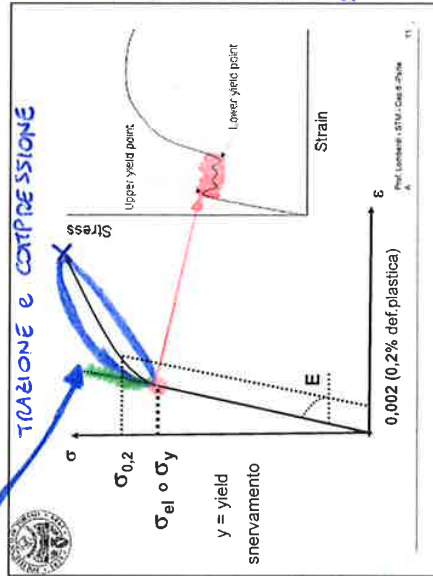
→ dopo la rottura rimane anche nella macchina il provino se resiste in parte ai carichi applicati

03/11/2014

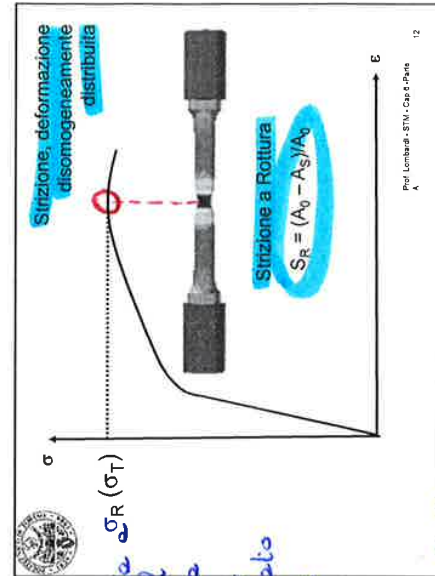
limite convenzionale in quanto nei metalli l'inizio delle deformazioni plastiche non è facile da individuare

$\sigma_{0,2}$  = limite di snervamento = sforzo affinché il materiale si deformi PLASTICAMENTE dello 0,2%  
 $\sigma_y$  = tensione di snervamento = valore delle tensioni da cui un materiale duttile inizia a deformarsi plasticamente

$A_0$  = area iniziale  
 $A_s$  = area dopo la strizione



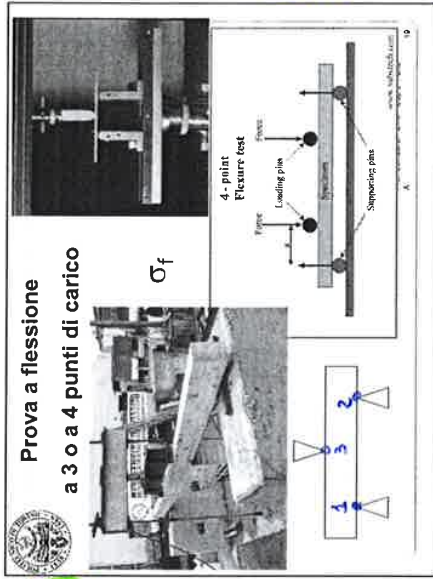
→ non c'è più linearità data dalla legge di Hooke



O in questo punto il provino inizia a subire la STRIZIONE → al centro del tratto utile, esso modifica la sua forma facendo diminuire l'area  $A_0$  in base alla formula calcolata lo sforzo dato dall'applicazione di un carico  $F \rightarrow \sigma = \frac{F}{A_0}$

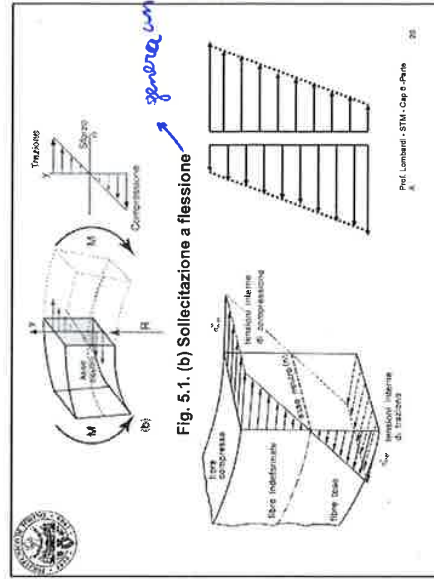
→ nei primi la strizione si ha quasi per una sforzo-deformazione diventa nettamente non lineare (in genere attorno a una deformazione dell'1%)

03/11/2014

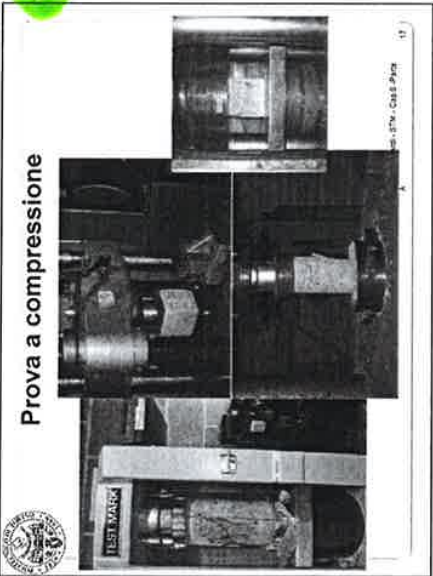


1, 2 = alloggi della trave da sottoporre a flessione  
 1, 2 = posizionati a distanza normale e sicure del tips di trave  
 3: posizionato a metà trave

modulo a flessione in cui si tiene conto di di sforzi a trazione che a compressione



