



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1596A -

ANNO: 2015

# **A P P U N T I**

STUDENTE: Samake

MATERIA: Scienza e Tecnologia dei Materiali. Prof.Lombardo

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.**

29/09/2014

Un Materiale è tutto ciò che vediamo.



Un Materiale è qualunque solido con una determinata funzione di vario tipo - Qualunque cosa ci circondi è fatto di materiale con le relative funzioni.

Si fa che più materia si possono svolgere la medesima funzione. Tuttavia se sceglie uno più presto che un'altro per i vantaggi gli svantaggi che può presentare il materiale.

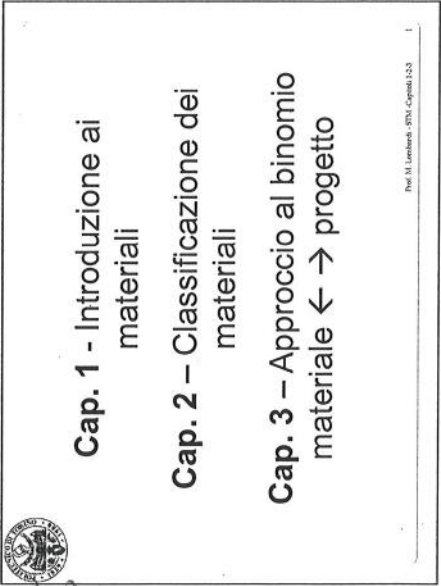
Quindi le funzioni sono le guide alle applicazioni. Può anche dipendere dall'estetica.



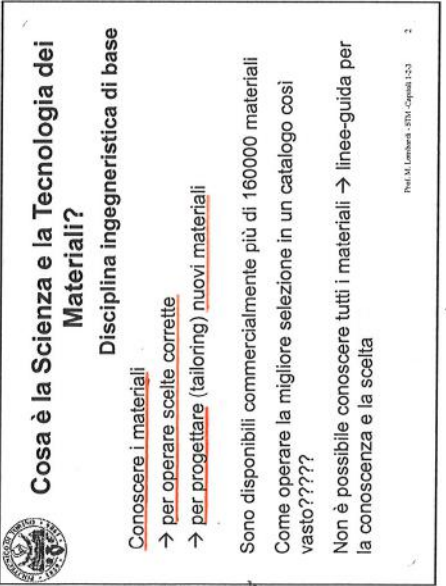
2

29/09/2014

Esame solo prova scritta, min 18, media pesata PC 216. Lo scopo di questo corso è quello di dare una base sulla conoscenza di un materiale per saperlo scegliere opportunamente o per cercarne di nuovi.



I vari materiali si riferiscono



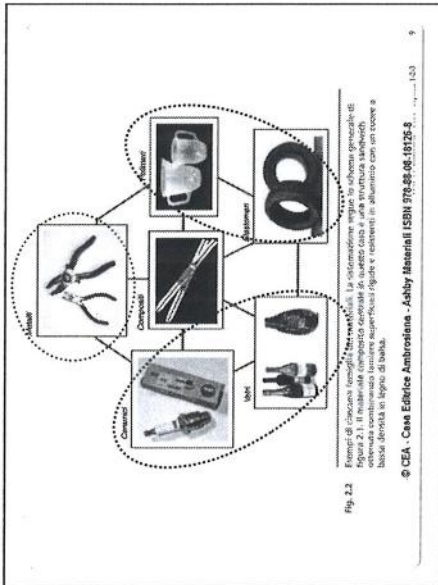
Vedremo come selezionare o progettare un materiale a seconda della chimica e della struttura. Devo sapere come si comporta un materiale.

1

29/09/2014

29/09/2014

Studieremo le caratteristiche dei vari materiali e cosa determina queste caratteristiche.



Qualunque oggetto è costituito da materiali trattati con diversi procedimenti e passaggi.

### 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 - STN - Capelli 1.2.3

Stampaggio Polveri Speciali  
Colata Deformazione Compositi

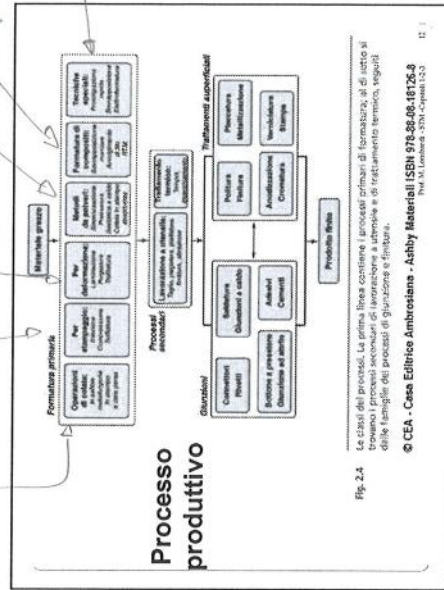
### Materiali e Processi

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 - STN - Capelli 1.2.3





29/09/2014

## Riprogettare

Pensiamo alla custodia in plastica dei CD. Questo dovrà essere trasparente per vedere il contenuto e dovrà tenere il CD fermo.

Allora come posso farlo, in che materiale?

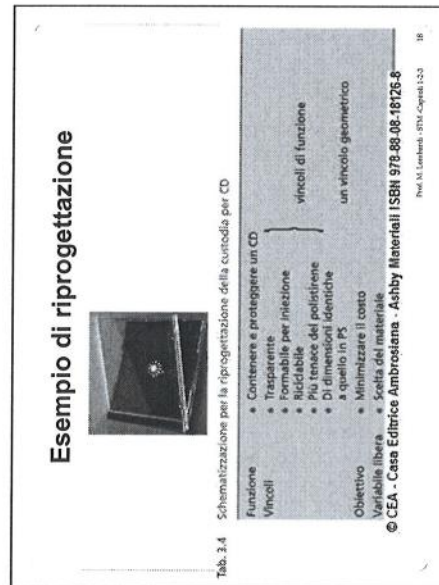
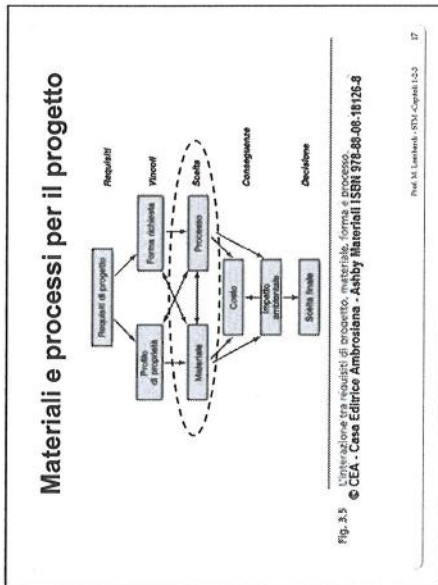
Potrei farlo in ceramico ma sarebbe fragile mentre il ferro troppo pesante ed entrambi non trasparenti.

Questa verrà quindi fatta in Polimero con lo stesso comportamento a rottura di un ceramico. Non potrò farlo flessibile perché si romperebbe il CD.

A questo punto si potrà ottimizzare il costo di produzione con un'opportuna scelta del materiale.

"Le caratteristiche non cambiano, possono essere cambiate."

Studieremo solo come avviene la scelta del materiale



30/09/2014

Il rapporto ste  
chiometrico  
tra atomi di  
metallo e non  
metallo è  
fisso.

**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, calce...
- Vetri (a base silice: vetri da bottiglie, da finestra, cristalli, vetri Pyrex @...)
- Ceramiche ingegneristiche (o avanzate) o di alta tecnologia: ossidi, carburi, nitru, boruri, ...)

Prof. M. Lombardi - STM - Capitolo 1.3.3

I materiali ceramici sono formati da metallo + Non metallo e possono essere classificati secondo la presenza o meno di ossigeno e silicio ①, ②, ③.

**Ceramics: Materiali inorganici non metallici**

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

Prof. M. Lombardi - STM - Capitolo 1.3.3

Il Diamante e la Grafite non sono veri e propri ceramici perché non sono composti di due elementi, ma vengono collocati nei ceramici per le caratteristiche affini.

30/09/2014

**Metalli: materiali inorganici metallici**

• Opachi (cioè non trasparenti alla luce visibile), ma lucidi.

• Ottimi conduttori di elettricità e calore

• Elevate resistenze meccaniche, pur essendo duttili, cioè deformabili plasticamente (cioè in modo irreversibile, permanente, prima di rompersi: sono duttili).

• Temperature di fusione assai variabili ( $Al = 660^\circ C$ ;  $Ti = 1660^\circ C$ ;  $W = 3420^\circ C$ )

• Medio-alta densità ( $Mg = 1,75 g/cm^3$ ;  $Al = 2,7 g/cm^3$ ;  $Ti = 4,5 g/cm^3$  (metalli e leghe LEGGERE);  $Fe = 7,8 g/cm^3$ ;  $Cu = 8,9 g/cm^3$ ;  $W = 19,3 g/cm^3$ )

• Si corrodono facilmente (corrosione del Fe: formazione di ruggine)

• Formatura prevalentemente da fuso

Prof. M. Lombardi - STM - Capitolo 1.3.3

La deformazione plastica si mantiene nel tempo.

La fusione non è sempre la cosa più conveniente. Il processo di creazione e funzione dello scopo o del metallo usato (Al 6000, 3000, 8) - Allora bisogna trovare tecniche di formazioni diverse dalla fusione o altri elementi cambiare metallo.

**Metalli: materiali inorganici metallici**



30/09/2014

### Riciclo a fine vita

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

PETE HDPE V LDPE PP PS  
 PVC CA ACC AL

Prof. M. Lombardi - ITC - Capitoli 1-2-3

vengono creati per migliorare le caratteristiche di ciascuna dei componenti. Il materiale in maggior parte centrale è detto **matrice** mentre quello aggiunto è il **Rinforzo**.

30/09/2014

Le macromolecole sono organizzate fra loro, ciò che cambia è la disposizione, più o meno ordinata, nel materiale.

### Le classi di Polimeri

TP Elast TI TI

Fig. 4-18. Tra le quattro immagini sono in alto da sinistra a destra: un polimero a struttura amorfa, una matrice amorfa e un polimero a struttura cristallina. In basso da sinistra a destra: un polimero a struttura cristallina e un polimero a struttura amorfa. Le immagini sono state riprese con un microscopio elettronico a scansione (SEM) e mostrano la disposizione delle macromolecole nel materiale.

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Autry Marzulli ISBN 878-08-16728-8  
 Prof. M. Lombardi - ITC - Capitoli 1-2-3

Sono miscelate in determinate condizioni e per centuali di materiali di stesse famiglie o differenti. Questi materiali hanno scarsa resistenza meccanica.

### Materie plastiche - Polimeri

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

Prof. M. Lombardi - ITC - Capitoli 1-2-3

### Compositi

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

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

→ Matrice  
 → Rinforzo

Prof. M. Lombardi - ITC - Capitoli 1-2-3

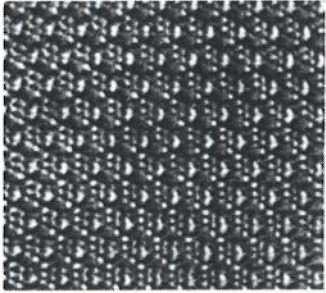
Iniziamo da caratteristiche fondamentali

30/09/2014

Cap. 4 - Densità e modulo elastico

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

Il modello di Bohr Sfere rigide



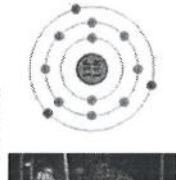
PROF. M. Lombardi - STM - Cap. 4 - Parte A

Quando due atomi si avvicinano a una certa distanza inizieranno a sentire l'uno l'effetto della presenza dell'altro e viceversa. Nasce quindi una Forza Attrattiva che li fa avvicinare.

Se però questi si avvicinano troppo nascerà una Forza Repulsiva che li respingerà. A questa Forza è poi legata un'Energia.

La risposta meccanica dei materiali ovvero ... perché i miei piedi non sprofondano nel pavimento?

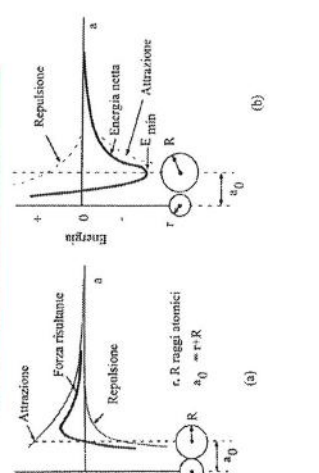
Materia  $\leftrightarrow$  Energia  $\rightarrow$  Legami chimici



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

Parlare di materiali significa parlare di materia ed energia ovvero di legami ed energie di legame atomico

Curva di Condon-Morse



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

Forza al quale corrisponde l'Energia Minore, Stabilizzata. Queste condizioni si hanno per una certa distanza detta distanza di legame.



I legami chimici possono essere di varia natura e stabilità

il tipo di legame o fornisce le caratteristiche al materiale.

**A livello atomico/molecolare**  
Le forze, l'energia che tengono uniti atomi e molecole nei materiali → i LEGAMI chimici

**Legami FORTI**  
→ Covalente  
→ Ionico  
→ Metallico

**Legami DEBOLI**  
→ dipoli  
→ Van der Waals

PROF. M. Lombardi - STM - Csp.4 - Pavia A

Il legame metallico è costituito da ioni  $\oplus$  ordinati immersi in un mare di elettroni di valenza in condivisione

**Legame metallico (METALLI)**  
Atomi → ioni (ex: Al → Al<sup>3+</sup>)

Elettroni liberi → nube

Elettrostatico → ADIREZIONALE  
Energeticamente forte

PROF. M. Lombardi - STM - Csp.4 - Pavia A

**Legame metallico → METALLI**

Energeticamente forte  
→ Medio-alta Rigidità  
→ Medio-alta Resistenza a rottura  
→ Medio-alta Temperatura di fusione  
→ Bassa Dilatazione termica

**Adirezionale**  
→ Duttilità  
**Elettroni liberi**  
→ Ottimo conduttore termico  
→ Ottimo conduttore elettrico

PROF. M. Lombardi - STM - Csp.4 - Pavia A

**Legame covalente - prevalente su ionico (CERAMICI)**

Condivisione elettroni → Elettroni non liberi

Direzioni definite → DIREZIONALE  
Energeticamente molto forte

PROF. M. Lombardi - STM - Csp.4 - Pavia A

Nel legame covalente, i tipi = coes ceramiche, si condividono gli elettroni di valenza e questo dà vita a un legame forte e direzionale.

Questo dà al legame una forza rilevante e l'assenza di legami (isolante)

30/09/2014  
 La Rigidezza è una di quelle proprietà spiegabili grazie al tipo di legame e quindi con la curva.

Fig. 4.19 Gli atomi nei cristalli e nei liquidi sono uniti dai legami interatomici che si comportano come molla. La rigidezza del legame è  $k$ . Per la legge di Hooke, la forza necessaria per allungare il legame di una distanza  $\Delta L$  è  $F = k \Delta L$ . La distanza interatomica di equilibrio (forza risultante) si trova in corrispondenza della pendenza di energia.

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materials ISBN 978-88-08-18172-3

Legame chimico → CURVE DI CONDON - MORSE  
 → RIGIDEZZA

PROF. M. Lombardi - STM - Cap. 4 - Para. A. 17

la caratteristica di un materiale è in realtà una risposta del materiale a un certo tipo di sollecitazione che può avvenire come un fornire energia. Citazione - Se la sollecitazione è di tipo meccanico, questo si deformerà elasticamente e reversibilmente se a fine sollecitazione tornerà allo stato iniziale, plasticamente e irreversibilmente se la deformazione permane anche se toglie la sollecitazione. La deformazione elastica è comune a tutti i materiali mentre solo alcuni si deformano plasticamente.

