



appunti
www.centroappunti.it

Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1161

DATA: 22/10/2014

APPUNTI

STUDENTE: Beghini

MATERIA: Scienza Tecnologie dei Materiali + Eserc.

Prof. Biamino

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 STUDENTI E NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

SCIENZE E TECNOLOGIE DEI MATERIAU

MATERIAU

• METALLI

- elementi metallici (e solo alcuni non metalli)
- atomi ordinati
- rigidi, dotti, conduttori di calore ed elettricità, opachi, soggetti a corrosione

• CERAMICI

- metalli + non metalli
- strutture cristalline o amorfe
- rigidi, fragili, isolanti da calore ed elettricità, resistenti a corrosione e alte temperature

• POLIMERI

- composti organici CH + eteroatomi
- dotti, poco rigidi, isolanti, bassa densità struttura semicristallina o amorfa

• COMPOSITI

si usa uno dei tre tipi precedenti di materiali come matrice e se ne migliorano alcune caratteristiche riconducibile delle altre tipologie.

PROPRIETÀ

FISICHE (maggioranze)

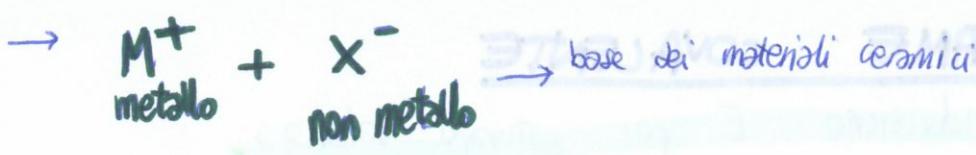
- densità
- meccaniche → risposta a sollecitazioni meccaniche (resistenza, rigidezza, durezza, resilienza, ...)
- termiche → risposta a sollecitazioni termiche (espansione, conducibilità, shock termico)
- elettriche e magnetiche → risposta a campi elettromagnetici (conducibilità elettrica)
- ottiche → assorbimento trasmissione deflessione

CHIMICHE

- composizione chimica, risposta a contatto con ambiente (proprietà superficiali, reattività, resistenza a corrosione)