03/11/2014



**CLASSIFICA DEI MATERIALI SECONDO E (modulo elastico)**

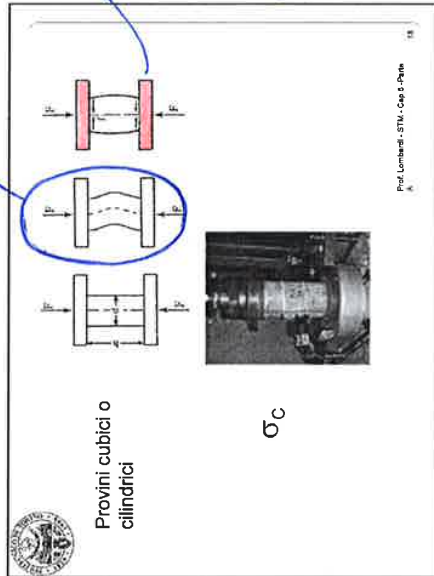
- 1° CERAMICI
- 2° METALLI
- 3° POLIMERI TERMOINDURENTI
- 4° POLIMERI TERMOPLASTICI

vedi pendente delle curve del grafico a pag 7 e 8

bisogna evitare SPANDIMENTI

superfici piane e parallele in modo da ottenere una distribuzione uniforme della forza

i prismi a compressione sono di forme cilindriche, non ad esp di cone



03/11/2014

le scale di durezza dei materiali non hanno unità di misura

**La zona indentata (deformazione plastica localizzata) è circondata da materiale che non è stato deformato**

**$H \approx 3\sigma_y$  (limite elastico)**  
 ( $\times H = 11Pa$ )

La resistenza è misurata in MPa, e poiché H è una resistenza, sarebbe logico e appropriato esprimerla, essa pure, in MPa.

Tuttavia, una scala comunemente utilizzata, quella Vickers, HV, usa come unità di misura il kg/mm<sup>2</sup>, con il risultato che:

**$H \approx 3 \sigma_y / 10 \approx \sigma_y / 3$**

Prova NON distruttiva, richiede solo un ridotto volume di materiale.

Prof. Lombardi - STM - Casa Editrice

questo è vincolo così tanto che H è superiore al limite elastico  $\sigma_y$

• con scavo il limite elastico del materiale può essere più o meno prevedibile il suo comportamento a tensione una volta che è stato sottoposto a una prova di durezza e può anche scegliere quella più adatta in modo da non fare una prova inutile quando sei già a priori che il materiale non ha più assolutamente speranza

• la prova a durezza per il vantaggio di non essere distruttiva, ma fornisce anche info meno precise di quelle a trazione compressione che è però distruttiva

**SCALE DI DUREZZA**

Scala	Unità	Intervallo
Rockwell A	HRA	15 - 85
Rockwell C	HRC	20 - 70
Vickers	HV	5 - 1000
Brinell	HBS	5 - 650
Brinell	HBN	10 - 1000
Shore	Shore	1 - 10

Fig. 4.5 Le comuni scale di durezza con i fattori di conversione

© CEAS - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materiali (ISBN 978-88-08-18126-8)

13

03/11/2014

**Proprietà specifiche**

**MOR**  
 Modulus of Rupture  
 Resistenza a rottura per flessione di materiali fragili

Fig. 4.6 Le migliori proprietà di resistenza

© CEAS - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materiali (ISBN 978-88-08-18126-8)

le bolle bianche che racchiudono materiali simili tra loro sono allungate in quanto per materiali simili la densità (asse x) non varia molto.

**Modulo - Resistenza**

Fig. 4.7 La migliore proprietà di resistenza a trazione

© CEAS - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materiali (ISBN 978-88-08-18126-8)

14

03/11/2014

03/11/2014

**Cap. 6 – Oltre l'elasticità:  
la duttilità**

Prof. Lombardi - STM - Cap. 6 - Parte C

i cristalli che compiono il stesso cristallino di un solido si spingono al moto delle dislocazioni, quindi, per ottenere una deformazione plastica, le sollecitazioni devono superare tale resistenza.

Una dislocazione si muove in linea retta lungo un piano di scorrimento, percorrendo una distanza  $L_2$ .  
Come conseguenza, produce lo scorrimento della parte superiore del cristallo di una distanza  $b$  relativamente a quella inferiore.

Prof. Lombardi - STM - Cap. 6 - Parte C

**Il ruolo dei difetti sulla duttilità dei metalli**

Interazione difetti  $\leftrightarrow$  moto dislocativo

I difetti agiscono come ostacoli al moto dislocativo: diminuisce la duttilità, cresce la resistenza.

I cristalli si oppongono al moto dislocativo con una resistenza simile a quella di attrito  $f$  per lunghezza unitaria.

Affinché il materiale subisca deformazione plastica, le sollecitazioni esterne debbono superare questa resistenza  $f$ .

Prof. Lombardi - STM - Cap. 6 - Parte C

il moto delle dislocazione cresce e immagazzinare molta energia punta al materiale. X impedisce tale moto crea resistenza del materiale più elevate, ma questo non serve in grado di deformarsi plasticamente (perde duttilità) e quindi giunge più velocemente a rottura.

in presenza delle dislocazioni E (modulo elastico) non cambia perché il materiale (e quindi il tipo di legame) è sempre lo stesso.

La sollecitazione di taglio  $\tau$  agisce su un'area  $L_1 \times L_2$ , il che fornisce una forza di taglio  $F_s = \tau L_1 L_2$ .

Se lo spostamento parallelo ad essa è  $b$ , la forza compie un lavoro:  $W = \tau L_1 L_2 b$

Prof. Lombardi - STM - Cap. 6 - Parte C

$\tau = \frac{F_s}{A}$   
considero solo la forza // allo spostamento

03/11/2014

**La resistenza del reticolo  $f_i$**

Cosa provoca la resistenza allo scorrimento,  $f$ ?

resistenza del reticolo,  $f_i \rightarrow$  la resistenza intrinseca della struttura cristallina allo scorrimento plastico.

- metalli puri sono teneri in quanto i legami metallici adirezionali si oppongono debolmente al moto dislocativo, mentre i ceramici sono duri perché i più localizzati legami covalenti/ionici bloccano le dislocazioni.