**Risposta meccanica dei materiali**

Materia concentrata in piccole regioni → ruolo della Energia → principio di azione-reazione

Materiali resistenti a sollecitazioni esterne DEFORMANDOSI

2 tipi di deformazioni possibili:  
 reversibili, recuperabili appena lo stress esterno si annulla → deformazione ELASTICA  
 irreversibili, non più recuperabili anche se lo stress esterno si annulla → deformazione PLASTICA

PROF. M. Lombardi - STM - Cap. 4 - Para. A. 18

30/09/2014  
 Il Materiale Fragile compie solo deformazione elastica prima della rottura.  
 Il Materiale Duttile compie deformazione elastica seguita da una plastica prima della rottura.

**Risposta meccanica dei materiali**

Tutti i materiali presentano deformazione elastica, ma... 2 diversi comportamenti:

- solo deformazioni elastiche fino a rottura → materiali FRAGILI (come i ceramici)
- deformazioni sia elastiche che plastiche prima di rompersi → materiali DUTTILI (come la gran parte dei metalli)

PROF. M. Lombardi - STM - Cap. 4 - Para. A. 19

Differenza tra "fragile" e "brittle" che in italiano traduciamo con la stessa parola: fragile

"Fragile": materiale che si rompe sotto azioni (sollecitazioni, stress, sforzi) esterne contenute → materiale poco resistente

"Brittle": materiale che si rompe avendo sperimentato solo deformazioni elastiche, reversibili (fragile come un ceramico).

Non necessariamente un materiale "brittle" è anche "fragile"

PROF. M. Lombardi - STM - Cap. 4 - Para. A. 20

Occhio all'ottimismo di "fragile" nel linguaggio comune. "Fragile" in STM significa esclusivamente che fa solo def. elastica.

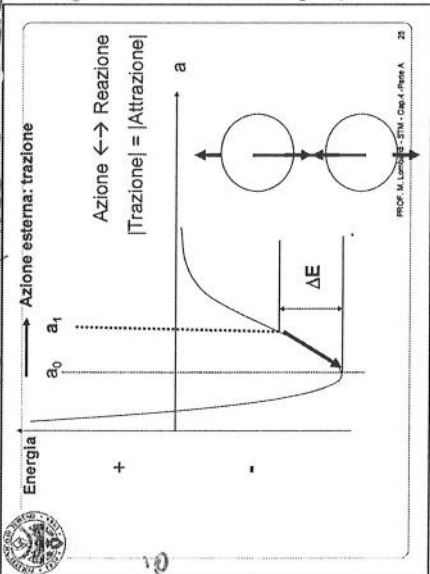


30/09/2014

Quindi andò a vedere la curva di Condor-Morse mi sposta da  $a_0$  ad  $a_1$  fornendo  $\Delta E$ .

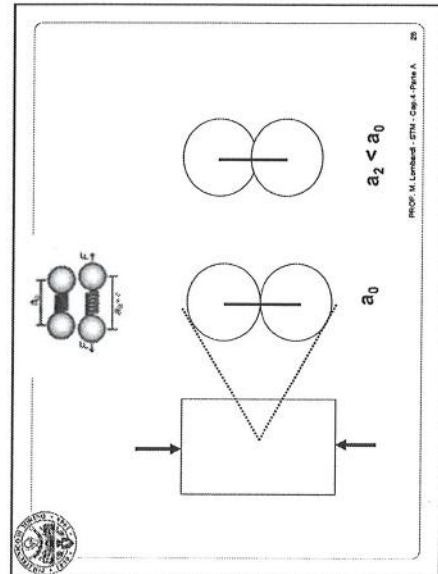
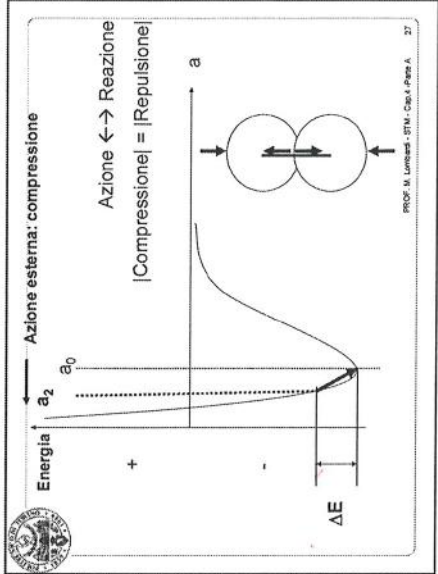
Se avessi fornito una  $\Delta E$  troppo grande gli atomi sarebbero a distanza infinita cioè avrei rotto il legame e quindi il materiale.

Rimanendo però nel campo di piccoli  $\Delta E$  si può dire, una volta cessata la sollecitazione il materiale è una Deformazione Elastica.

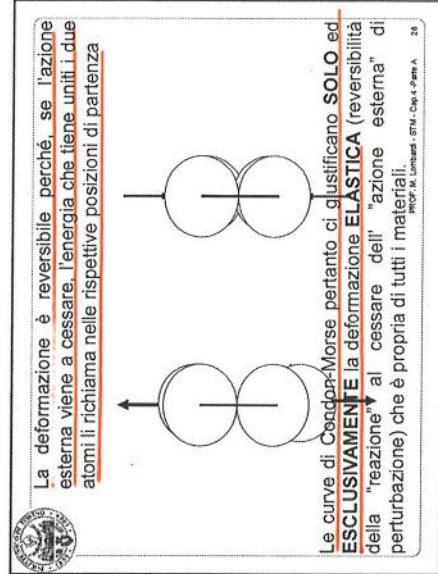


vicale tendeva a tornare nella posizione di minima energia cioè alla distanza  $a_0$  ovvero alla condizione iniziale. Quindi questa

Deformazione Elastica



Analogo a prima ma  $a_2 < a_0$  e mi sposta a sx sulla curva. È sempre elastica ma è COMPRESSIONE



La deformazione è reversibile perché, se l'azione esterna viene a cessare, l'energia che tiene uniti i due atomi li richiama nelle rispettive posizioni di partenza. Le curve di Condor-Morse pertanto ci giustificano SOLO ed ESCLUSIVAMENTE la deformazione ELASTICA (reversibilità della "reazione" al cessare dell'"azione esterna" di perturbazione) che è propria di tutti i materiali.

Essendo la deformazione elastica legata al legame, tutti i materiali hanno def elastica perché tutti hanno legami

30/09/2014

Per valutare l'allungamento invece uso

DEFORMAZIONE  $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$

**Sollecitazione e Deformazione**

Sollecitazione: a trazione  $\sigma = F/A$  Unità di misura MPa

Deformazione: STRAIN  $\epsilon = \Delta L/L_0$  L [m]  $\epsilon \rightarrow$  adimensionale

**Legge di HOOKE**

$\sigma = E \epsilon$

**E = Modulo elastico, Modulo di Young [N/m<sup>2</sup>, Pa]  $\rightarrow$  [GPa]**

PROF. M. Lombardi - STU - Cof. 4 - Para. A - 20

Posso definire la legge di Hooke chiave per il campo elastico

Robert Hooke (1635-1703): Fisico e naturalista britannico

Nel 1679 pubblicò il saggio "De potentia restitutiva of a spring":

Ogni solido si deforma (accorciandosi o allungandosi quando sollecitato) e la deformazione si annulla se si rimuove la sollecitazione

E' questa deformazione (**tensio**) che consente al solido di sviluppare l'azione opposta (**vis**) alla sollecitazione

"Ut tensio, sic vis"

PROF. M. Lombardi - STU - Cof. 4 - Para. A - 24

$\sigma = E \cdot \epsilon$

30/09/2014

$E$  e  $\epsilon$  sono proporzionali attraverso il modulo elastico di Young  $E$ . Posso quindi tracciare la **curva sforzo-deformazione** che nel campo elastico è una retta con pendenza  $E$ .

**Il modulo elastico E**

$\rightarrow$  Quantifica la RIGIDEZZA del materiale

Resistenza al cambiamento di forma del materiale sotto sollecitazione, che si manifesta elasticamente, cioè il materiale riacquista dimensioni e forma di partenza quando la sollecitazione viene rimossa.

Deformazione elastica

Pendenza  $E$

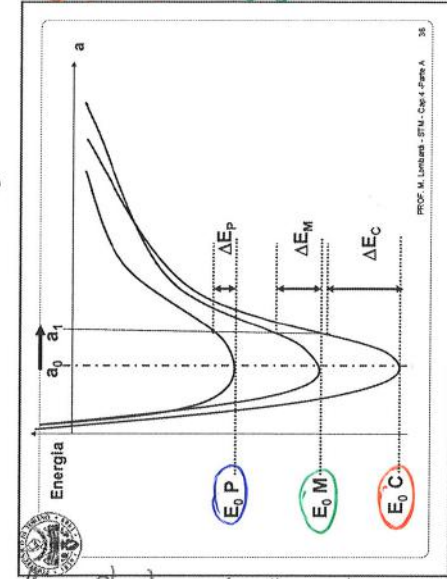
$\sigma = E \epsilon$

$E =$  Modulo di Young

PROF. M. Lombardi - STU - Cof. 4 - Para. A - 35

La curva dimostra la deformazione elastica ma non la giustizia Pica-

legami differenti si comportano in modo differente a parità di sollecitazione. La sollecitazione equivale a fornire energia che è mostrata



sol grafico se toglgo la sollecitazione torna a  $E_0$  e la differenza fra i vari materiali sta nell'energia di legame e quindi nell'energia x spostamento

Questi grafici indicano quanto  $E$  deve fornire per portare  $a_0$  a  $a_1$ . I tre materiali rispondono a  $E$  in modo diverso. Posso anche pensarli a parità di  $E$  che di fanno  $a_0 > a_1 > a_2$ . Quindi per una  $x$  minima a una sollecitazione usata ceramici mentre se voglio una certa sollecitazione vado a cercare quello che mi serve.



30/09/2014

occurio al  
cambio di  
segno

**Compressione uniassiale**

Sollecitazione a compressione uniassiale

$$\sigma = - F/A$$

Deformazione

$$\varepsilon = \Delta L/L_0$$

$$\Delta L = L - L_0 \text{ (NEGATIVO)}$$

PROF. LOMBARDO - STM - Cap.4 - Para.8

PROF. LOMBARDO - STM - Cap.4 - Para.8

30/09/2014

Cap. 4 – Densità e modulo elastico

26

PROF. LOMBARDO - STM - Cap.4 - Para.8

**Trazione uniassiale**

Sollecitazione a trazione uniassiale

$$\sigma = F/A$$

Deformazione

$$\varepsilon = \Delta L/L_0$$

$$\Delta L = L - L_0 \text{ (positivo)}$$

PROF. LOMBARDO - STM - Cap.4 - Para.8

30/09/2014

**Le costanti elastiche**  
Trazione/compressione uniaxiale  
 $\sigma = E \epsilon$

PROF. LOMBARDO - STM - Corsi - Parte B 11

Come per la sollecitazione normale anche per il Taglio  $\tau$  è proporzionale alla forza SFORZO TANGENZIALE  $\tau$  / DEFORMAZIONE A TAGLIO  $\gamma$

$\tau = G \gamma$

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$

**Le costanti elastiche**  
Sollecitazione di taglio  $\tau = F // A$   
Deformazione di taglio  $\rightarrow \tan \gamma = w/L_0 \approx \gamma$

PROF. LOMBARDO - STM - Corsi - Parte B 12

$\gamma$  sarebbe  $\tan \gamma = \frac{w}{L_0}$  ma per piccole def  $\tan \gamma \approx \gamma$   
G, come  $E$ , è una Costante Elastica.

6

Posso avere sollecitazione non normale ma la tangenziale  $\Rightarrow$  Taglio

**Sollecitazione di taglio  $\tau$**

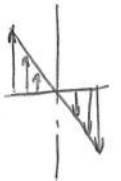
PROF. LOMBARDO - STM - Corsi - Parte B 9

**Fig. 5-1. (b) Sollecitazione a flessione**

PROF. LOMBARDO - STM - Corsi - Parte B 10

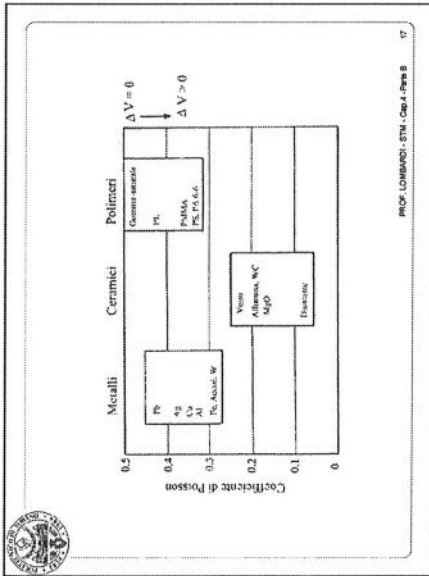
Sollecitazione mista fra trazione e compressione. Al centro la sollecitazione è nulla. ~~La~~ la sollecitazione ha andamento lineare

Flessione

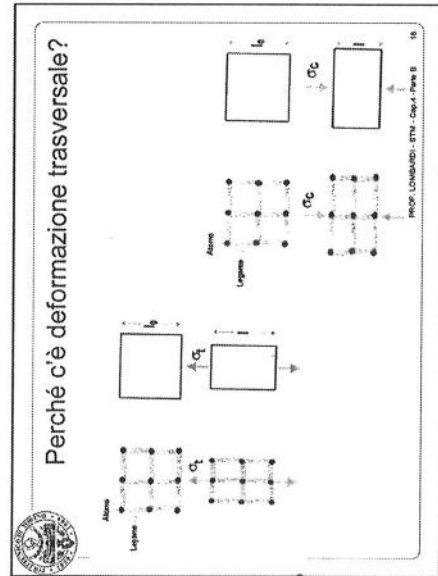


30/09/2014

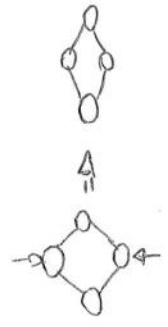
se  $\nu = 0,5$  allora  $E_y = E_x$  ma  $\Delta V$  materiale  
 Ra  $\nu < 0,5$ , quindi varia il volume con una  $\sigma$   
 Esistono materiali sperimentali con  $\nu > 0,5$  o  
 $\nu < 0$



Studiando il materiale microscopicamente  
 si trova la spiegazione a questo comporta-  
 mento.



Deformando  
 il materiale  
 modifichiamo le  
 distanze di  
 legame



Relazione tra le costanti elastiche

G = Modulo di taglio

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

K = Modulo di elasticità cubica

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)}$$







Le strutture reticolari sono fatte di atomi, 30/09/2014  
 questi occupano il max volume possibile ma non tutto il volume => FATTORE DI IMPACCUETTAM  
quanto di tutto il volume è occupato in %

**Fattore di impaccamento atomico F.I.A.**  
 Volume effettivamente occupato da atomi della cella

Volume della cella

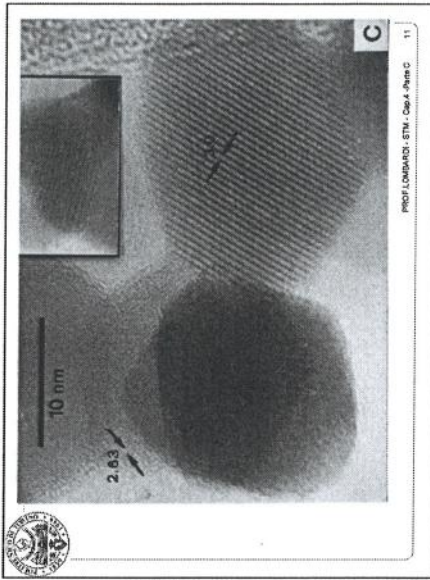
**OCC = 0,68** (68% di occupazione del volume della cella;  
 32% di vuoti, cavità, detti INTERSTIZI)

**CFC = 0,74** (74% di occupazione del volume della cella;  
 26% di vuoti, cavità, detti INTERSTIZI)

**EC = 0,74** (74% di occupazione del volume della cella;  
 26% di vuoti, cavità, detti INTERSTIZI)

PROF. LONARDI - STM - Cap. 4 - P. 11 C

30/09/2014  
 Osservazione al microscopio dei piani atomici -



I vami reticoli sono quelli in cui un metallo  
 solidifica cristallizza - Ma un metallo non  
 cristallizza tutto allo stesso modo.