SOLIDO IONICO

es MgO



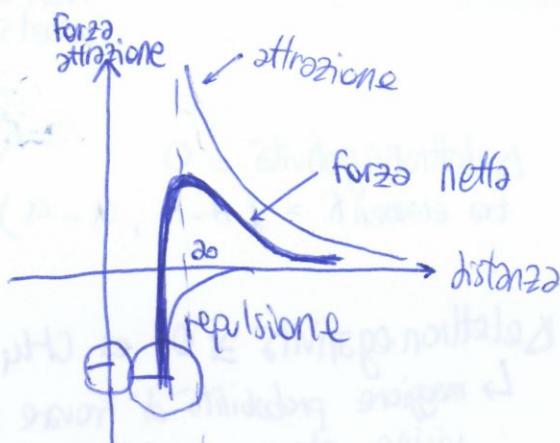
- forza di attrazione tipo coulombiano

- non direzionale

- reticolo cristallino ordinato

neutralità elettrica

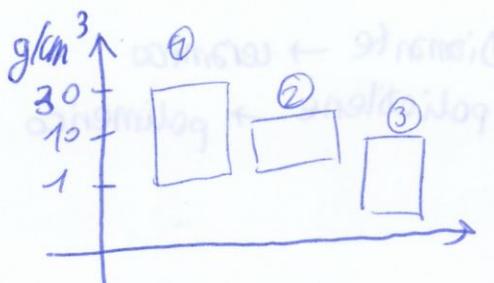
ingombro fisico



$$F_{\text{risultante}} = F_{\text{attr.}} + F_{\text{rep.}}$$

$$\frac{(2_1 e)(2_2 e)}{4 \pi \epsilon_0 a^2} - \frac{b}{a^n}$$

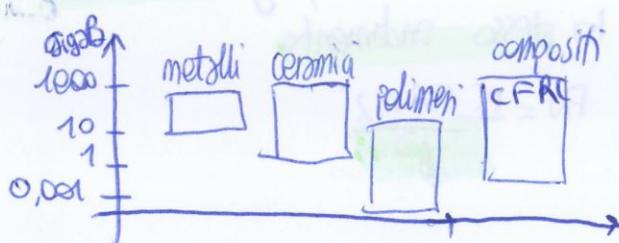
$$21,22 = n^{\circ} \bar{e}$$



DENSITÀ

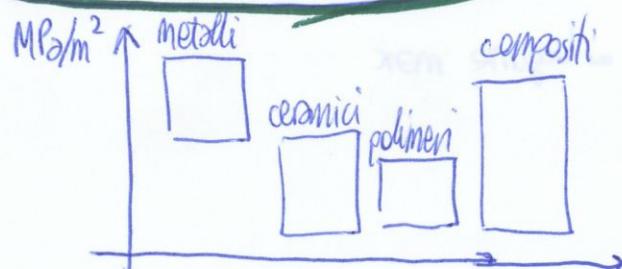
- ① metalli
- ② ceramici → verso estremità bassa metalli
- ③ polimeri → + leggeri
- ④ compositi → + leggeri dei polimeri

RIGIDEZZA



CFRC (composti rinforzati con fibra di carbonio)

TENACITÀ / FRATTURA



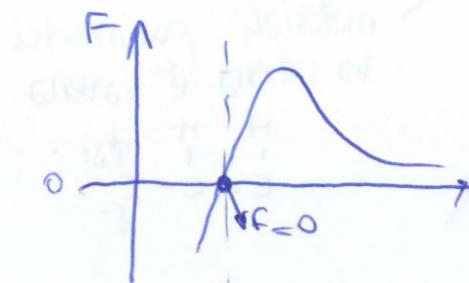
- andamento forza attrazione rispetto a distanza $\rightarrow \frac{1}{r^2}$
- andamento per forza repulsiva rispetto a distanza $\rightarrow \frac{\text{cost}}{r^n}$ $\rightarrow +$ pendere

distanza alla quale le forze si equiparano = lunghezza legame

FORZA-ENERGIA

$$E = \int_{\infty}^r F dr$$

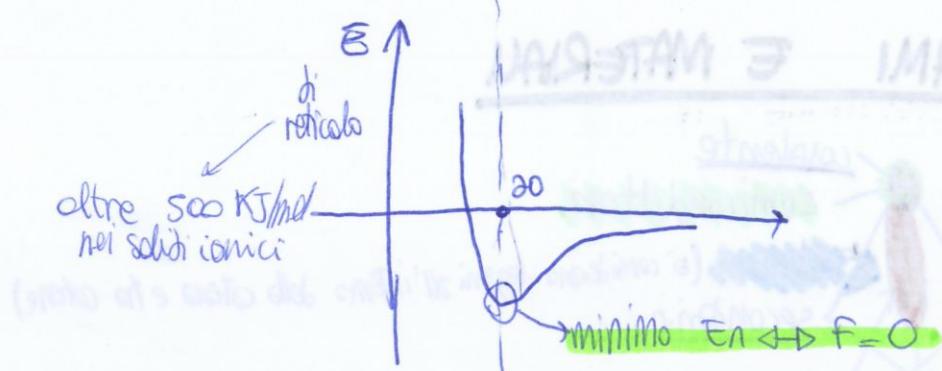
$$F = \frac{dE}{dr}$$



$\uparrow E_n.$

$\uparrow F.$ legame

$\uparrow T.$ fusione



ci vuole più energia per rompere legame e quindi si raggiunge T più alto prima di arrivare a fusione

solito andamento E di legame

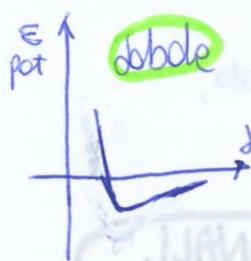
$$E(\text{kJ/mole}) \approx (70 - 900)$$

classe molto vasta	mercurio 68 kJ/mol $T_f = -39^\circ\text{C}$	Tungsteno 850 kJ/mol $T_f = 3410^\circ\text{C}$
-----------------------	--	---