Quando la resistenza del reticolo è elevata, come avviene nei ceramici, è superfluo ogni ulteriore rafforzamento - la problematica è piuttosto quella di evitare la rottura!!!!

Prof. Lombardi - STM - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

si può fare poco per modificarla in quanto è una caratteristica intrinseca come il modulo di elasticità

↓

devo cambiare strada → rendendo il reticolo imperfetto (ci aggiungo imperfezioni) in modo che le dislocazioni trovino una maggiore resistenza all'avanzamento

03/11/2014

Ogni ostacolo esercita una forza di bloccaggio (effetto di pinning)

**RETICOLA IDEALE**

(a) Reticolo ideale, resistenze  $f_i$

**X SOLUZIONE SOLIDA**

(b) Rafforzamento per soluzione solida, resistenze  $f_s$

**DISLOCAZIONI A PARASTA (con contributo di scorrimento)**

(c) Dislocazioni a freccia con pinning di precipitati

**X PRECIPITAZIONE**

(d) Rafforzamento per precipitazione, resistenze  $f_p$

**INCORCRUMENTO**

(e) Incorcrumento, resistenze  $f_{inc}$

Come una dislocazione "travolge" il pinning di scorrimento, l'angolo di scorrimento è maggiore.

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materials ISBN 978-88-08-78125-8 Prof. Lombardi - STM - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Quando la resistenza del reticolo  $f_i$  è bassa, come nei metalli, il materiale può essere rafforzato introducendo degli ostacoli allo scivolamento.

**MECCANISMI DI RAFFORZAMENTO**

- aggiungendo elementi in lega per creare il **rafforzamento da soluzione solida ( $f_s$ )**,
- aggiungendo precipitati o particelle disperse per dare vita a **rafforzamento per precipitazione - o per dispersione ( $f_{p,d}$ )**,
- aggiungendo altre dislocazioni per indurre **incrudimento ( $f_{wh}$ , work hardening)**
- aggiungendo bordi di grano producendo un **rafforzamento per taglia di grano ( $f_{gb}$ , grain boundary)**.

Prof. Lombardi - STM - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

devo rendere più difficoltoso il moto dislocativo

↓

aumento così la resistenza all'avanzamento delle dislocazioni e quindi anche la resistenza meccanica

5

**Il contributo al rafforzamento**

Gli ostacoli al moto dislocativo fanno aumentare la resistenza  $f$  e pertanto la resistenza meccanica.

Per calcolarne il contributo a  $f$ , occorre conoscere la loro distanza e la loro resistenza.

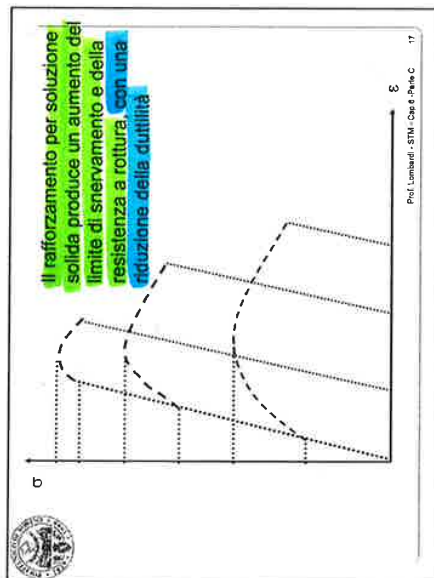
Definita  $L$  la distanza che li separa sul piano di scorrimento, il numero di ostacoli  $N_L$  che toccano una linea di dislocazione di lunghezza unitaria è dato da:

**$N_L = 1/L$**

Prof. Lombardi - STM - Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

6

03/11/2014



Se le particelle disperse o precipitate sono troppo resistenti tendono ad impedire al moto dislocativo di attraversarle, allora la forza che spinge la dislocazione in avanti si divide in due: una parte che serve a superare la resistenza del precipitato e un'altra parte che serve a superare la resistenza del metallo matrice. Il raggio critico è quello per il quale la dislocazione si muove senza rompere il precipitato. Se il precipitato è più grande di questo raggio critico, la dislocazione si muove rompendo il precipitato. Se è più piccolo, la dislocazione si muove aggirando il precipitato.

**Rafforzamento per dispersione e per precipitazione**

Altro modo per ostacolare le dislocazioni: **dispersione di piccole particelle resistenti** lungo il loro percorso.

**Disperdere piccole particelle solide di un composto ad elevato punto di fusione in un metallo fuso, e procedere con l'operazione di getto in stampo, intrappolando le particelle durante la solidificazione della lega fusa**

→ MCM (Al-SiC).

Prof. Lombardi - STM - Corso Pirella C 18

9

03/11/2014

Le particelle di soluto sono troppo resistenti per essere tracciate → la dislocazione si deve passare intorno

**Rafforzamento per dispersione e per precipitazione**

Alternativamente, **si possono generare le particelle in situ attraverso un processo di precipitazione.**

Una lega di alluminio contenente il 4% di rame fornisce i precipitati più resistenti, assai prossimi l'uno all'altro, di un composto duro CuAl<sub>2</sub>.

Il rame legato con un po' di berillio produce precipitati del composto CuBe.

La maggior parte degli acciai sono rafforzati per precipitazione di carburi, sempre ottenuti in questo modo.

**precipitati forniscono un contributo sostanziale a T.**

Prof. Lombardi - STM - Corso Pirella C 19

Le leghe di Al rafforzate in modo simile possono essere 15 volte + resistenti dell'Al puro

**Tre requisiti a livello di dds**

- Alta solubilità reciproca ad alta T (soluzione solida α)
- Limitatissima solubilità reciproca a T ambiente
- Formazione di un composto intermedio (2<sup>a</sup> fase; CuAl<sub>2</sub> = β)

Prof. Lombardi - STM - Corso Pirella C 20

CONFIGURAZIONE CRITICA: quella in cui la dislocazione si muove senza rompere il precipitato e si deforma.