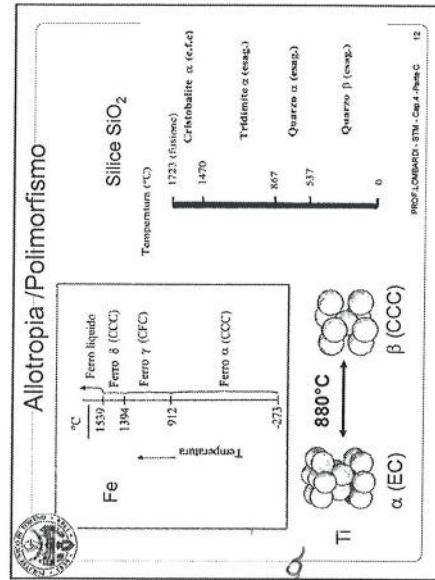
Il ferro per esempio as  
 sono due  
 configuraz  
 in funzione  
 della Temp.

Il variare della  
 struttura in  
 funz di T è  
**Allotropia o  
 Polimorfismo**

**I PIANI ATOMICI**

10 nm

PROF. LONARDI - STM - Cap. 4 - P. 10 C



Vale per  
 tutti i metalli  
 cristallini.

30/09/2014

Nei materiali compositi la struttura dei componenti è posta nella matrice che può essere particellare o fibrosa, unidirezionale o multi-direzionale.

**Il modulo elastico dei compositi**  
**Caso dei compositi a fibre continue unidirezionali**

Fig. 4.21 La modificazione del modulo attraverso la produzione di compositi, inidolati fibre rigide o partecelle in una matrice a ridotta rigidità

PROF. LOMBARDI - STM - Cap. 4 - Para. C 19

Per prevedere la curva tensile del composito si sommano le curve tensile di matrice e rinforzo, moltiplicate per le relative frazioni in volume.

**La REGOLA della MISCELA**

Frazione in volume della matrice  $f_m = \frac{V_m}{V_m + V_f}$

Frazione in volume delle fibre  $f_f = \frac{V_f}{V_m + V_f}$

Proprietà Composito  $P_c = f_f P_f + f_m P_m = f_f P_f + (1-f_f) P_m$

Densità Composito  $\rho_c = f_f \rho_f + f_m \rho_m = f_f \rho_f + (1-f_f) \rho_m$

PROF. LOMBARDI - STM - Cap. 4 - Para. C 20

10

30/09/2014

La densità, da finita da PA e FIA, è un proprietà in cui se non in senso di un sistema variabile se non in senso di un sistema dove ho a pari volume minore massa

**Proprietà INTRINSECHE e Proprietà ESTRINSECHE**  
**Modulo Elastico**  
**Densità**

**Proprietà INTRINSECHE:** dipendono da proprietà atomiche (PA, impaccamento, energia di legame) → difficilmente modificabili  
 → compositi, schiume

**Proprietà ESTRINSECHE:** dipendono da microstruttura (scala microscopica) → controllabili

PROF. LOMBARDI - STM - Cap. 4 - Para. C 17

Le proprietà estrinseche, come si dispone il materiale al livello microscopico sono invece facilmente modificabili.

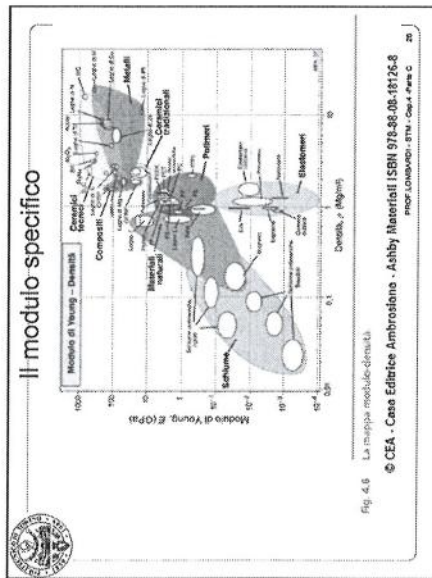
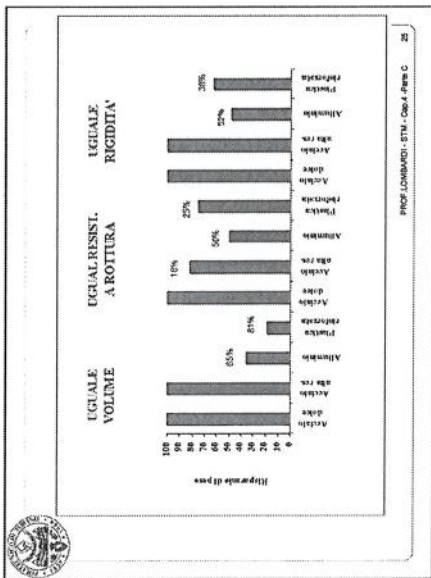
**Come modificare MODULO ELASTICO e DENSITA'?**

PROF. LOMBARDI - STM - Cap. 4 - Para. C 18

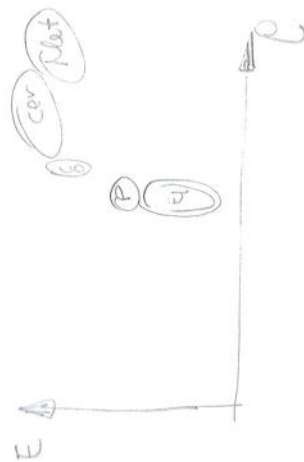
Posso quindi modificare  $\rho$  o E creando materiali compositi o porosi. Nei porosi è possibile bloccare le bolle di gas all'interno di un polimero prima che solidificano.

9

30/09/2014



Per usare questo grafico traccio una  
retta a seconda della E e ρ voluti e uso  
i materiali sopra.



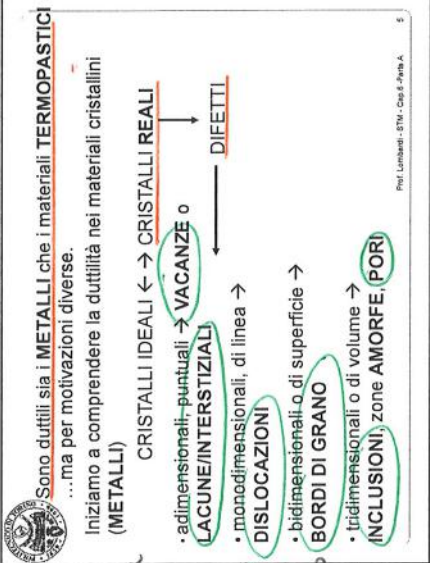


20/10/2014

I materiali duttili invece, dopo il limite elastico continuano a deformarsi ma in reversibilmente quindi Deformazione Plastica

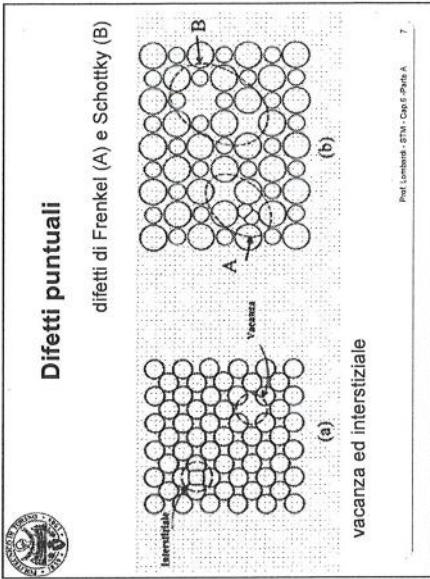
20/10/2014

Questo nei metalli è giustificato dalla presenza di Difetti

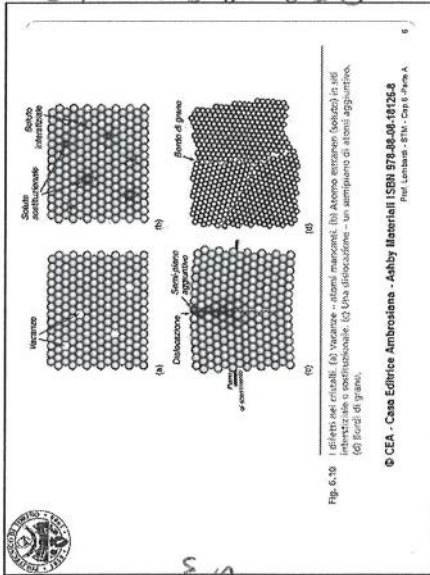


però non c'è la posizione costante in plica una variazione del reticolo locale, ma mancando l'atomo, gli atomi attorno al buco tendono ad avvicinarsi, cercando la stabilità.

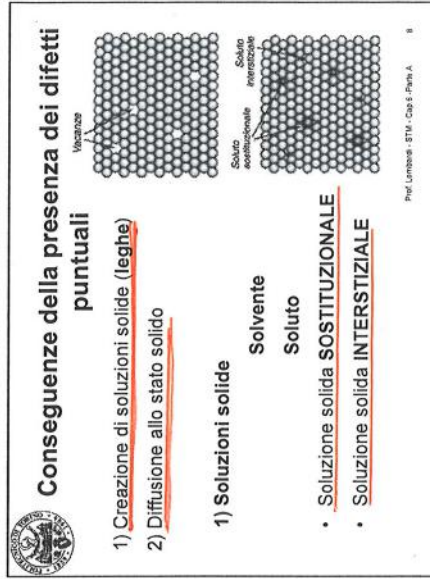
Senza però rompere il con legame. Sono quindi in trazione. Sostituzionale: un atomo diverso si mette al posto di quello che dovrebbe essere. Ma l'atomo può avere stesso diametro o diametro minore (i 4 attorno tendono ad avvicinarsi e va in trazione) o diametro maggiore (i 4 attorno si allargano). Interstiziale: in un reticolo, tra un atomo e l'altro si infila un altro atomo diverso allora più Vacanza + Atomo interstiziale; Frenkel - Per bilanciare posso invece perdere un  $\ominus$ : Schottky  $\oplus$



I difetti puntuali sono fondamentali per la creazione di leghe e giustificano la diffusione allo stato solido.



Con i solidi Ionici posso avere difetti di combinazione di difetti per bilanciare neutro. Se ho vacanza cationica devo mettere un anione interstiziale.



4



Questo fenomeno è sfruttato nella carbonizzazione degli Acciai dove Po Reticolo di Fe e atomi di C interstiziali.

20/10/2014

**Alcune conseguenze della diffusione allo stato solido**

Alcune di carbonio  
Reticolo del ferro

Cementazione (carburazione) degli acciai

Densificazione (sinterizzazione) dei ceramici

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

La Diffusione allo stato solido avviene a causa dei moti vibrazionali degli atomi e a causa del fatto che se due sono in contatto, le concentrazioni tendono a uniformarsi: equi libio - Questo è dovuto a un gradiente di concentrazione con il passare del tempo il gradiente tende a zero e lo raggiungiamo all'equilibrio

20/10/2014

Questo è dovuto a un gradiente di concentrazione con il passare del tempo il gradiente tende a zero e lo raggiungiamo all'equilibrio

**La diffusione allo stato solido**

Gradiente di concentrazione  
→ Driving force del fenomeno

Alcune A Alcune B

Concentrazione relativa di A

Dimensione x

Fig. 13.10 La diffusione in presenza di un gradiente di concentrazione.

Pagine 284 e segg. Fig. 13.11 Intermiscelazione per diffusione.

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

La legge di Fick regola la diffusione.

**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

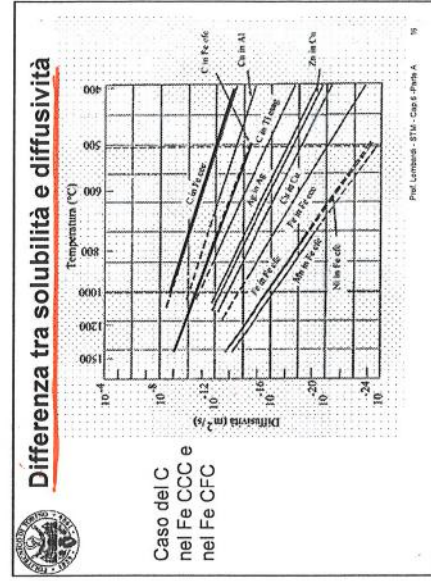
$$D = D_0 e^{-\frac{Q}{RT}}$$

$D_0$  = energia di attivazione del moto atomico (dei difetti, vacanze o interstiziali)

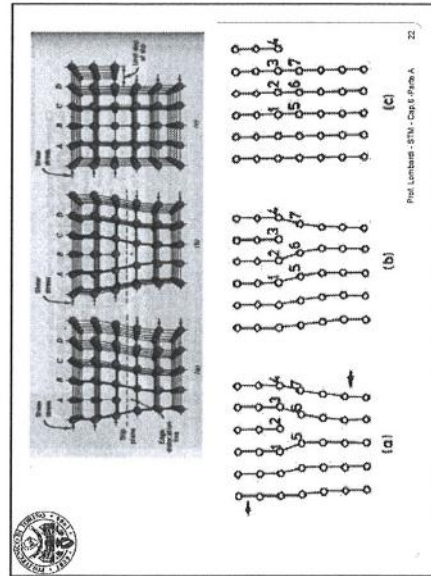
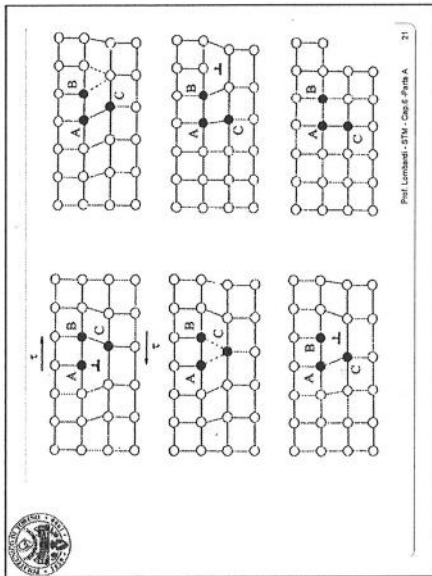
Prof. Lombardi - STM - Cap. 6 - Parte A

Per diffusivi si muovono anche le vacanze e i sostituzionali e gli interstiziali

$$D = f(T)$$



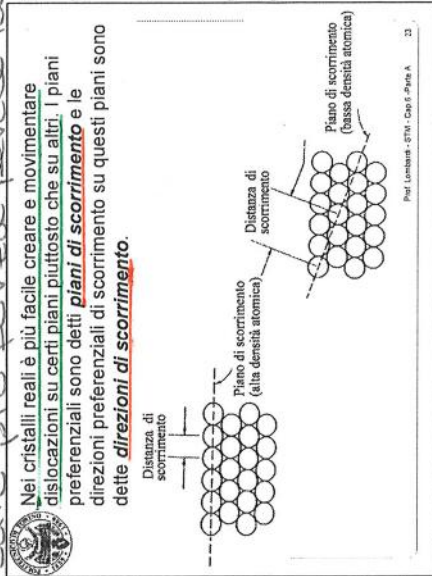
Con una debole sollecitazione a taglio è possibile muovere le dislocazioni poiché per rompere e creare legami si sfrutta il fatto che questi sono già tesi e compressi.



Il meccanismo dello scorrimento avviene in particolare sotto alcune condizioni: la distanza di scorrimento deve essere piccolissima. Quindi un piano ad alto compatimento è più favorevole al moto delle dislocazioni.

Nelle direzioni con minor densità di impaccamento dovrò applicare più forza perché i disli deve fare un salto maggiore.

Più è piccola la distanza, meno energia è richiesta.