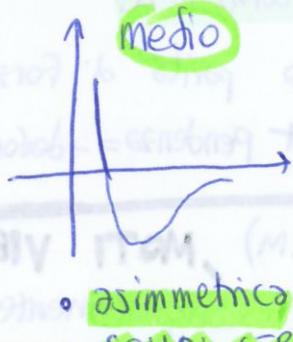


CLASSIFICAZIONE DEI SOLIDI

CURNE CONDON-MORSE



- molto asimmetrica
- METALLI



- asimmetrica
- SOLIDI CERAMICI IONICI

SOLIDO	IONICO	COVALENTE	METALLICO	MOLECOLARE
particelle nelle posizioni reticolari	ioni (cationi e anioni)	atomi	ioni positivi	Molecole
Tipo legame	Attrazione coulombiana	Attrazione fra nuclei e elettroni condivisi	Attrazione cationi e elettroni	Van der Waals
FORTE	FORTE	MEDIO-FORTE	MEDIO-FORTE	DEBOLE
elettroni liberi	No	No	Sì	No
Proprietà	<ul style="list-style-type: none"> duro e fragile alto punto fusione isolante 	<ul style="list-style-type: none"> duro e fragile alto punto fusione isolante 	<ul style="list-style-type: none"> durezza medio-alto punto di fusione medio-alto conduttore 	<ul style="list-style-type: none"> bassa rigidità Basso punto fusione isolante
Esempi	NaCl, KNO ₃ , CERAMI	C, SiC, SiO ₂ , CERAMI	Na, W, Fe METALLI	H ₂ , CO ₂ , H ₂ O polimeri

I V U

- poco asimmetrica
- SOLIDI CERAMICI CON COVALENTE

- Aumenta energia/forza legame

+ aumenta T. fusione

+ aumenta rigidità (modulo elastico)

+ aumenta stabilità chimica (- ossidazione e corrosione)

- diminuisce espansione termica

Maggiore in valore assoluto l'energia che occorre per rompere i legami tra particelle.

Richiesta meno Energia per separare/spezzare legami deboli con al maggiore.

Tfusione:

polimeri < metalli < ceramici

METALLI

PROPRIETÀ → legami metallici

- alte resistenze (resistenza meccanica)
- rigidi
- dotti (si deformano prima di rompersi)
- conduttori calore, elettricità
- resistenti a sbalzi termici
- soggetti a corrosione ed ossidazione
- facilmente lavorabili

• costituiti



- sono cristallini
- preparati per fusione
- quasi tutti solidi a temperatura ambiente (*Hg)
- originano leghe (acciaio, ghisa, leghe alluminio e rame...)

CERAMICI

PROPRIETÀ

- fragili (no deformazione), difficilmente lavorabili
- molto rigidi
- elevata durezza
- isolanti
- refrattari (resistono ad alte T) } perché legami stabili
- chimicamente inerti
- di norma sono cristallini
- combinazioni di metalli O, N, C, B: ossidi (Al_2O_3), carburi (SiC), nituri (Si_3N_4), boruri (TiB_2)
- maggior parte sostanze minerali appartengono a questa categoria
- fondono a T elevate
- preparati per sintetizzazione, MAI fusione (sarebbero necessarie T troppo alte).

es. mattoni, piastrelle, vetri, protesi, ecc. (si estraggono in forma ceramica e poi si elaborano per ricavarne metalli).