DOPO CI VUOLE TENERE ENERGIA X FAR TENERE LA DISLOCAZIONE

10

03/11/2014

Fig. 6.19 Posizioni successive di una dislocazione quando essa supera le particelle che ne ostacolano il movimento. La configurazione critica è quella con la curvatura più stretta, mostrata in (b).

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Abney Materials ISBN 978-88-08-10123-0

**La configurazione critica è quella semicircolare.**

La forza totale  $\tau b L$  agente su un segmento di lunghezza  $L$  è solamente controbilanciata dalla forza  $2T$  dovuta alla tensione lineare che agisce su entrambe le parti del rigonfiamento.

La dislocazione fuoriesce quando:

$$\tau_{ppt} = (2T)/(bL) \approx (Eb)/L$$

Prof. Lombardi - STU - Cap. 6 - Parte C 25

tensione sulle parti della dislocazione

03/11/2014

**Rafforzamento da bordi di grano**

Una dislocazione presente in un grano non può semplicemente scivolare nel successivo in quanto i piani di scorrimento non sono allineati → **Implantamento dislocazioni.**

ma nuove dislocazioni si devono formare nel grano 2 con velocità di scorrimento tali per cui, se sovrapposti, eguagliano quello della dislocazione del grano 1 così che gli spostamenti si sommano: no a brodo pronto

Prof. Lombardi - STU - Cap. 6 - Parte C 27

Fig. 6.19 Posizioni successive di una dislocazione quando essa supera le particelle che ne ostacolano il movimento. La configurazione critica è quella con la curvatura più stretta, mostrata in (b).

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Abney Materials ISBN 978-88-08-10123-0

**Gli ostacoli esercitano una resistenza**

$$f_{ppt} = 2T/L$$

Il rafforzamento per precipitazione è un metodo efficace per incrementare la resistenza: le leghe di alluminio rafforzate per precipitazione possono essere 15 volte più resistenti dell'alluminio puro.

Prof. Lombardi - STU - Cap. 6 - Parte C 28

13

**Rafforzamento da bordi di grano**

Questo fornisce un ulteriore contributo alla resistenza,  $\tau_{gb}$ :

$$\tau_{gb} = k_p \sqrt{D}$$

$k_p$  = costante di Peetch.

Per dimensioni di grano  $D$  normali (1-100  $\mu\text{m}$ ),  $\tau_{gb}$  è piccolo e non è una fonte rilevante di resistenza

Per materiali microcristallini ( $D < 1 \mu\text{m}$ ) o nanocristallini ( $D \rightarrow 1 \text{ nm}$ ), diventa significativo.

Prof. Lombardi - STU - Cap. 6 - Parte C 28


14



03/11/2014

**Incrudimento per deformazione plastica a freddo**

Accumulo dislocazioni indotto dalla lavorazione

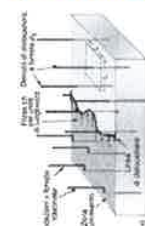


**Densità di dislocazioni,  $\rho_d$ , la lunghezza di linea di dislocazione per volume unitario ( $m/m^3$ ).** In un metallo dolce ricotto, la densità di dislocazioni è di circa  $10^{10} m/m^3$ , il che significa che 1 centimetro cubico contiene circa 10 km di linea di dislocazione.

Quando i metalli sono deformati, le dislocazioni si moltiplicano, provocando la crescita della loro densità fino a  $10^{17} m/m^3$  o anche più - 100 milioni di km per centimetro cubico.

Prof. Lombardi - STM - Cap. 4 - Page C 35

**Incrudimento per deformazione plastica a freddo**



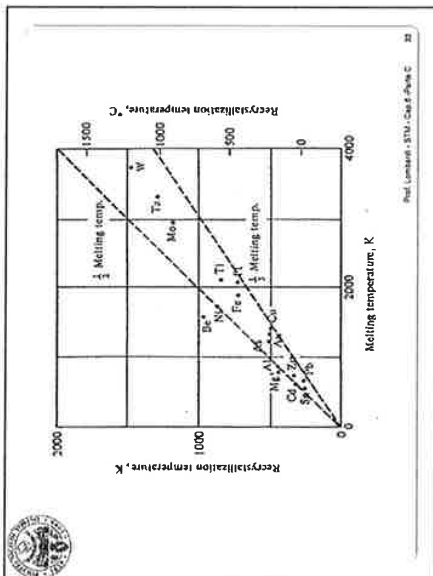
Una dislocazione in movimento trova il suo piano di scorrimento occupato da una foresta di dislocazioni che si intersecano con una distanza media  $L = \rho_d^{-1/2}$  ( $\rho_d$  = numero di dislocazioni per area unitaria).

La dislocazione in movimento avanza. Fa scorrere il materiale al di sopra del piano di scorrimento rispetto a quello sottostante e questo crea un piccolo scalino in ciascuna dislocazione della foresta.

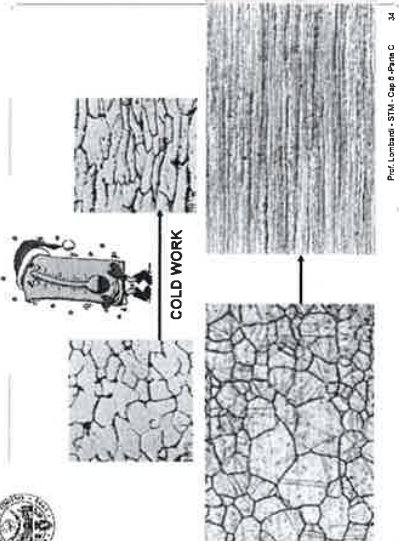
Prof. Lombardi - STM - Cap. 4 - Page C 36

→ ogni scalino esercita una forza di attrito

03/11/2014



**COLD WORK**



Prof. Lombardi - STM - Cap. 4 - Page C 34

18

17

03/11/2014

**Incrudimento per deformazione plastica a freddo**

Tutti i metalli incrudiscono se lavorati a freddo ( $\epsilon = CW$ )

$\sigma_y = (A \epsilon^n)$

$n$  = coefficiente di incrudimento

più è grande  $n$ , più la curva  $\sigma(\epsilon)$  viene modificata

Prof. Lombardi - STN - Cap. 8 - Parte C 41

**Tracce ↓ più il materiale è puro**

**Incrudimento per deformazione plastica a freddo**

Può essere un fatto desiderato oppure indesiderato.