Struttura cristallina di scorrimento	Piani e direzioni di scorrimento	Geometria	Esempi
cc	$(110) \langle 111 \rangle$	$6 \times 2 = 12$	Mo, W, Fe $\alpha$
cfc	$(111) \langle 110 \rangle$	$4 \times 3 = 12$	Al, Cu, Ni, Fe $\gamma$
esagonale compatto	$\{0001\} \langle 1120 \rangle$	$1 \times 3 = 3$	Cd, Mg, Zn, Ti $\alpha$

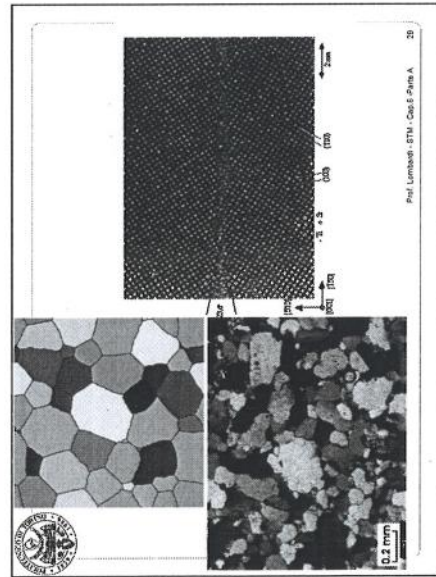
Prof. Lombardi - STM - Cap. 8 - Para. A - 24

Numero dei sistemi di scorrimento di ccc, cfc e ec.



20/10/2014

Precipitati si vanno depositare sul bordo di grano influenzando le caratteristiche.



Immagini al microscopio per il bordo di grano.

**I difetti tridimensionali**  
**I precipitati di una seconda fase**

Esempio → Leghe di Alluminio  
Leghe Al-Cu : DURALLUMINIO  
S.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)

soluzione solida α saturata precipitati θ  
soluzione solida α saturata precipitati θ

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

si formano con soluzioni solide.

16

Porosità: questo di fatto 3D influenza il modo elastico perché la materia è resistente alla sollecitazione.

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

La porosità

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

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

**I difetti tridimensionali**  
**I precipitati di una seconda fase**

solvente precipitato θ' precipitato θ  
coerente incoerente

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

15



20/10/2014

**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**  
 - numero delle fasi compresenti all'equilibrio  $\phi$   
 + fattori fisici attivi F (Temperatura e Pressione)

$V = n - \phi + F$

Prof. Lombardi - STN

La Regola dei gradi di libertà di un sistema.

20/10/2014

si parte sempre da due componenti totalmente miscelabili allo stato liquido ma non sempre a quello liquido

**I diagrammi di stato**

3a dds

Prof. Lombardi - STN

si parte sempre da due componenti totalmente miscelabili allo stato liquido ma non sempre a quello liquido

Esempio

**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 - STN

**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 - STN

In un diag di stato di una sostanza pura vi sono condizioni a più fasi. Le linee segna no il passaggio tra una fase e l'altra.

20/10/2014

Comportamento al raffreddamento.

Il sistema fa liq → sol + liq → sol. Durante il processo si formano i grani e al diminuire di T si ingrossano [12].

Per ogni temperatura si può ricavare la composizione del liq e del solido in formazione.

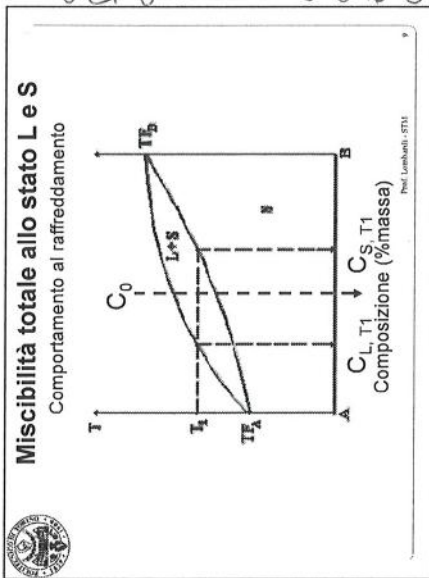
Quindi, per  $C_0$  e  $T_1$  avremo la liq forma da percentuali di A e B date da  $C_{L,T_1}$  e

sempre al  $C_0$  e  $T_1$  il solido formato si avrà percentuali di A e B pari a  $C_{S,T_1}$ .

È anche possibile osservare il solido si arricchisce di A o B durante il raffreddamento.

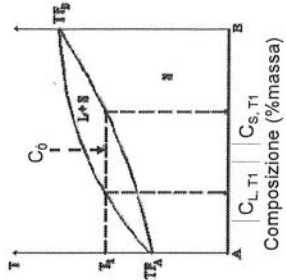
Una volta tutto solido la composizione è uguale a quella di partenza [2].

20/10/2014



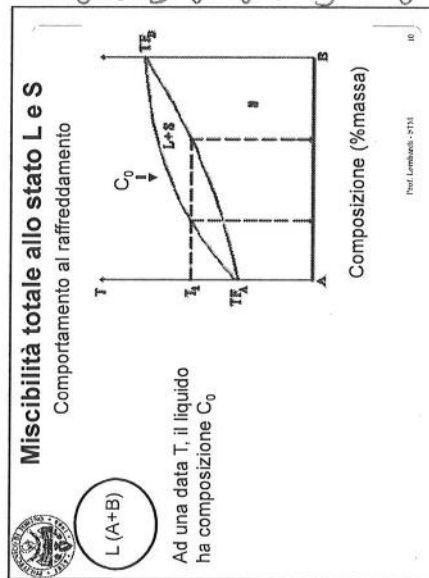
**Miscibilità totale allo stato L e S**

Comportamento al raffreddamento



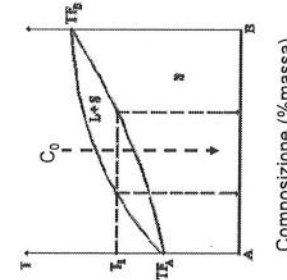
Il primo solido che si forma ha composizione  $C_{S,T_1}$  con un contenuto di B maggiore che nel liquido di partenza

Prof. Lombardi - STI



**Miscibilità totale allo stato L e S**

Comportamento al raffreddamento

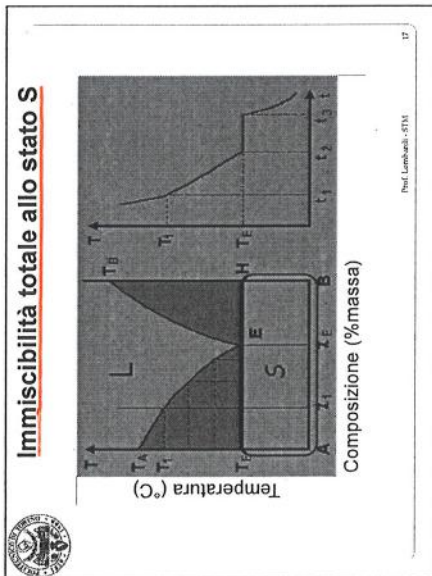


La composizione del solido si arricchisce di A rispetto al solido di partenza

Prof. Lombardi - STI

20/10/2014

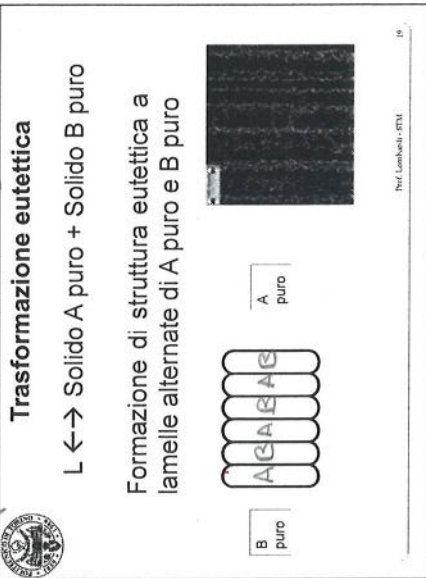
Si sa quando c'è totale miscibilità o allo stato liquido ma immiscibili tra totale a solido.



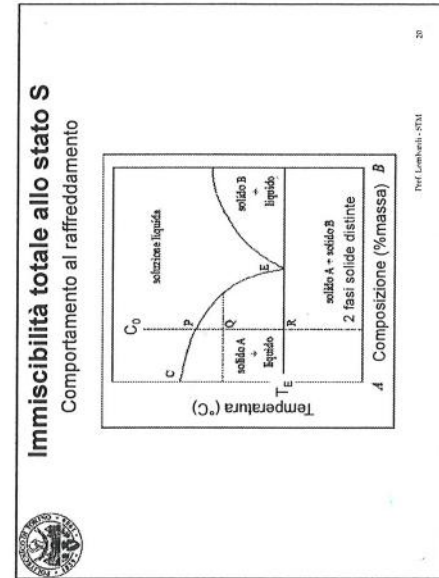
Il solido che si forma è composto da A e B in miscela. Questo è giustificato da una trasformazione eutettica.

In determinate condizioni di comp e temp uno stesso liquido solido si divide in due solidi diversi e per quelle condizioni, due solidi di tipo L come in un liq.

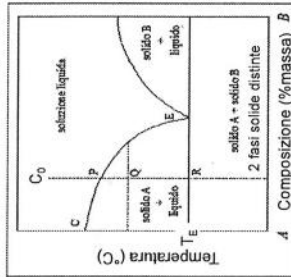
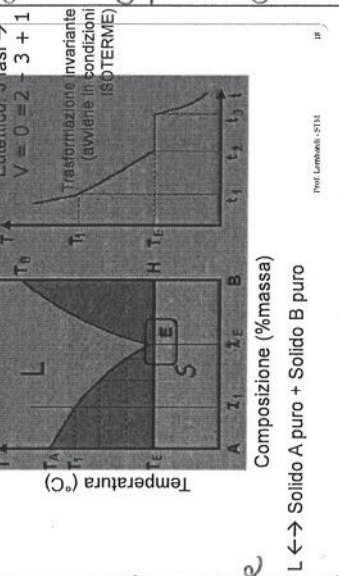
Quindi durante il raffreddamento al liquido T diminuisce, poi arrivata all'eutettico, rimane costante finché non si completa tutta la trasformazione.



Alla T. Eutettica, il sistema forma una struttura lamellare dove i due solidi non si miscelano ma si dispongono il lamelle alternate di solido puro A-B-A-B.



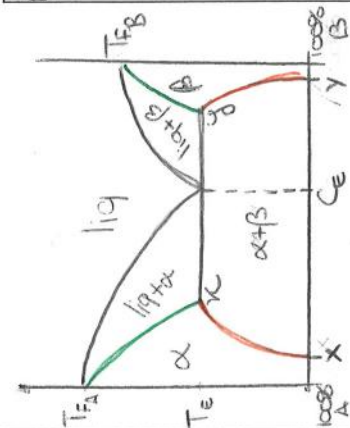
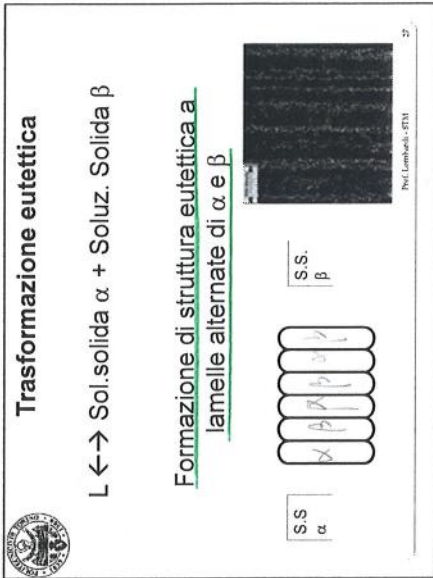
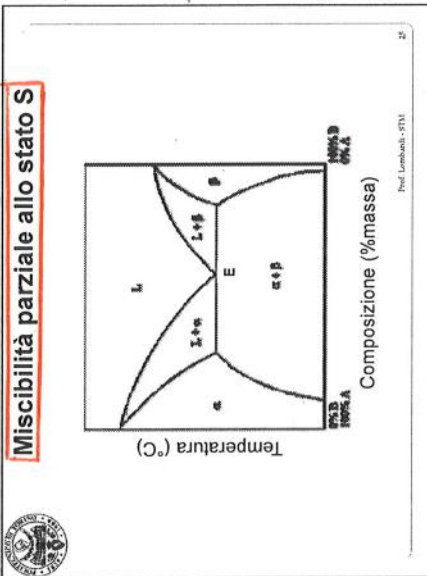
Per la regola di Gibbs in questo caso la varianza è nulla. Quindi si vedono 3 fasi.



Comportamento al raffreddamento

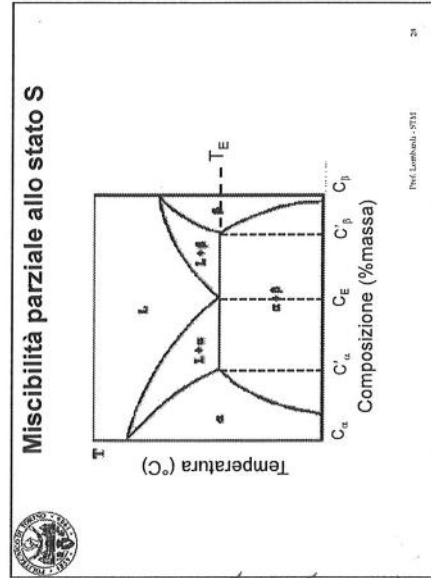
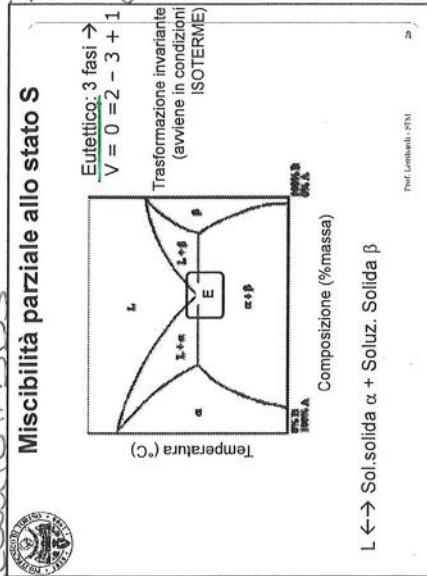


Nel caso di miscibilità parziale allo stato solido, il liquido è sempre miscelabile completa, ma allo stato solido la miscibilità solo per certe percentuali di A in B o B in A. Allora, per poco  $\beta$ , si formerà una soluzione solida  $\alpha$ , mentre per basse percentuali di A, soluzione solida  $\beta$ . Se le % in soluti (di A in B o viceversa) non sono piccole, allora si formerà miscelabile solida e si formeranno  $\alpha$  e  $\beta$  che però non si mescolano.