Classificati a secondo della **MATRICE**

POLIMERICA (PMC)

METALLICA (MMC)

CERAMICA (CMC)

dei **RINFORZI**

POLIMERICA (fibre Kevlar)

METALLICA (tondini acciaio nel cemento armato)

CERAMICA (particelle carburo-silicio nelle leghe Al, fibre di vetro (vetro resina), carbonio)

(infestazione glicosidici e insorgenti → parassitosi → infestazione)

(cimici) Stanchezza minacciosa → infestazione

spighe → infestazione delle spighe → infestazione

piante → infestazione delle piante

SCHEMI
POLIFENOLICI

ANTIFERRO

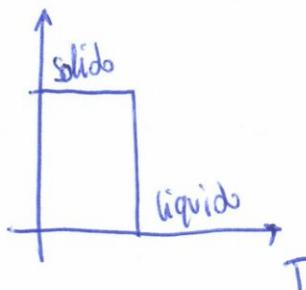
AF20M14



STRUTURA

CRISTALLINA

T_{fusione} ben definita



AMORFA

non T_f fusione ma RAMMOLIMENTO
progressivo all'aumentare di T



Volume specifico
= inverso densità =
volume per unità di massa



equivalente a Tf
materiali cristallini
(anche se è un
intervallo per gli
amorfi).

STRUTTURE CRYSTALLINE

Forze tra gli atomi determinano le rispettive distanze di equilibrio che originano strutture regolari.

Distanza d'equilibrio = DISTANZA DI LEGAMIE

Posizioni geometriche definite sono mantenute dai legami chimici:

- dei cationi per i metalli
- delle catene per i polimeri
- da ioni o atomi per i ceramicci

TIPI DI RETICOLO CRISTALLINO

→ 7 tipi reticolo

CUBICO

$$a=b=c$$

$$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$$

TETRAEDRICA

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$$

ORTOROMBO

$$a \neq b \neq c$$

$$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$$

ROMBOEDRICO

tre assi uguali
egualmente inclinati

$$a=b=c$$

$$\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$$

MONOCUINO

$a \neq b \neq c$

$$\alpha=\gamma=90^\circ \neq \beta$$

Tre assi diseguali, una coppia non con angolo retto

TRICUINO

$a \neq b \neq c$

$$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$$

Tre assi \neq , inclinati in modo \neq , nessuno con angoli retti.

due assi uguali $\approx 120^\circ$
terzo asse con angoli retti

$$a=b \neq c, \alpha=\beta=90^\circ, \gamma=120^\circ$$

ESAGONALE

RETIKOLO SPAZIALE

cubo semplice
corpo centrale
facce centrali

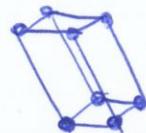
tetraedrica semplice
tetraedrica corpo centrale

ortorombico semplice
corpo centrale
assi centrali
facce centrali

Romboedrico semplice



semplice
a basi centrali

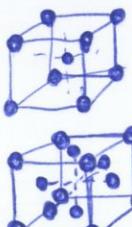


semplice



semplice

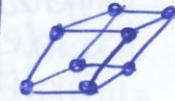
16 celle esagonali di Bravais



CUBICO



TETRAEDRICA



ROMBOEDRICO



ESAGONALE



ORTOROMBICO



MONOCUINO

- Numero di coordinazione \rightarrow n atomi primi vicini
NC

In questo caso ci si pone in corrispondenza dell'atomo centrale = 8

③ CFC

rame, alluminio, oro, nichel \rightarrow un atomo nei vertici

+ un atomo al centro di ogni faccia.

- atomi per cella $\rightarrow \frac{1}{8} \cdot 8 + \frac{1}{2} \cdot 6 = 4$

- relazione $R - a \rightarrow \sqrt{2}a = 4R$

- FCA $= 4 \cdot \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right) / a^3 = 0,76$



allineati non su diagonale cubo ma su diagonale faccia.