**Desiderato:** fine lavorazione → aumento del limite elastico/di snervamento.

**Indesiderato:** proseguimento lavorazione → l'incrudimento fa crescere così rapidamente il limite elastico che si è costretti ad interrompere la lavorazione e ricuocere il metallo (riscaldando in modo da eliminare le dislocazioni accumulate).

Prof. Lombardi - STN - Cap. 8 - Parte C 42

03/11/2014

**Incrudimento per deformazione plastica a freddo**

**DETERMINANTE DEI METALLI**

Ricottura di ripristino (recovery)

RICOTTURA SÌ MA PARALLELA AL RETICOLO CRISTALLINO INCRODITO

Ricottura di ricristallizzazione

Prof. Lombardi - STN - Cap. 8 - Parte C 43

non si modifica la struttura cristallina ma, ma si ha solo la distensione del materiale

**TR ↓ & grado di incrudimento ↑**

**COMPLETA SOSTITUZIONE DELLA STRUTTURA DI STORCA ED INCRODITA CON UNA NUOVA STRUTTURA**

**EFFETTI RICRISTALLIZZAZIONE**

Prof. Lombardi - STN - Cap. 8 - Parte C 44

→ accrescimento dei grani cristallini

**RICOTTURA**

trattamento termico che consiste nel riscaldamento ad una  $T < T_{fusione}$  seguito da un certo periodo di permanenza e da  $T$  e poi da lento raffreddamento. Serve a ridurre le tensioni residue interne (incrudimento compreso). Molti impurità aggiuntivi si ricompongono in grani completi e le dislocazioni si dispongono lungo linee pacose per avere maggiore stabilità energetica

**RICRISTALLIZZAZIONE**

riduce le eccessive tensioni dell'incrudimento che introduce una certa quantità di energia nel reticolo cristallino e tale energia aggiunta a un certo livello di energia termica, stimola il riaggiustamento dei cristalli.

Il materiale, se riscaldato si distende e diminuiscono le tensioni interne (RICOTTURA). Se  $T > T_{ricrist.}$  si ha formazione (nucleazione e accrescimento dei grani).

21

22

14/11/2014

$G_c =$  lavoro per unità di volume  
 $\times$  creare nuove superfici

non necessariamente  
 ho la rottura completa  
 del pezzo

area sotto la  
 curva stress-deformazione  
 fino a rottura

$G_c =$  ENERGIA  
 lavoro  $\times$  unità di volume  
 per portare a rottura  
 il materiale

**Cap. 8 – Frattura e tenacità a frattura**

La frattura dei materiali reali avviene sotto sollecitazioni anche molto inferiori rispetto alla resistenza teorica calcolabile perché in quel calcolo non tengo conto dei difetti del materiale in base all'energia dei legami.

Prof. M. Lombardi - STM - Cap. 8

**Tenacità**

Lavoro necessario per portare a rottura il materiale (lavoro di frattura)  $\rightarrow$  quantifica la capacità del materiale di opporsi alla propagazione della frattura

High Carbon Steel  
 Medium Carbon Steel  
 Low Carbon Steel  
 Strain

Prof. M. Lombardi - STM - Cap. 8

**Frattura e tenacità a frattura**

1) Resistenza e tenacità

**Resistenza**  
 Limite elastico / di snervamento: capacità di opporsi alla deformazione plastica  
 Resistenza a rottura: sollecitazione massima necessaria alla rottura del materiale

**Tenacità**  
 Quantità di energia per unità di volume assorbita dal materiale per pervenire a rottura  $\rightarrow$  la resistenza che il materiale oppone alla rottura quando sotto sollecitazione  
 = RESISTENZA DEL MATERIALE ALLA PROPAGAZIONE DELLA FRATTURA

Prof. M. Lombardi - STM - Cap. 8

**Prove per la tenacità**

Trazione su provino intagliato  
 Prova di resilienza

La resilienza è la capacità di un materiale di resistere a sollecitazioni impulsive  $\rightarrow$  carichi improvvisi, urti.  
 La resistenza è l'energia per unità di superficie assorbita da un materiale portato a rottura (energia o lavoro di rottura per unità di superficie).

Prof. M. Lombardi - STM - Cap. 8

La resistenza di solito cresce con la deformazione plastica in quanto il materiale si indurisce fino a raggiungere la sua resistenza a trazione

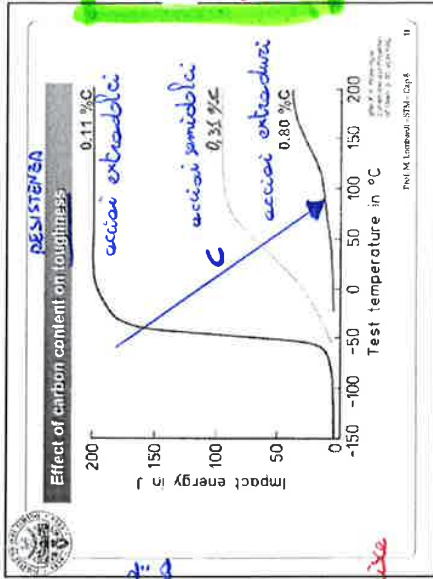
rispetto di un corpo di assorbito energia di deformazione

area = energia di inizio  
 area = energia di propagazione

14/11/2014

CLIVAGGIO = naturale tendenza di determinate strutture a separarsi

**NB**  
 maggiore è la concentrazione di C nel Fe, MINORE è la diff. di coefficiente di espansione di energia bimodale tra alte e basse T  
 non lo comportamenti così diversi se C ↑