Per disegnare questo servono  $T_{FA}, T_{FB}, T_E, C_E$

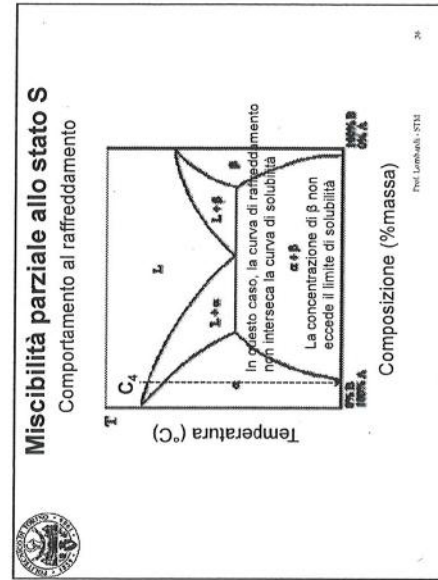
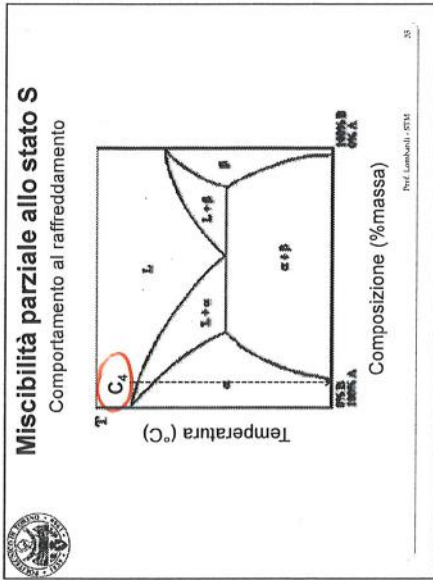
e i limiti di solubilità di B in A:  $x$  e di A in B:  $y$ . Queste sono a  $T_E$  ma la solubilità a  $T_E$  è maggiore di quella a  $T_{mb}$  allora devo sempre andare la solubilità a  $T_{mb}$ . Posso quindi tracciare la curva di solidos e di Soluz. Definire quindi soluzione solida  $\alpha$ , solido  $\beta$ , solido  $\alpha + \beta$ , liq.  $\alpha$  e liq.  $\beta$ . Così ho tracciato il DDS



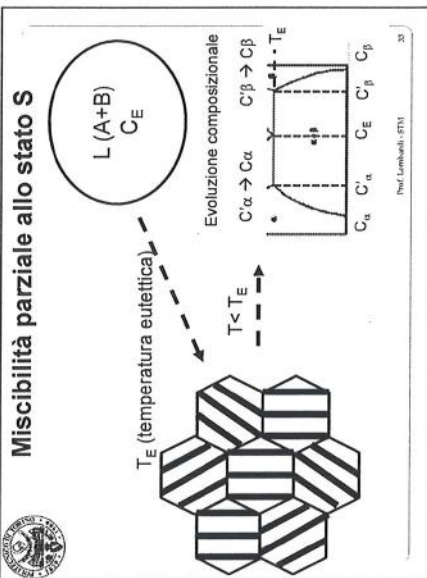
In questo caso la solidificazione a  $C_E$  il liq. da vitare a 2 solidi che sono allora volta soluzioni solide. La microstruttura si crea è sempre lamellare ma qui le lamelle NON sono A|B|A|B ma  $\alpha|\beta|\alpha|\beta$ , quindi nella lamella la composizione di soluzione solida.

I punti  $C_E, C_{\alpha}$  e  $C_{\beta}$  del limite tra zona mono fase e bifasica.

Per la concentrazione  $C_4$  si parte sempre da una condizione di completa miscibilità allo stato liquido -



Una volta formate le lamelle, se diminuisce la temperatura il sistema cambia perché la solubilità di A in B o B in A è funzione della temperatura. Quindi in una struttura A posso inserire sempre meno B al diminuire della temperatura e viceversa A in B.

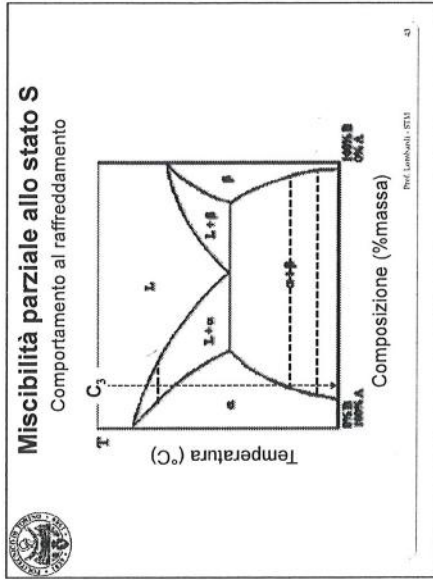


Altra per valutare le concentrazioni di A e B in una

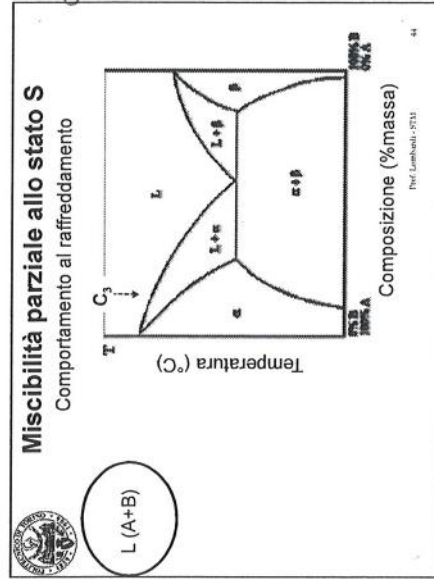
Per valutare la composizione in traccia in isotermia e proiettare le composizioni dei solidi ottenendo la composizione della solida alpha e della beta per quella T.

Qui nel alpha+beta posso applicare la leva.

20/10/2014

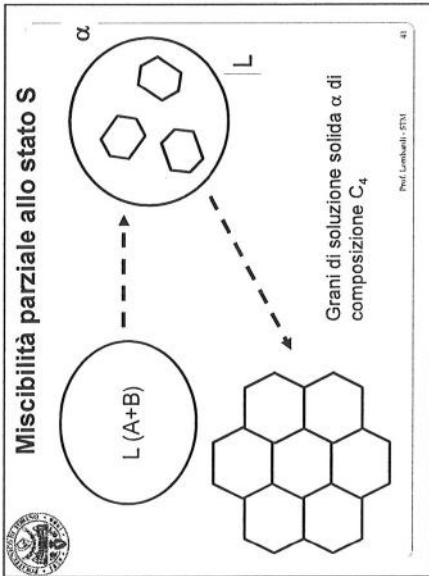


Parte sempre  
da liquidi  
liquido con  
completa  
miscibilità -

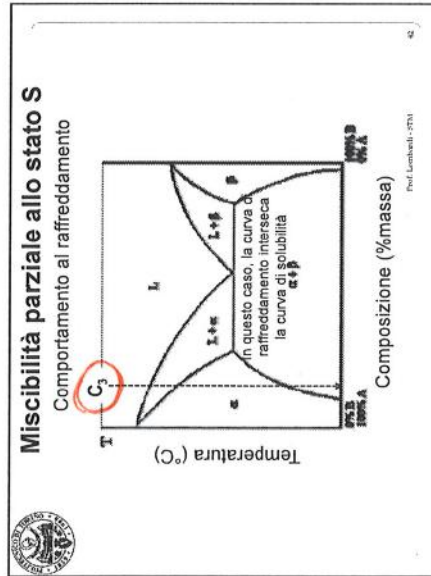


22

20/10/2014



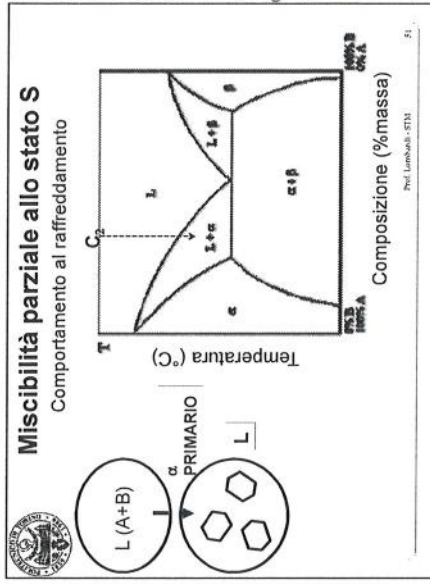
Concentrazione  $C_3$



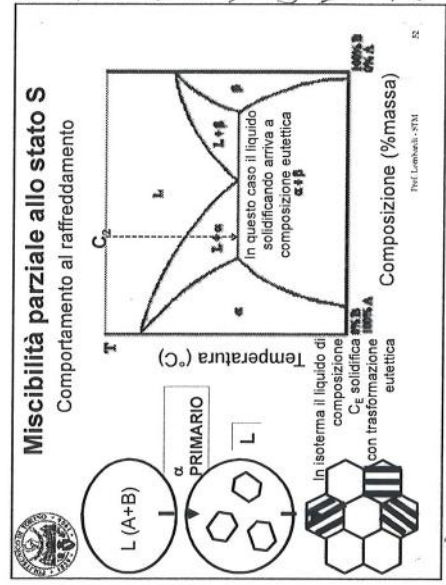
21



20/10/2014



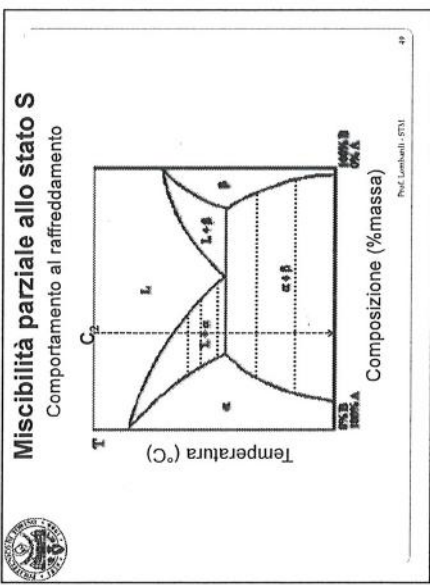
Incrocia liq +  $\alpha$  e c'è la solutazione completa. Si arricchisce di B tendendo a C e mentre la composizione di  $\alpha$  e  $\beta$  tende al punto di massima solubilità arricchendosi in B.



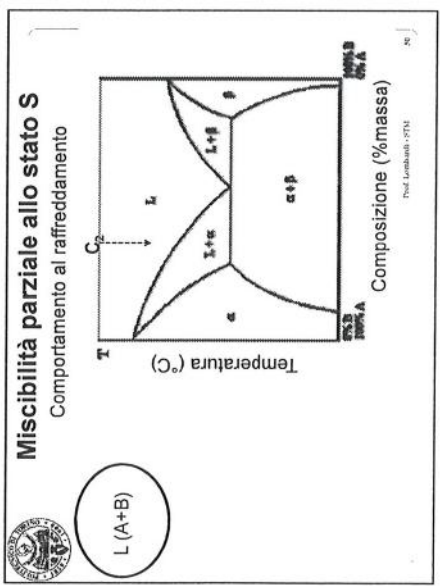
Senza do soluto si ha soluzione solida con la variazione di  $\alpha + \beta$ . Quindi sotto non variano più le concentrazioni e si arricchisce.

20/10/2014

Composizione C2



In questo caso il liquido si solidifica arrivando a composizione eutettica.

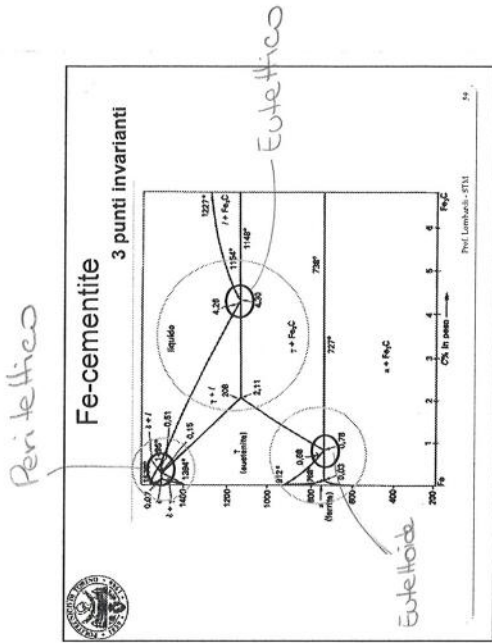


In isoterma il liquido di composizione  $C_2$  si solidifica con trasformazione eutettica.

Parte da liq completa miscelata.

più di A e β di B. Non cambia più neanche la struttura.

20/10/2014



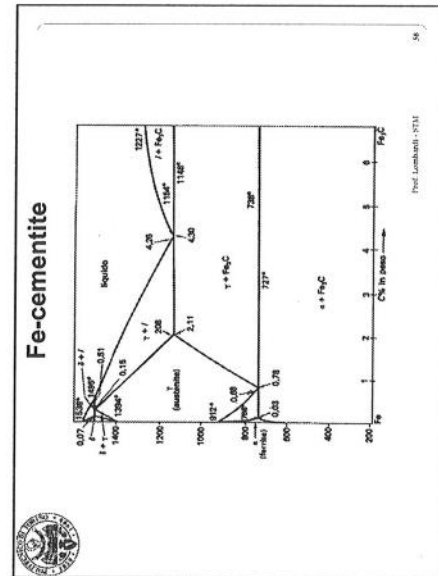
20/10/2014



*Esercizio*

30

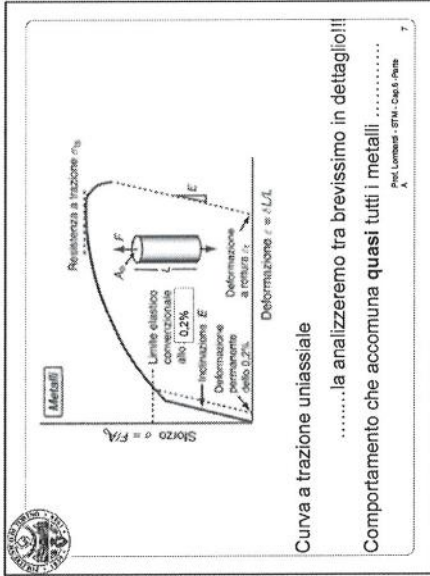
29



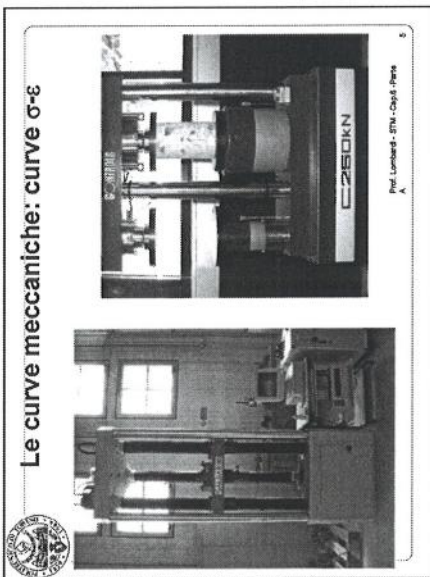


03/11/2014

Sforzi e allungamenti dipenderanno da sezione iniziale del provino nel tratto utile

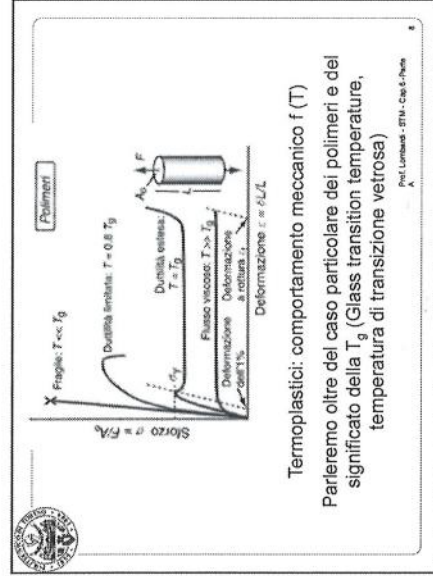


03/11/2014



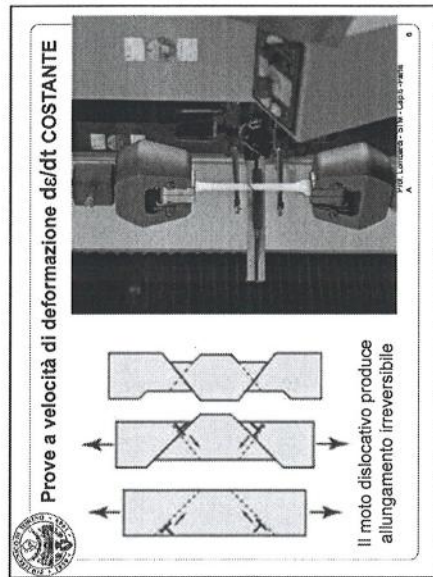
Macchina per prova di trazione con pr

I polimeri hanno vari comportamenti



4

3



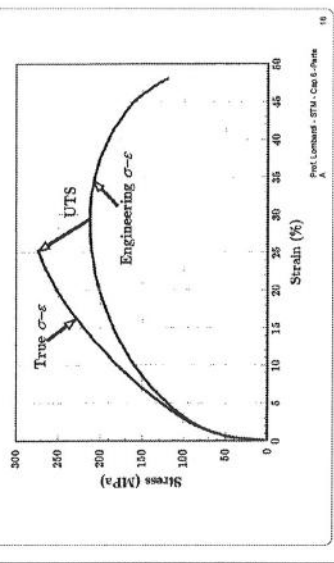
Si impongono una velocità di deformazione costante e si registrano sforzi e deformazioni allungamenti