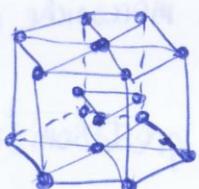
• NC = 12, ponendosi su atomo centrale di una faccia.

(4 ai vertici + 8 delle facce contigue)

si possono fare fogli molto sottili grazie all'alto fattore di compattazione per presenza di spazi di scorrimento.

④ EC

cadmio, magnesio, titanio, zinco, cobalto



- atomi per cella $\rightarrow 12 \cdot \frac{1}{6} + 2 \cdot \frac{1}{2} + 3 = 6$

- fattore compattazione $\rightarrow 0,76$

- numero coordinazione $\rightarrow 12$

6 atomi nei vertici
2 nel centro basi
3 nel centro cella

cella è molto compatta solo nelle basi \rightarrow

e non nel centro della cella.

ANISOTROPIA

proprietà diverse a seconda della direzione che si considera
sensibilità proprietà a seconda direzione

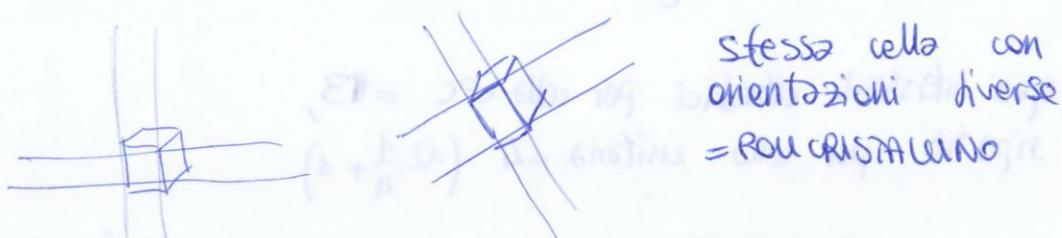
es. carbonio

- diamante → tetraedri di carbonio
- grafite → anelli esagonali carbonio a fogli sovrapposti.
- nanotubi di carbonio → singolo foglio graphite ripiegato a tubo
consente rigidità estremamente grande
- grafene → singolo foglio di graphite
- fullerene → fogli di graphite avvolti a sfera,

SOLIDI MONOCRISTALLINI (a singolo cristallo)

Atomi ordinati ripetutamente periodicamente per tutto il solido senza interruzione
celle cristalline tutte orientate nello stesso modo per formare monocristallo
e se lasciato libero di crescere, monocristallo assume forma geometrica
regolare

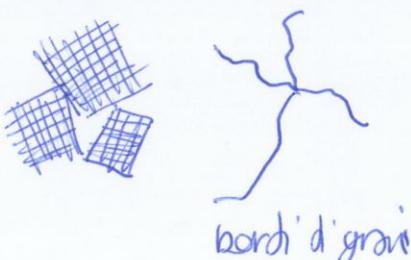
(es. silicio per microelettronica, LiNb₃ per laser, superleghe Ni per pale turbine)



SOLIDI POLICRISTALLINI

Solidi = aggregati di piccoli cristalli o grani.

Cioè i cristalli si accrescono con porzioni cristallizzate in modo diverso,
perché non sempre vi sono le condizioni
che permettono un medesimo orientamento
di tutti i grani