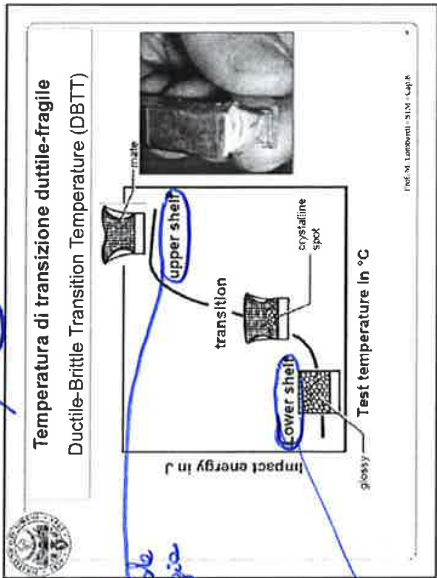


a basse T alcuni metalli e alcuni polimeri diventano FRAGILI e il modo di frattura cambia da una modalità duttile (shear) a una modalità fragile (cleavage) di CLIVAGGIO.  
 Solo alcuni metalli con strutture CCC restano duttili (come, alluminio, nichel) anche a basse T.  
 Gli altri hanno limiti elastici che crescono quando la T diminuisce così che la zona plastica di ogni cricca diventa tanto piccola che cambia il modo di FRATTURA dando vita a una TRANSIZIONE DUTTILE - FRAGILE

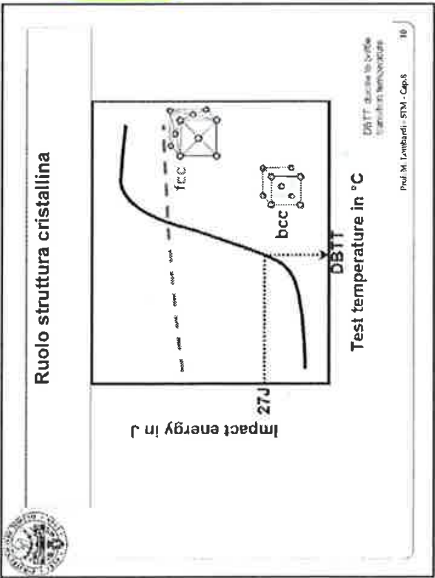
Seconda Guerra Mondiale → navi da trasporto Liberty  
 Strutture rivettate abbandonate per quelle saldate → maggiore velocità di produzione.  
 Quasi 5000 navi costruite:  
 • 12 si ruppero in due tronconi nelle fredde acque del Nord Atlantico.  
 Rotture di tipo fragile, anche se il materiale aveva comportamento duttile a temperatura ambiente in prove di trazione e di resilienza → DBTT

La per alcuni acciai (quelli ferritici a struttura CCC) tale T di transizione è prossima a 0°C

no T<sub>eff</sub> perché sono compatti e quindi il modo di dislocazioni è favorito e quindi la resistenza è maggiore  
 transizione da FCC a CCC



stano solo dopo del. plastica e notevole assorbimento di energia  
 stanno anche dopo massima energia assorbita



14/11/2014

Anche se difetti di dimensione micronica-millimetrica... analizziamolo a livello atomico!

Non confondere questi difetti con quelli atomici (vacanze, dislocazioni...!!!!)

$\sigma_{\text{locale}} = \sigma (1 + 2\sqrt{c/\rho})$

Prof. M. Lombardi - STM - Cap 8

MOD I: sollecitazione  $\perp$  alla cricca

MOD II: sollecitazione si porta prevalentemente al piano di scivimento della cricca

MOD III: sollecitazione esterna // alla cricca

MODI di propagazione della cricca

Modo I (distacco) A trazione semplice Più severo

Modo II (slittamento) Meno critico

Modo III (lacerazione) Meno critico

Prof. M. Lombardi - STM - Cap 8

→ dipendono da come è sollecitazione esterna e direzione di propagazione della cricca

NB una deformazione plastica tende ad aumentare il raggio di curvatura della cricca e quindi  $\rho \rightarrow \sigma \downarrow$  come sugli spicci:  $\rho \uparrow \rightarrow \sigma \downarrow$

Valore di  $\sigma_{\text{max locale}}$  registrata al vertice di un difetto interno di raggio di curvatura ( $\rho$ ) di  $2,5 \cdot 10^{-4}$  mm e lunghezza del difetto ( $2c$ ) di  $2,5 \cdot 10^{-2}$  mm, per una  $\sigma$  a trazione applicata pari a 170 MPa ( $\sigma_{\text{nominale}}$ )

$\sigma_{\text{max locale}} = \sigma_{\text{nominale}} [1 + 2(c/\rho)^{1/2}]$

$170 [1 + 2(1,25 \cdot 10^{-2}/2,5 \cdot 10^{-4})^{1/2}]$  [MPa]

$\sigma_{\text{max locale}} = 2574$  MPa

Prof. P. Pao - STM - Cap 8

onde se una sollecitazione può essere approssimativamente bassa o sia può far sì che la cricca già esistente aumenti di dimensioni e quindi si giunga a rottura del materiale

quando si applica una sollecitazione esterna (che in assenza di difetti sollecita tutti i legami nello stesso direzione della forza applicata) si creano difetti sollecitati solo i legami vicini alla cricca!