03/11/2014

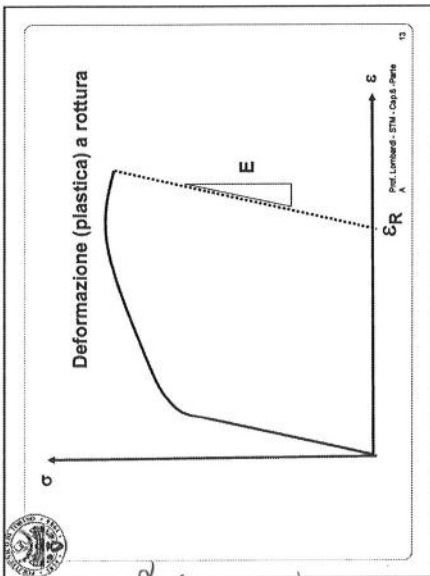
**Modulo elastico E** → **RIGIDEZZA**  
 $\sigma_{el}$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{0.2\%}$ ,  $\sigma_R$  → **RESISTENZA**  
 $\epsilon_R$ ,  $S_R$  → **DUTTILITA'**  
 Area sottesa → **TENACITA'**

Differenza tra curva reale e ingegneristica -  
 Quella ingegneristica scende xR la macchina  
 fornisce il grafico in F (Area iniziale) ma dopo la  
 strizione l'area di minuzio => l'area più resistere  
 solo a una  
 sollecitazione  
 minore

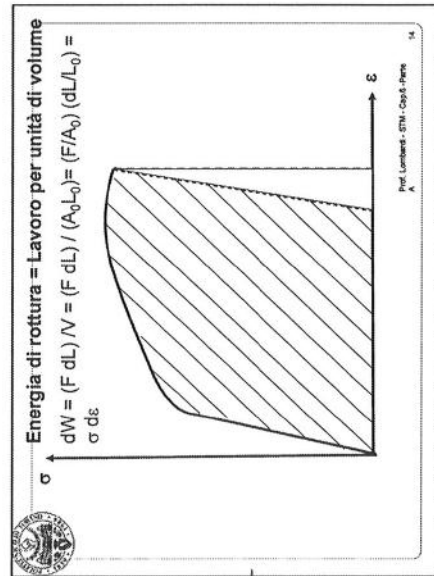
Non si visual  
 una curva  
 reale dove lo  
 sforzo aument  
 aumentare la  
 sempre  
 ma una curva  
 fittizia che  
 mantiene  
 conto di  $\frac{dA}{dt}$



03/11/2014



Il provino che  
 si rompe nell  
 istante in cui  
 si rompe recup  
 ra l'allungam  
 elastico e la  
 iniziale e la  
 sua lunghezza  
 finale è  $\epsilon_R$



L'area sottesa  
 alla curva  
 esprime  
 l'energia  
 necessaria  
 per la rottura

8

7



Prova statica non distruttiva

Durezza: resistenza che il materiale pone alla penetrazione.

Calcola la durezza come sforzo carico penetra-  
ta.

**Durezza - Hardness H**

Fig. 6A. La prova di durezza. La prova Vickers usa una piramide in diamante; le prove Rockwell e Brinell utilizzano delle sfere in acciaio.

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

Prof. Lombardi - STM - Cap. 8 - Para. 21

A seconda del materiale da studiare sceleggo una o l'altra - Pa  
La prova si basa sul fatto che il più duro penetra il più tenero.  
Quindi sceleggo Ag o Diamante.

**Geometrie di INDENTAZIONE**

Nome della prova	Geometria dell'induttore	Formule e simboli
Rockwell	Sfera	$HRC = \frac{1}{180} \left( \frac{F_0}{d^2} - \frac{F_1}{d^2} \right)$ $HRA = \frac{1}{180} \left( \frac{F_0}{d^2} - \frac{F_2}{d^2} \right)$ $HRT = \frac{1}{180} \left( \frac{F_0}{d^2} - \frac{F_3}{d^2} \right)$
Vickers (macro e micro)	Piramide di diamante	$HV = \frac{1.854}{d^2} F$ $HV = \frac{1.854}{d^2} F_0$
Brinell	Sfera	$HBS = \frac{0.102 F}{d^2}$ $HBN = \frac{0.102 F}{d^2}$

Prof. Lombardi - STM - Cap. 8 - Para. 23

Rockwell Ra  
precisamente

La forma del  
prova in una  
determina  
la formula  
per il calcolo  
della durezza

**Hardness Testing**

Rockwell C: 120° Load

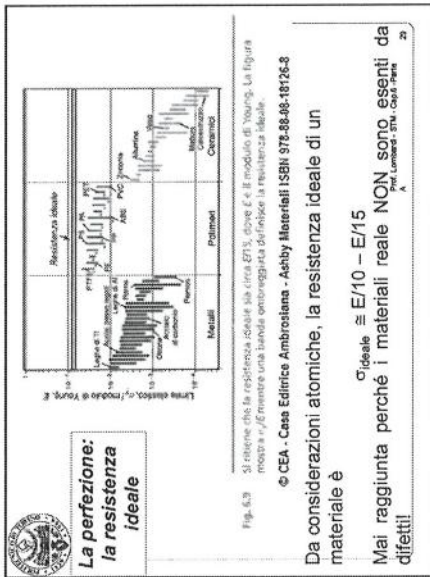
Rockwell B: 1/16" Load

Rockwell A: 1/64" Load

Prof. Lombardi - STM - Cap. 8 - Para. 24

Ogni prova  
ha la sua  
scala di  
grandezze

03/11/2014



I difetti influenzano l'E di legame

0-0



03/11/2014

**La Tensione lineare T**

Gli atomi vicini al vertice della dislocazione sono spostati rispetto alle loro posizioni ideali

→ Essi possiedono una più elevata energia potenziale

Per mantenere l'energia potenziale del cristallo più bassa possibile, la dislocazione cerca di mantenersi la più corta possibile - si comporta come se le fosse associata una tensione lineare T, come avviene per una striscia elastica.

Prof. Lombardi - STM - Cap. 8 - Parte C 7

Nell'interno della disloc si crea instabilità energetica.

03/11/2014

Fig. 4.13. Esempio di una forza su una dislocazione. (A) Vettore proporzionale alla proiezione sul piano di un piano di scorrimento.

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Abilly Materiali ISBN 978-88-08-18126-8

Questo lavoro  $W$  viene compiuto:

- contro la resistenza  $f$  per lunghezza unitaria,
- o meglio contro  $fL_1$  per una lunghezza pari a  $L_1$ , in corrispondenza di uno spostamento  $L_2$  (perché la linea di dislocazione si muove di questa entità in opposizione a  $f$ ), fornendo un lavoro totale contro  $f$  di  $fL_1L_2$ .

Prof. Lombardi - STM - Cap. 8 - Parte C 5

Il lavoro si oppone al moto di dislocativo perpendicolarmente al moto della disloc.

**La Tensione lineare T**

La tensione lineare  $T$  è un'energia per lunghezza unitaria (analoga a ciò che avviene per la tensione superficiale, che è un'energia per superficie unitaria) ed è calcolabile come:

$$T \approx \frac{1}{2} E b^2$$

dove  $E$  è il modulo di Young.

La tensione lineare influenza significativamente l'interazione delle dislocazioni con gli ostacoli.

Prof. Lombardi - STM - Cap. 8 - Parte C 8

Energia iperfata alla lunghezza lineare con esp 2-  
Influenza l'interazione tra dislocazione e ostacoli al suo moto.

4

3

Fig. 4.15. L'azione di una forza su una dislocazione. (A) Vettore proporzionale alla proiezione sul piano di un piano di scorrimento.

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Abilly Materiali ISBN 978-88-08-18126-8

Uguagliando i due valori di lavoro  $W$ :

$$W = \tau L_1 L_2 b = f L_1 L_2$$

si ottiene, per ogni tipo di dislocazione:

$$\tau b = f \rightarrow \tau = f / b$$

Formando uno sforzo di taglio  $\tau > f / b$  si induce il moto della dislocazione e si provoca scorrimento nel cristallo.

Prof. Lombardi - STM - Cap. 8 - Parte C 6

Ma allora il lavoro x movimento ma disl è uguale a quello per cui si oppone al suo moto. Dall'uguagliamza posso quindi ricavarmi  $\tau$  necessaria

03/11/2014

La resistenza che l'ostacolo esercita sarà uguale al rapporto tra la forza di bloccaggio  $P$  e lunghezza - quindi ogni ostacolo aggraverà l'azione portante

Ogni ostacolo esercita una forza di bloccaggio  $p$  (effetto di pinning) sulla linea di dislocazione - una forza che si oppone per lunghezza unitaria di dislocazione - tale che il contributo degli ostacoli alla resistenza  $f$  è:

$$f = p/L$$

Il contributo aggiuntivo alla sollecitazione di taglio  $\tau$  richiesto per far muovere la dislocazione è:

$$\Delta\tau = p / (bL)$$

Prof. Lombardi - STM - Cap. 6 - Para. C - 13

Nel momento in cui inserisco un ostacolo modificando lo stato del reticolo e gli atomi del reticolo si spostano in avanti però nell'interno della curva di

Il bloccaggio è un'azione elastica  $\rightarrow$  dislocazione e ostacolo distorcono elasticamente il reticolo anche se, quando la dislocazione si muove, induce deformazione plastica.

A causa di questo  $p$ , per ogni specifico ostacolo in ogni specifico materiale, il bloccaggio si accresce di un fattore  $E_b^2$ .

Lo sforzo di taglio  $\tau$  necessario alla dislocazione per superare gli ostacoli assume l'espressione:

$$\tau = (\alpha E b) / L$$

dove  $\alpha$  è una costante adimensionale che caratterizza la resistenza dell'ostacolo.

Prof. Lombardi - STM - Cap. 6 - Para. C - 14

ma irreversibilmente. Bisogna tenere conto di questo, considerando che la presenza di questi difetti, accresce il bloccaggio di un  $E_b^2$

Quindi il  $\Delta\tau$  sarà in  $\tau = \frac{\alpha E b}{L}$

di lavoro del reticolo di un  $P/L$  e allora il valore critico della sollecitazione.

Inserendo nel reticolo atomi sostituzionali o interstiziali questi contribuiscono alla resistenza e si oppongono al moto dislocativo. I contributi, e quindi l'energia e le dislocazioni, devono avere per superarli, è pari a  $\tau_{ss} \propto E C^{1/2}$  dove  $C$  è la concentrazione del soluto. La concentrazione è impo perché tiene conto del Num di difetti in siti nel reticolo. Come Pinz?

**Rafforzamento da soluzione solida**

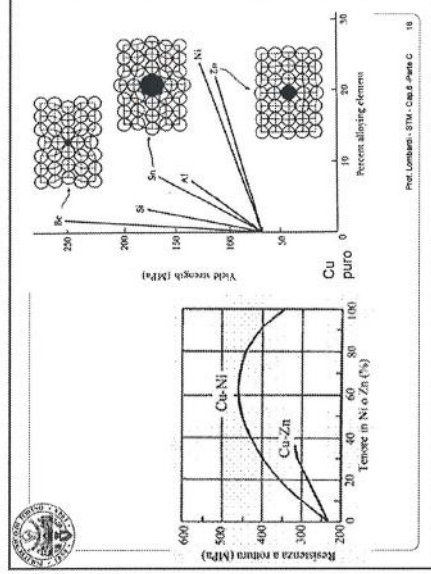
Il contributo della soluzione solida allo sforzo di taglio necessario al moto dislocativo è:

$$\tau_{ss} = \alpha E C^{1/2}$$

$\tau_{ss}$  cresce con la radice quadrata della concentrazione del soluto. I soluti differiscono solo per l'entità della distorsione del reticolo indotta dal soluto (mismatch tra solvente e soluto), descritta dalla costante  $\alpha$ .

Prof. Lombardi - STM - Cap. 6 - Para. C - 15

si eguagliamo ridando stabilità - Il reticolo tornato stabile si oppone al moto dislocativo.

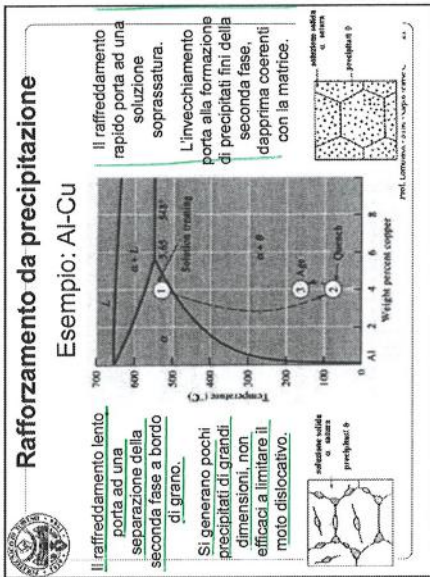


Si avranno quindi  $\sigma_y$  maggiori,  $\sigma_R$  maggiori ma è minore. Es: Cu-Ni fino a 60% OK poi il Cu-Zn si ferma x non c'è miscelabilità completa.

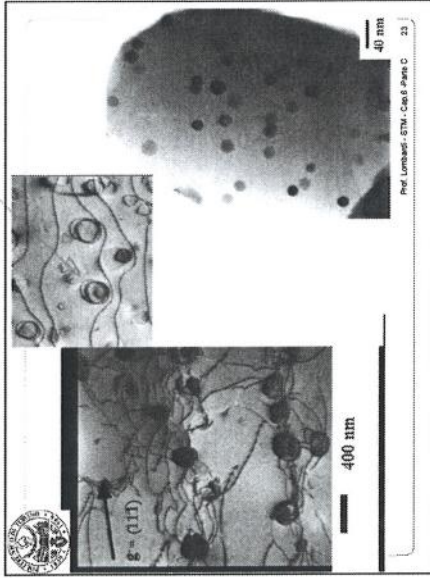


03/11/2014

Quando la dislocazione incontra il reticolo, questo si oppone al moto dislocativo. I punti nei quali precipitano le linee di dislocazione si bloccano e precipitano fino ad avvolgerlo.

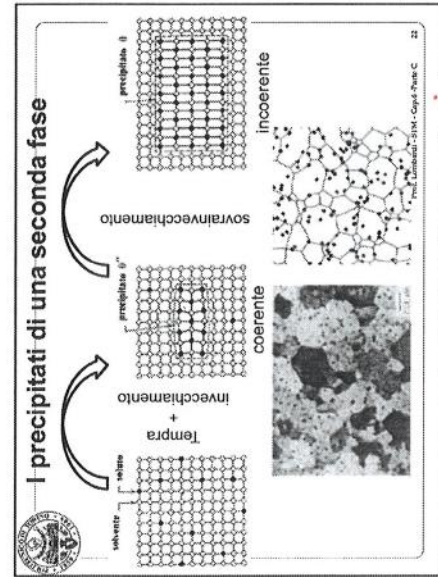


Raffreddando lentamente il precipitato si mette ad bordo grano



Solo con il sovrainvecchiamento si raggiungono bordi grandi [22]

Un raffreddamento rapido invece crea grani più piccoli. Con il tempo i grani piccoli crescono ma un po' ma non raggiungono i livelli del raffreddamento lento.



Quando una dislocazione incontra un precipitato questa cerca di attraversarlo per la minore resistenza. L'instabilità del precipitato la dislocazione "avvolge" fino a chiudersi attorno.