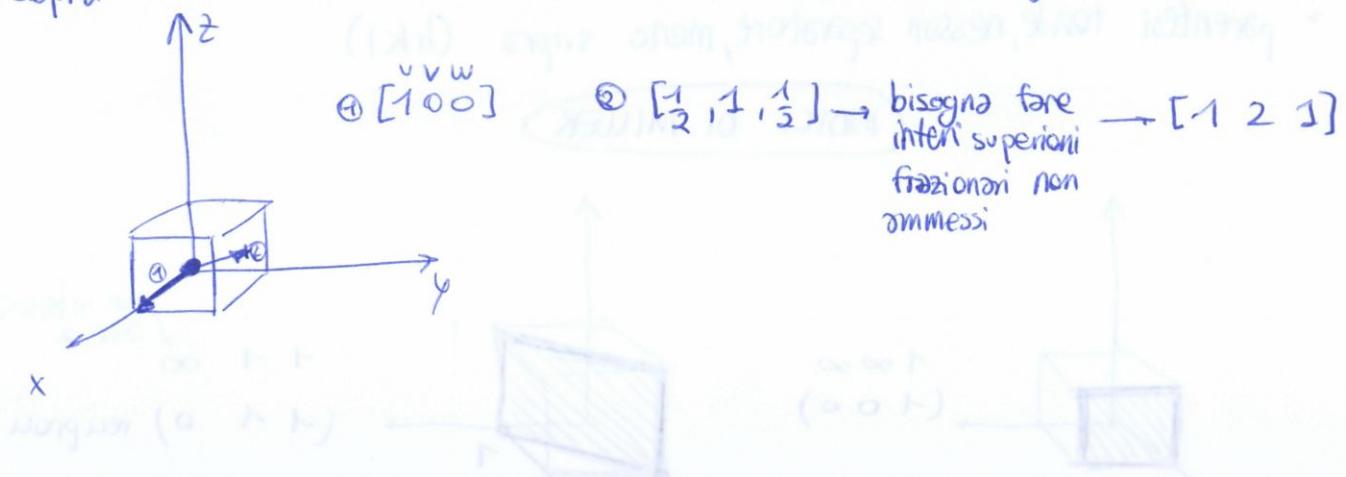
bordi d'grani



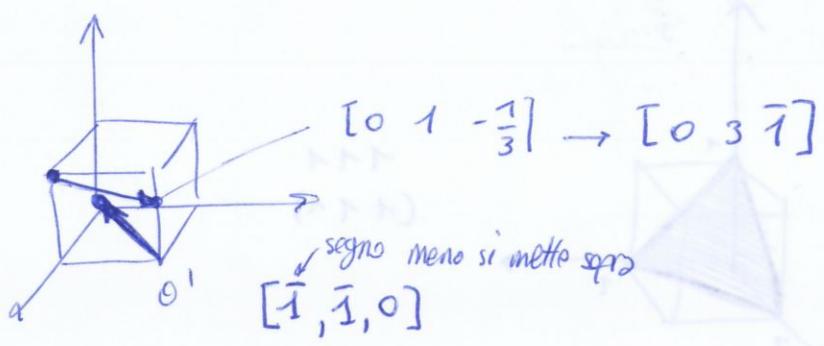
INDIVIZZAZIONE DIREZIONI

convenzionalmente gli indici delle direzioni sono raggruppati tra parentesi quadre senza essere separati da simboli [uvw].

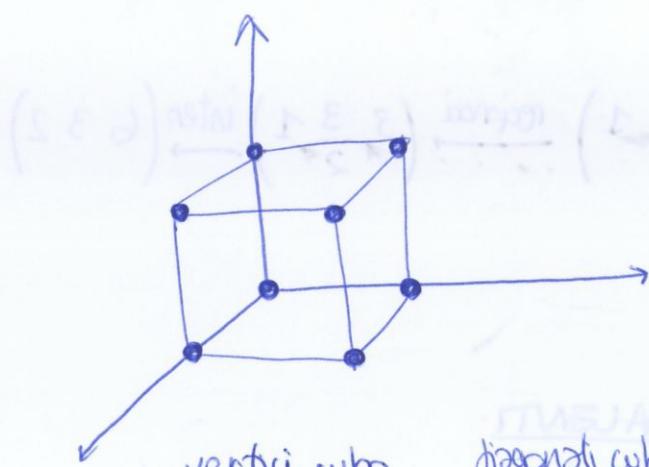
le componenti devono essere numeri interi, no frazionari, il segno meno si mette sopra



se punto di partenza non è nell'origine, si trasla l'origine stessa.