9

$K_I$  Fattore di intensità di sollecitazione in modo I

Per fessure, critiche appurpite  $(\rho \rightarrow 0)$

Analisi del campo di sollecitazione di fronte alla fessura di lunghezza  $C$  in funzione della distanza  $r$  dal suo vertice

$\sigma_{\text{locale}} = \sigma \left( 1 + Y \sqrt{\frac{\pi C}{2\pi r}} \right)$

$Y$  costante geometrica  $\approx 1$  (si prende direttamente dalle geometrie del materiale)

Prof. M. Lombardi - STM - Cap 8

$\sigma_{\text{max}} = \infty$ , ma in realtà non è così perché  $\rho$  deve essere maggiore sempre della distanza interna lamina

si prende direttamente dalle geometrie del materiale

se  $C \ll W$  dove  $W$  = lunghezza dell'intero pezzo nella direzione di propagazione della fessura

10

$K_{Ic} = \sigma^* \sqrt{\pi C}$

$K_{Ic A} = \text{cost}$

$C_A > C'_A$

A pari sollecitazione remota  $\sigma_{remota}$

$\sigma_{locale} > \sigma_{locale}^*$

$\sigma^* < \sigma^*$

*l'energia che si libera al crescere della cricca è imputabile al fenomeno di ritorno elastico*

- alcuni materiali presentano meccanismi aggiuntivi (oltre a quello di formazione di nuove superfici) di assorbimento di energia (per es: deformazione plastica)

*ho bisogno di una sollecitazione minore per porre il materiale con maggiore a rottura*

**VALIDA SOLO X MATERIALI FRAGILI**

**Caso dei materiali fragili: GRIFFITH**

Tenacità  $G_c$  e tensione (energia) superficiale  $\gamma$

La frattura genera 2 nuove superfici. Ogni superficie è associata ad un surplus di energia.

Tensione superficiale  $\gamma$  il lavoro che occorre spendere per aumentare unitariamente l'estensione superficiale di una fase (di una superficie)

fase (Unità di misura:  $J/m^2 = N \cdot m/m^2 = N/m$ )

*=> densità superficiale di energia di legame*

$K_{Ic} = \sigma^* \sqrt{\pi C}$

$K_{Ic A} > K_{Ic B}$

A pari taglia del difetto:  $C_A = C_B$

$\sigma^*_A > \sigma^*_B$

**NB** un materiale con maggiore tenacità (e quindi  $K_{Ic}$  + grandi) in presenza di vicelle di pari dimensione si frattura a carichi + elevati.

$K_{Ic} = \sigma^* \sqrt{\pi C}$

$K_{Ic A} > K_{Ic B}$

A pari sollecitazione critica:  $\sigma^*_A = \sigma^*_B$

$C_A > C_B$

**NB** un materiale con maggiore tenacità può tollerare la presenza di vicelle di maggiori dimensioni

14/11/2014

14/11/2014

**Caso dei materiali duttili: Orowan e Irwin**

I materiali duttili presentano un rilevante contributo alla tenacità fornito dall'energia consumata nella deformazione plastica

Prof. M. Lombardi - SIM - Cap 4

**CASO MATERIALE DUTTILE:**

se è in grado di deformarsi plasticamente, all'apice della cricca si verifica una deformazione plastica, allora la  $\sigma_{local}$  non è riferita a frattura (come nei materiali fragili), ma a **SVERNAMENTO**

in un materiale DUTTILE la cricca si propaga solo se si supera **Energy** ma non si supera **Stress**.

la deformazione plastica local che si verifica dopo essersi svincolata dal tutto, si crea poi una cavità dovuta a strizione

componente dovuta alla deformazione plastica

**Caso dei materiali duttili: Orowan e Irwin**

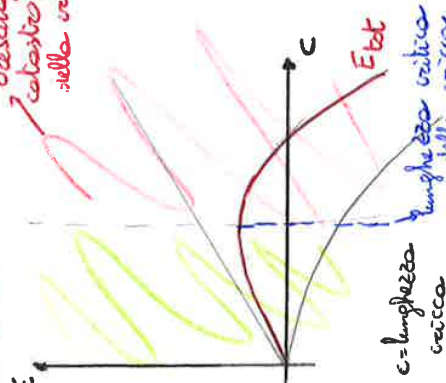
$$G_c = 2(\gamma + \phi)$$

$$K_{Ic} = \sigma^* \sqrt{\pi c} = \sqrt{EG_c}$$

Materiale	$G_c$ (J/m <sup>2</sup> )	$K_{Ic}$ (MPa m <sup>1/2</sup> )
Acciaio	30-135	80-170
Leghe Al	0.4-70	5-70
Leghe Ni	50-110	100-150
Leghe Ti	20-100	50-100
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	3-5
SiO <sub>2</sub>	0.1	4-5
Poliuretano	3-10	1-5
Polipropilene	7-10	3-4
Poliuretano	0.4-5	1-2.5
Resina epossidica	0.1-0.3	0.3-0.5
Resina poliestere	0.1-0.2	0.5-1

Prof. M. Lombardi - SIM - Cap 4

i polimeri termocindranti hanno tenacità relativamente basse perché  $K_{Ic} \propto E$



dal grafico si vede che, a partire da una certa lunghezza della cricca l'allungamento della stessa comporta una riduzione dell'energia complessiva del sistema. l'energia liberata diviene progressivamente maggiore di quella assorbita per la formazione di nuove superfici.

$$\delta W = \frac{\sigma^2 \pi c}{2E} \phi = G_c \phi$$

$$\sigma^2 \pi c = K_{Ic}^2$$

$$\frac{K_{Ic}^2}{2E} = G_c$$

Prof. M. Lombardi - SIM - Cap 4

non c'è il 2 se la cricca è centrale; per 2E e non c

**RELAZIONE TRA MODULO ELASTICO E TENACITÀ**

$$K_{Ic} = \sqrt{EG_c}$$

Materiale

$$K_{Ic} = \sigma^* \sqrt{\pi c}$$

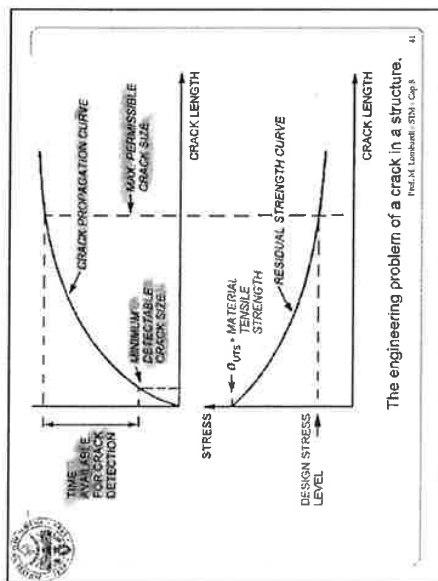
Componente

Prof. M. Lombardi - SIM - Cap 4

uso questa così dimensiono il modello in tutte le condizioni

- l'aumento di lunghezza della cricca richiede energia
- l'aumento di lunghezza della cricca libera complessivamente energia -> rilascio di E elastica data dalla rottura dei legami