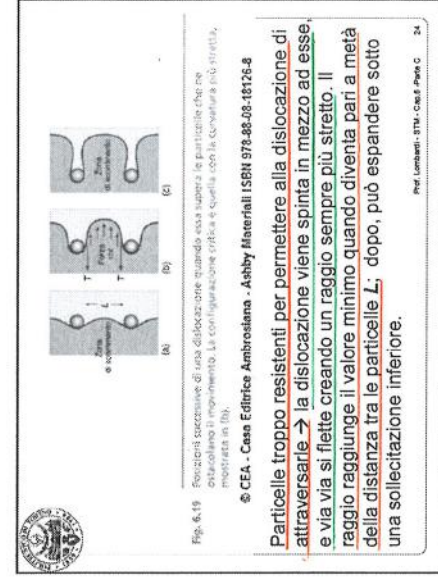
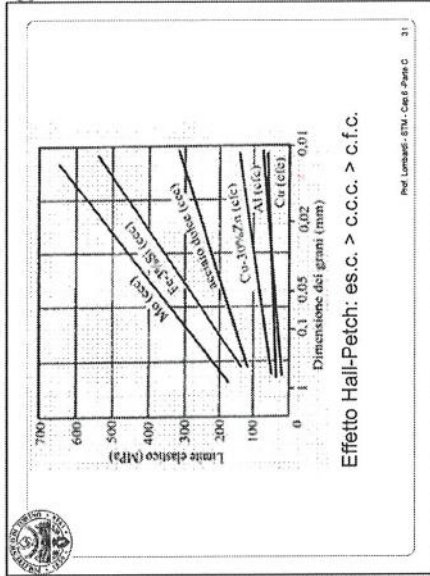


Fig. 6.19 Reazioni successive di una dislocazione quando essa supera il precipitato che ostacola il movimento. La configurazione critica è quella con la curvatura più stretta, mostrata in (B).  
© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Abby Materiali ISBN 978-88-08-18126-8  
Particelle troppo resistenti per permettere alla dislocazione di attraversarle → la dislocazione viene spinta in mezzo ad esse, e via via si flette creando un raggio sempre più stretto. Il raggio raggiunge il valore minimo quando diventa pari a metà della distanza tra le particelle L; dopo, può espandersi sotto una sollecitazione inferiore.



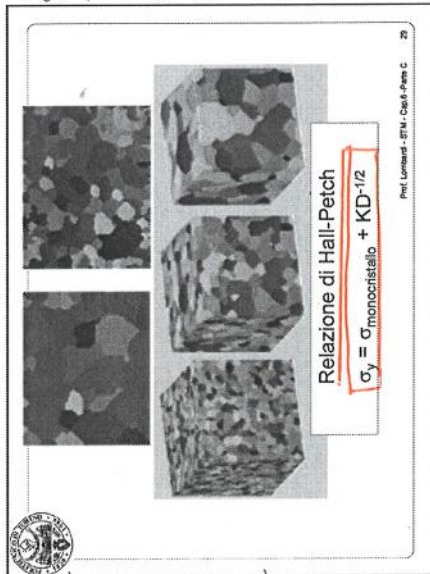
03/11/2014

Questo è legato alla struttura e al tipo di cella e al. Al diminuire della dimensione del grano varia nei limiti elastici in funzione della cella -



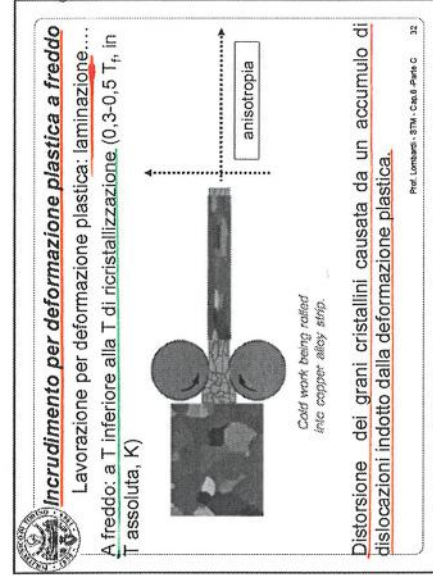
03/11/2014

Se D è troppo piccolo  $\langle \frac{b}{D} \rangle$  non vale



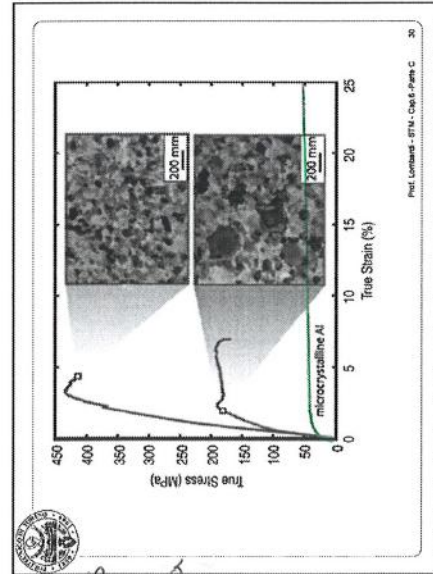
Questa relazione definisce come aumenta la  $\sigma_y$  Partendo dalla base di un materiale come si possono crist e sommando  $K D^{-1/2}$

Un'ultima tecnica per rafforzare è **Incrudimento** avere deform plasticamente il materiale con lavoraz tip laminaz dove il mat passa fra due rulli a  $T = 0,3 - 0,5 T_p$



Con questa lavorazione i grani tendono ad allinearsi con la direzione in cui viene tirato - ~~bastarsi~~ la distorsione del reticolo che ne deriva crea nuove dislocazioni che si oppongono al moto delle dislocazioni si sostercolano tra di loro -

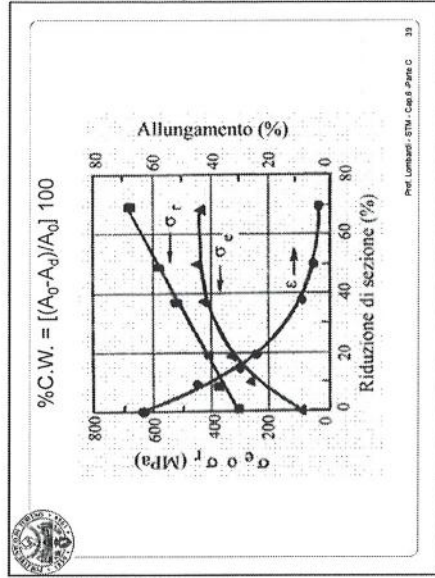
15



Il materiale microcristallino ha grandi e plastiche. Se diminuisce la dimensione del grano  $\sigma_y$  aumenta ma è quindi minor duttilità. Grano  $n \text{ nm} \Rightarrow$  Fragile

Quindi diminuendo il grano guadagnano in  $\sigma_y$  ma perdono in  $\epsilon$  il materiale si infrange prima tendendo al comportamento dei ceramiche.

03/11/2014



**Incrudimento per deformazione plastica a freddo**

I balzi associano una energia potenziale - essi sono piccolissimi segmenti di dislocazione di lunghezza  $b$  - con il risultato che ciascuno esercita una forza di bloccaggio  $p = (E b^2) / 2$  sulla dislocazione in movimento.

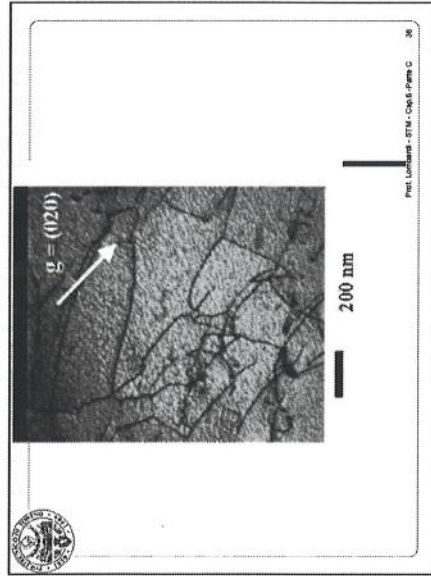
Ricordando che:  $\Delta \tau = p / b L$  e che  $L = \rho_d^{-1/2}$

$\tau_{wh} \approx (E b \sqrt{\rho_d}) / 2$

Maggiore è la densità delle dislocazioni, minore la distanza che le separa, maggiore il contributo a  $\tau_{wh}$ .

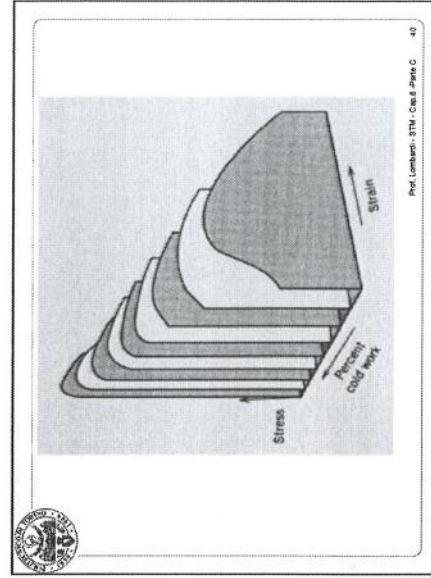
Prof. Lombardi - STM - Capitolo 8 - Parte C 37

03/11/2014



si osservano scalini

Tutto questo dipende dal n° di dislocazioni che creo e quindi dagli quanto riduco la sezione. Più riduco, più creo disloc. Più riduco più è fragile e  $\sigma_r$  e  $\sigma_y$



20

19

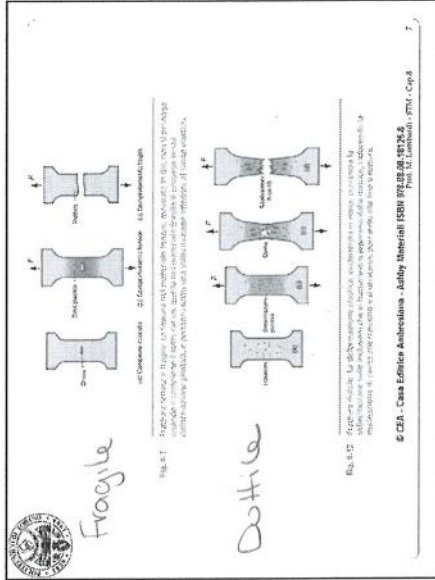
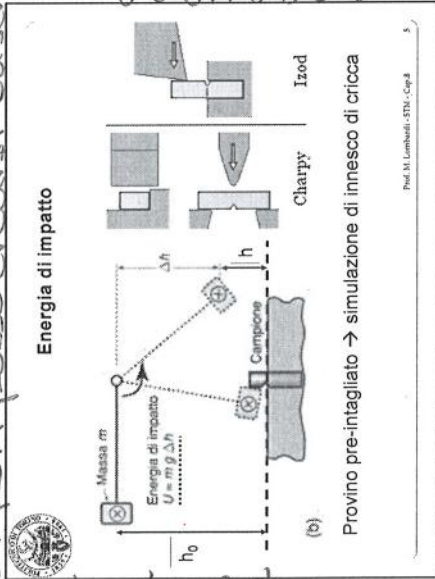


14/11/2014

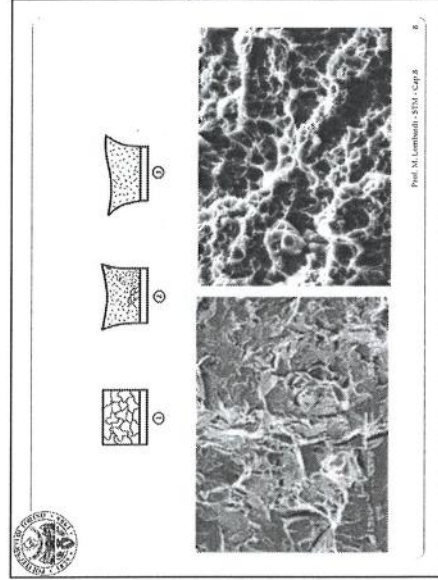
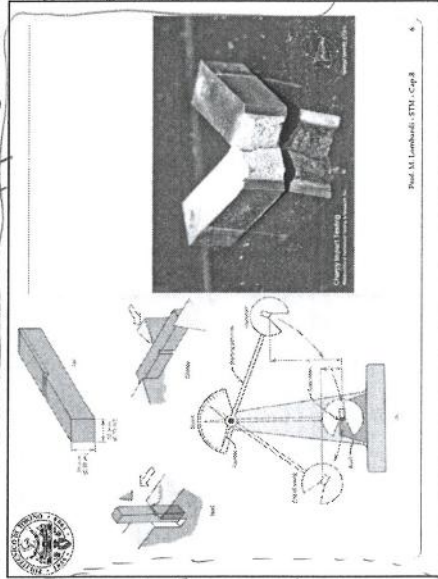
Le superfici di frattura sono molto importanti perché forniscono informazioni sul tipo di frattura. Le cricche vanno a influenzare notevolmente la resistenza del pezzo perché sono principi di propagazione di rottura. Le cricche e i pori possono crearsi da sempre.

14/11/2014

Nell'intorno di queste intrusioni avrà diverso comportamento a sollecitazione. Il mat non aderisce bene alle intrusioni e la resistenza diminuisce.



Quindi, dalla sop di rottura, posso valutare com'era il materiale: rottura fragile ⇒ sup spezzare e lo cante rottura duttile ⇒ la def plastica inizia intorno alla cricca dall'intrusione e si creano le cavità. Al crescere delle cavità la rottura è fragilizzata ⇒ quindi la superficie è irregolare.



Se la frattura duttile (3) la sezione finale è diversa da quella iniziale.



Se la finiscono quindi dei parametri geometrici tutti utili a prevedere il comportamento della porzione deformata e quindi più sollecitata.

Con questi parametri vado a valutare quanto volume di materiale viene meno rispetto alla sezione piena.

Per calcolarlo serve il min raggio di curvatura e la dimensione caratteristica del difetto (c) e la lunghezza di un intaglio superficiale (p).

$\rho$  = minimo raggio di curvatura del difetto che concentra la tensione

$c$  = dimensione caratteristica del difetto

lunghezza di un intaglio superficiale

semi-lunghezza di un difetto interno

Se def  $\sigma_{nom}$  la  $\sigma$  che si ha per la sezione piena  $\sigma_{nom} = \frac{F}{A_0}$

Con la  $T$  di Griffith vado a calcolare la  $\sigma$  locale massima dove si ha un difetto - Ricavo

Posso def il termine tra [ ] con  $K_{sc}$

$\sigma_{nom}$  = sollecitazione nominale applicata all'intero componente ("carico/sezione resistente", trascurando la presenza di difetti che possono concentrare la sollecitazione)

$\sigma_{max}$  = tensione locale massima (per effetto di concentrazione dello stress)

$\sigma_{max} = \sigma_{nom} [1 + \alpha (c/\rho)^{1/2}]$

$\alpha$  = fattore pari a ca. 2 a trazione, ca. 1/2 a flessione.

Fattore di concentrazione di sollecitazioni  $K_{sc}$

$$K_{sc} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} = 1 + \alpha \left( \frac{c}{\rho} \right)^{1/2}$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{nom} [1 + \alpha \left( \frac{c}{\rho} \right)^{1/2}] = \sigma_{nom} \cdot K_{sc} \quad K_{sc} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}$$

È difficile evitare di avere cricche così si cerca di controllarle e cercare di capire qual'è il limite oltre il quale non devo andare - Per farlo

Teoria di Griffith  
Determina come la presenza di macchie interne o esterne va a modi ficare la resistenza del materiale.

Introduzione alla meccanica della frattura: la Teoria di Griffith

Le fessure, le cricche, i difetti microscopici **CONCENTRANO** la sollecitazione

vengono deviate dalle cricche e si concentrano sull'apice. Quando vado a formare il materiale vado a influenzare solo geometria e quindi sul comportamento. Se vado la sezione ammorza la  $\sigma$ .

Concentrazione di tensioni

Concentrazione di sollecitazioni. La variazione di sezione concentra la sollecitazione tanto più fortemente quanto è importante la curvatura della superficie.

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materials ISBN 978-88-08-18128-8 Fori, fessure, filettature e variazioni di sezione del componente concentrano localmente le sollecitazioni.