DIREZIONI CRYSTALLOGRAFICHE E EQUIVALENTI



vertici wba
 $\langle 100 \rangle$

$[100]$

$[010]$

$[001]$

$[-100]$

$[0-10]$

$[00-1]$

diagonali cubo
 $\langle 111 \rangle$

$[111]$

$[1-11]$

$[-111]$

$[11-1]$

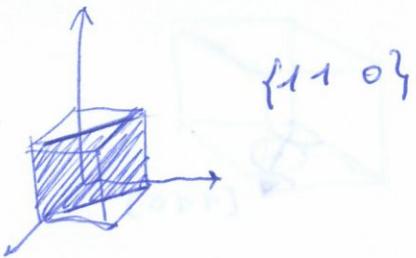
$[-111]$

$[-1-11]$

direzioni equivalenti costituiscono una famiglia che si rappresenta racchiudendo tutti i indici più semplici tra parentesi: $\langle uvw \rangle$

Direzioni cristalografiche equivalenti: in tali direzioni le distanze interatomiche sono le stesse.

Per esempio



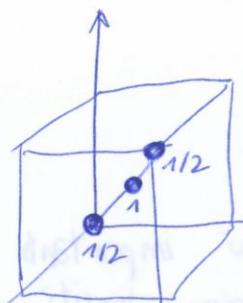
1103

DENSITÀ ATOMICA

$$\textcircled{1} \text{ LINEARE} = \frac{n^{\circ} \text{ atomi intersecati con un segmento}}{\text{lunghezza segmento}} \quad [\text{1/m}]$$

1103

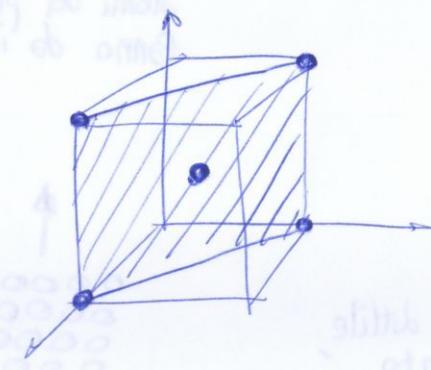
interseco 2 atomi completi



$$\frac{2 \text{ atomi}}{\sqrt{3} a} \quad \text{atomi/m}$$

diagonale
w/o

$$\textcircled{2} \text{ PLANARE} = \frac{n^{\circ} \text{ atomi sezionati}}{\text{area sezionata}} \quad [\text{1/m}^2]$$



$$\frac{2 \text{ atomi}}{2 \cdot \sqrt{2} a}$$

$$\textcircled{3} \text{ VOLUMETRICA TEORICA} = \frac{\text{massa atomi} \cdot \text{cella elementare}}{\text{volume cella elementare}} =$$

$$= \frac{n^{\circ} \text{ atomi per cella} \cdot \frac{\text{PA}}{\text{NAOGIORO}}}{\text{volume}} \quad [\text{g/m}^3]$$

ANISOTROPIA - ISOTROPIA

↓
proprietà non
variano in
base a
direzione
considerata

↓
proprietà non
variano in
base a direzione
considerata

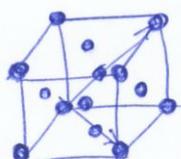
ad esempio : conducibilità termica ed elettrica, modulo elastico → vedi scorrimento

precedente
per monocrystallini

I materiali policristallini sono generalmente isotropi perché distribuzione casuale di tanti monocrystalli (grani), ma se i grani si orientano in direzione preferenziale allora ha tessitura e posso perdere l'isotropia.