14/11/2014



21



19/11/2014

**Cap. 9 – Carichi ciclici: la fatica nei materiali**

Prof. P. Ferro - STN - Cap. 9

BASSO  $\eta$ : ~~metalli~~, vetri, ceramiche  
 ALTO  $\eta$ : polimeri, elastomeri, schiume

Lo stile quando si vogliono attenuare le vibrazioni

FATICA A BASSI CICLI: il materiale sopravvive solo per un n° di cicli basso, ma con sollecitazioni tali che  $\sigma > \sigma_y$  (limite elastico)

FATICA AD ALTI CICLI: il materiale sopravvive ad un alto n° di cicli ma con sollecitazioni tali che  $\sigma < \sigma_y$

19/11/2014

**Nessun materiale è così perfetto da restituire completamente l'energia elastica immagazzinata, al momento in cui il carico è rimosso.**


Anche quando l'ampiezza dei cicli – carico/scarico; inversione del segno del carico (trazione/compressione) – è assai contenuta, si osserva dissipazione di energia (smorzamento).

Prof. P. Ferro - STN - Cap. 9

→ un po' di energia elastica viene sempre persa e questa differenza è l'energia del materiale

**Carichi ciclici e fatica**

Sollecitazioni cicliche → riduzione progressiva delle prestazioni del materiale fino a rottura



Quando i materiali non operano sotto carichi statici, ma ripetitivi, ciclici → dell'energia viene dissipata e questo porta a danneggiamento ed in seguito a rottura.

Prof. P. Ferro - STN - Cap. 9

**Il coefficiente di smorzamento (o di perdita)  $\eta$  misura la dissipazione di energia (cioè la frazione di energia elastica immagazzinata che non viene restituita quando si rimuove la sollecitazione).**

Ciclo dopo ciclo, questo lento accumulo porta alla **comparsa di una fessura**, poi alla sua crescita fino alla propagazione improvvisa.

Prof. P. Ferro - STN - Cap. 9

in presenza di difetti la  $\sigma$  applicata è molto superiore a quella teorica: il materiale si rompe con più facilità (in questa zona, infatti, si sommano le sollecitazioni all'estremo con quelle dovute alla presenza della cricca in quanto quest'ultima inizia ad espandersi)

Elasticità <  
 Accumulata  
 (il materiale immagazzina energia)

1

2

19/11/2014

**Il problema della fatica**

Fig. 1.4 - Schematizzazione della sollecitazione ciclica variabile nel tempo. Quando il cedimento si verifica, il cedimento è permanente. ISBN 978-88-08-18126-8 © CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materials

Circa l'80% delle rotture di componenti metallici è dovuta a fenomeni di fatica

Prof. P. Paoletti - Politecnico di Torino

**O = FATICA A BASSO NUMERO DI CICLI**: si sollecita il materiale con una  $\sigma$  intermedia tra  $\sigma_e$  e  $\sigma_r$  e la rottura è rappresentata dalle curve "C".

**Fatica ad alti e a bassi cicli**

Fig. 1.1 - Carichi ciclici (a) Vibrazione sinusoidale a frequenza costante, (b) Fatica per numero elevato di cicli: carichi ciclici ben inferiori al limite elastico, (c) Fatica per basso numero di cicli: carichi ciclici superiori al limite elastico (ma inferiori alla resistenza a trazione,  $\sigma_u$ ). ISBN 978-88-08-18126-8 © CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materials

5

19/11/2014

Da un punto di vista ingegneristico è più rilevante la fatica ad alto numero di cicli, in quanto comunemente le strutture, i componenti vengono fatti lavorare in campo elastico, a valori di stress inferiori a  $\sigma_y$ .

Tuttavia, ... sebbene  $\sigma < \sigma_y$ , si possono produrre danneggiamenti che si propagano fino a rottura.

Prof. P. Paoletti - Politecnico di Torino

① in assenza di difetti il tempo di resistenza a fatica è direttamente proporzionale a quello di formazione del primo difetto

② tempo di vita del materiale legato al tempo di propagazione del difetto e della cricca.

$\sigma = \sigma_0 + \text{energia nella cricca}$   
in quanto sulle cricca si vanno a generare ulteriori danneggiamenti che amplificano la  $\sigma$

fenomeno autocodimentante in cui il materiale incrementa la sua debolezza

la rottura dipende anche dal n° di cicli, quindi se molti elevati anche una  $\sigma$  piccola può fare la differenza

**Due approcci**

**Caso di componenti non danneggiati (non esistono fessure pre-esistenti)**  
→ gran parte della vita a fatica consumata nel generare la fessura (fatica controllata dall'innescio).

**Caso di componenti già danneggiati (esistono fessure pre-esistenti)**  
→ fatica controllata dalla propagazione di cricca (approccio applicato anche a componenti ad alto rischio)

Prof. P. Paoletti - Politecnico di Torino

$\Delta\sigma$  = intervallo da picco a picco entro il quale la sollecitazione varia

quindi un'ampiezza viene sollecitata con un'oscillazione  $\frac{\Delta\sigma}{2}$

$\sigma_a = \frac{\Delta\sigma}{2}$  = ampiezza dell'oscillazione

la fissura dipende dalle velocità e cui essa stessa si accresce

6