Lo stesso fenomeno ( $\sigma$ ) si verifica se anelli e fori, l'intaglio è dentro -> foro perche rivetti che va a diminuire la superficie resistente

14/11/2014

In prossimità del vertice della cricca, per  $r \ll c$ :

$$\sigma_{locale} = Y \frac{\sigma \sqrt{\pi c}}{\sqrt{2\pi r}}$$

Per un dato valore di  $r$  (distanza dal vertice della fessura), la sollecitazione locale  $\sigma_{locale}$  varia secondo un fattore:

$$K_I = Y \sigma \sqrt{\pi c}$$

Unità di misura: MPa√m

Prof. M. Lombardi - STS - Cap. 8

Si ricava il fattore di sollecitazione  $K_I$

Quando la  $\sigma_{locale}$  eccede un valore critico  $\sigma^*$  (uguaglia la resistenza a rottura del materiale), le fessure propagano

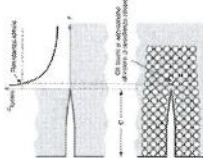


Fig. 8.11 - Proprietà di un materiale a sollecitazione locale. Il grafico mostra la distribuzione del campo di sollecitazione  $\sigma$  in un vertice della fessura. In base a questa analisi si possono definire i fattori di concentrazione di tensione  $K_I$  e  $K_{II}$  in funzione della geometria della fessura e della sollecitazione applicata. L'immagine illustra il meccanismo di propagazione della fessura.

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Anby (storici) ISBN 88-08-18726-8

Prof. M. Lombardi - STS - Cap. 8

Dato  $K_I$  si determina la  $\sigma^*$  ovvero la tensione critica cui oltre la quale la fessura si propaga

11

14/11/2014

Si può definire così un Fattore critico di intensità di sollecitazione in modo  $K_{Ic}$ , che è meglio noto come Tenacità a frattura

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

È una proprietà del materiale, che vedremo ora dipendente dal modulo elastico  $E$  e dalla tenacità  $G_c$ .

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

Prof. M. Lombardi - STS - Cap. 8

Possiamo definire  $K_{Ic}$  come Tenacità a rottura. Se considero  $\sigma^*$  al postodi Snow allora  $K_{Ic} = \sigma^* \sqrt{\pi c}$  cioè  $K_{Ic}$  critica che è fondata tale per capi.

ve come il materiale reagisce alle sollecitazioni esterne in funzione di  $E$  e da  $G_c$  quindi da  $E$  e da  $G_c$ .

La tenacità a frattura è una proprietà del materiale che contiene una fessura, una cricca e che descrive la sua capacità di resistere alla sua propagazione, alla frattura

Flaw tolerant  $\rightarrow$  tolleranza al difetto

Tanto più  $K_{Ic}$  è elevato, tanto più il materiale è "tollerante" alla presenza di un difetto microscopico, cioè tanto più in presenza di esso, può resistere alla sua propagazione.

Prof. M. Lombardi - STS - Cap. 8

$K_{Ic}$  quindi indica la capacità del materiale di resistere alla propagazione di una cricca già presente.

È utile perché anziché ottimizzare un materiale

riale (costoso) lo rende resistente alla propagazione. Posso anche valutare se nelle condizioni operative si propaga o no







14/11/2014

**Modificazione delle proprietà: cenno ai meccanismi di tenacizzazione**

(a) Per pontaggio con deformazione plastica di una 2<sup>a</sup> fase duttile (CerMet)

(b) Per deflessione del percorso di cricca, pontaggio e pull-out di rinforzi fibrosi

(c) Per trasformazione di fase ( $m \text{ZrO}_2$ )

Prof. M. Lombardi - STM - Cap. 8 39

**Modificazione delle proprietà: cenno ai meccanismi di tenacizzazione**

Fig. 8.17 Effetto tenacizzante delle fibre. La forza di estrazione (pull-out) si oppone all'apertura della fessura.

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

Prof. M. Lombardi - STM - Cap. 8 40

14/11/2014

Materiale	E	G <sub>c</sub>	K <sub>IC</sub>
Metalli	++	+++	+++++
Ceramici	+++	--	+
TP	-	+	≈
TI	+	--	-

Da quanto precede si deduce perché i materiali fragili resistano bene a compressione. La trazione facilita l'apertura dei difetti, mentre la sollecitazione a compressione tende a chiuderli o, comunque, a ridurli

Prof. M. Lombardi - STM - Cap. 8 38

Questo spiega perché i ceramici hanno alta resistenza a compr (chiudo la fessura) e scarsa a traz (la apro è non resiste).

Espressamente

**Modificazione delle proprietà: cenno ai meccanismi di tenacizzazione**

Crack Deviation

Crack Bridging

Residual Stresses

Phase Transformation

Prof. M. Lombardi - STM - Cap. 8 38

19

20

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. Paoletti - STM - Cap 9

Il moto delle dischi avviene anche se  $S < S_y$  - Nel tempo si somma no e dunque energia comunque.

Il degrado non ha andamento lineare.

Tipicamente ho danneggiamento minimo x tempo

tempo seguito da rottura drastica.

Il fenomeno di danneggiamento è legato al fatto che il moto dischi a lavorazione deriva dall'è fornita da ogni singolo sollecitazione quindi per piccola sollecitazione si creano piccole crepe che poi si espandono

**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. Paoletti - STM - Cap 9

Il fenomeno di danneggiamento è legato al fatto che il moto dischi a lavorazione deriva dall'è fornita da ogni singolo sollecitazione quindi per piccola sollecitazione si creano piccole crepe che poi si espandono


19/11/2014

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

Prof. P. Paoletti - STM - Cap 9

**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. Paoletti - STM - Cap 9

La resistenza a fatica è molto inferiore a carico statico.

Un carico inferiore a quello statico può causare danni se già la struttura non dovrebbe perché applica carichi minori di  $S_y$



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 - STM - Cap. 9

Il principio della fatica si applica in maniera diversa a seconda che la struttura sia più o meno sana ovvero se sono già presenti uno dei difetti. Se infatti vi sono dei difetti, la  $S_N$  locale creata se poi oltre a crearsi o scivola via, che sono carichi. Infatti buri ancora di più la  $S_N$  vita a fatica è il tempo necessario a creare una prima cricca - mentre con un difetto già presente la vita a fatica era il tempo di propagazione -

Se invece non sono presenti difetti ancora il tempo di

**Due approcci**

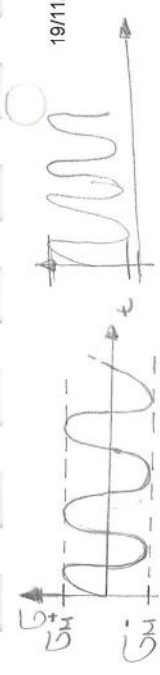
**Caso di componenti non danneggiati (non esistono fessure pre-esistenti)**  
 → gran parte della vita a fatica consumata nel generare la **fessura** (fatica controllata dall'innesco).

**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 - STM - Cap. 9

Autoalimentata

19/11/2014



**Il problema della fatica**

Fig. 9.2 - Si illustrazione della sollecitazione ciclica sulla turbina. Prendere gli assi durante il volo.  
 © CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materials ISBN 978-88-08-18125-8

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

Prof. P. Paoletti - STM - Cap. 9

L'ossillazione può può oscillare tra un valore max ⊕ e un minimo ⊖. Oppure varia tra un max e un min ma stare sempre positiva

Si può definire una **Fatica ad Alto n° di cicli** dove  $S_N$  è molto minore di  $S_y$  (curva a) e pare essere studiata e portare a rottura devo fare tanti cicli.

**Fatica ad alti e bassi cicli**

Fig. 9.1 - Carichi ciclici. (a) Vibrazione acustica a bassissima ampiezza. (b) Fatica per numero elevato di cicli: carichi ciclici ben inferiori al limite elastico.  $\sigma_1$  - (c) Fatica per basso numero di cicli: carichi ciclici superiori al limite elastico (ma inferiori alla resistenza a trazione,  $\sigma_u$ ).

© CEA - Casa Editrice Ambrosiana - Ashby Materials ISBN 978-88-08-18125-8

Prof. P. Paoletti - STM - Cap. 9

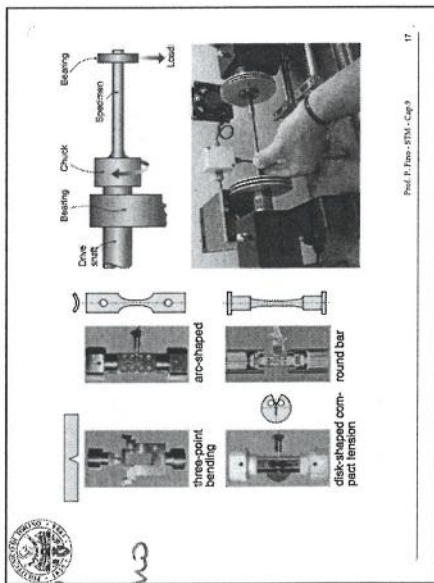
Un altro modo più efficace e rapido è a **basso n° di giri** con carichi  $S$  elevati compresi tra  $S_y$  e  $S_R$  e si rompe prima e posso valutare le cose anche se non è proprio reale (curva c). Il  $S_N$  è alto n° di cicli ma con sforzi maggiori



19/11/2014

Macchina per la Prova a Fatica  
 È una prova semplice ma difficile da impostare

A volte sul  
 provino faccio  
 l'invito così la  
 prova dura meno  
 Per alti N user  
 un motore  
 elettrico a  
 alta freq.



Prof. P. Ferro - STM - Cap. 9

17

Le prove a fatica (non) vengono fatte per costruire  
 il materiale ma per ottenere parametri  
 attraverso due leggi empiriche  
 dove una vale  
 per N alti e  
 una per N bassi

**Le leggi empiriche di Coffin e Basquin**

Basquin: fatica ad elevati cicli

Correlazione empirica tra tempo di vita a fatica ( $N_f$ ) ed  
 intervallo di sollecitazione ( $\Delta\sigma$ ) ( $\rightarrow S = \Delta\sigma/2$ )

$$\Delta\sigma N_f^b = C_1$$

b,  $C_1$  = costanti

Esponente di Basquin b = valori compresi tra 0,07 e 0,13.

Prof. P. Ferro - STM - Cap. 9

18

Il caso Alto N è studiato da Basquin e  
 la relazione vale per qualunque materia  
 le ancle e le costanti variano da mat a mat.

19/11/2014

**Le leggi empiriche di Coffin e Basquin**

La fatica a alti cicli si manifesta per  $\sigma < \sigma_y$   
 Quindi si può dividere  $\Delta\sigma$  per il modulo elastico E,  
 per ricavare l'intervallo di deformazione  $\Delta\epsilon$ :

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} = \frac{C_1/E}{N_f^b}$$

In logaritmi:

$$\text{Log}(\Delta\epsilon) = -b \text{Log}(N_f) + \text{Log}(C_1/E)$$

Prof. P. Ferro - STM - Cap. 9

19

Per paragonare la  
 legge con  
 il diagramma  
 a de f. si fanno  
 il logarit.

Si osserva che  
 per appross  
 si ricavano  
 due rette.

— Basquin

**Le leggi empiriche di Coffin e Basquin**

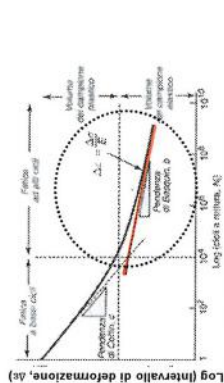


Fig. 9.4  
 I regimi a basso e alto numero di cicli a fatica e le rispettive equazioni empiriche della  
 fatica.

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

Prof. P. Ferro - STM - Cap. 9

20

Basquin viene valutato in fase di pro  
 getto con cicli tra  $10^6$  e  $10^7$ .

19/11/2014

Si suppone che la cricca sia già presente e si dimen siona di conseguenza

**Valutazione sperimentale**

Fig. 3.6. Campo applicato all'elemento a un componente soggetto a sollecitazione ciclabile. Si assume un'ampiezza costante di sollecitazione quando la cricca cresce la lunghezza.

Applicazione di carico ciclico su campioni pre-fessurati con intaglio affilato di lunghezza nota **c**

Prof. P. Ferro - STM - Cap. 9 37

19/11/2014

innesco ammorso

propagazione propagation

rottura finale

frattura rapida finale

→ Comparsa di corrugamenti, striature tipiche della propagazione per fatica

Prof. P. Ferro - STM - Cap. 9 36

Una volta formato l'incresco, questo si propaga in striature onde ogni ciclo fino a rottura d'urto.

La valutazione dei difetti è fondamentale per definire il tempo a vita. Devo studiare possibili difetti interni, con la radiografia e esterni.

**Approccio per componenti fessurati o strutture ad alto rischio**

Pre-screening dei componenti con tecniche di indagine non distruttive - **NDT: Non-destructive testing**

→ ma... se la fessura è al di sotto del limite di detezione...

Si considera la presenza di una fessura iniziale "teorica" e si progetta la struttura affinché sopravviva, in sua presenza, per un dato numero di cicli, per un determinato tempo di vita a fatica.

Su quali dati ci si basa?

Prof. P. Ferro - STM - Cap. 9 28

Seppure sotto un'ampiezza di sollecitazione **S** costante, dal momento che la cricca si accresce ciclo dopo ciclo, si osserva una crescita dell'intervallo di intensità di sollecitazione ciclica **ΔK**.

Come si definisce **ΔK**?

$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi c} \rightarrow \Delta K = K_{max} - K_{min} = \Delta \sigma \sqrt{\pi c}$

Prof. P. Ferro - STM - Cap. 9 28

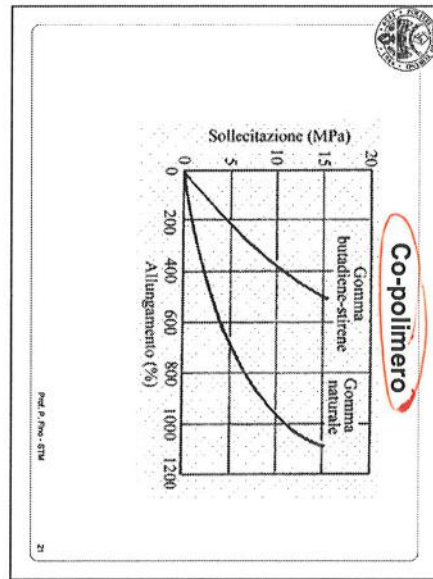
È particolarmente sensibile si immagina una sensibilità minima e si dimensiona come se il difetto fosse presente.

$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi c}$        $\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi c}$

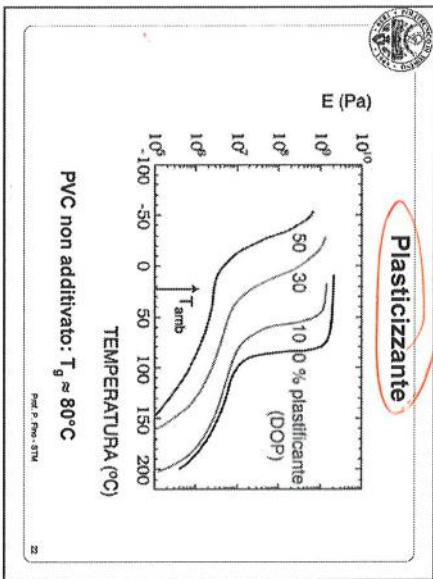
14

13





21/11/2014



11

**Rafforzamento dei polimeri**

Con trafilatura → **deliberato** allineamento delle molecole sotto **trazione**, per incrementare **significativamente rigidità e resistenza** nella direzione di **trazione**.

Lenza → nylon trafilato  
Un film di Mylar → PET con molecole allineate parallelamente al piano del film

I geotessili, usati per trattenere i banchi di terra → PE polietilene trafilato.

Prof. P. Pino - STPA

23

21/11/2014

**Rafforzamento dei polimeri**

**Cross-linking**

La formazione di legami trasversali genera legami forti tra le molecole che erano precedentemente connesse solo da deboli forze di Van der Waals.

La gomma vulcanizzata è una gomma nella quale sono stati generati dei legami trasversali.

Le resistenze più elevate delle resine epossidiche derivano loro dai legami trasversali.

Prof. P. Pino - STPA

24

12