(orientazione grani = tessitura)

es. Al (CFC)



$E_x, E_y, E_z \rightarrow \bar{E}$ valore medio tra moduli elastici delle varie direzioni

CFC

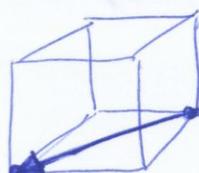
→ un piano di scorrimento {111}

→ sistemi di scorrimento già attivi a T ambiente

→ direzioni di scorrimento

$\langle 1\bar{1}0 \rangle$

$1-10$



↓
triangolo equilatero con atomi interni in tangenza

cioè direzione con atomi in tangenza

Le altre direzioni di scorrimento sono



→ Numero sistemi di scorrimento (12 direzioni e 12 piani) → 12

Esempio: densità volumetrica coi GFC (=4 atomi per cella elementare)

$$a = 0.3615 \text{ nm}$$

$$\omega = 63.5 \text{ g/mol}$$

$$\frac{M}{V} = \frac{63.5}{\frac{6.023 \cdot 10^{23}}{(0.3615 \cdot 10^{-7})^3}} \cdot 4 = 8.96 \text{ g/cm}^3$$

→ densità teorica data dall'impacchettamento atomi nella cella elementare

DENSITÀ MATERIALI

generale: $P_{\text{metalli}} > P_{\text{ceramici}} > P_{\text{polimeri}}$

↓
impacchettamenti compatti (legame metallico)
ha più peso per ciascuna cella elementare per elevato n° atomi con p.A elevati

↓
impacchettamenti meno densi (metallo e non metallo), perché hanno atomi relativamente leggeri (non metalli)

↓
impacchettamenti poco densi, spesso amorfi, elementi leggeri (C, H, O)

↓
compositi
valori intermedi

RETICOLI CRYSTALLINI - DISTANZA TRA PIANI PARALLELI

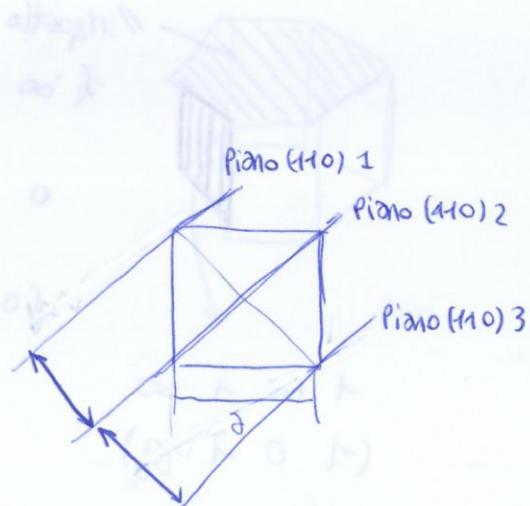
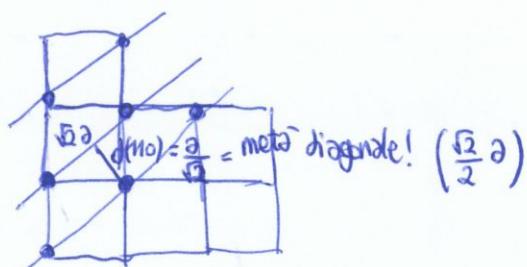
Piani paralleli = indici di Miller

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} = \text{distanza interplanare tra piani paralleli in una cella unitaria}$$

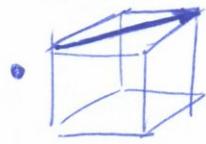
$a = \text{costante reticolare} = 2.316$

Esempio: piani (110) cella cubica

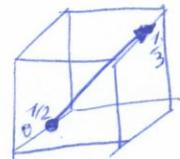
$$d_{110} = \frac{a}{\sqrt{1^2 + 1^2 + 0^2}} = \frac{a}{\sqrt{2}}$$



Esercizi



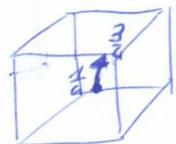
$[\bar{1} \ 1 \ 1]$



$$\left(-\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3}\right), 1, 1\right)$$

$$\left[\frac{\bar{1}}{6}, 1, 1\right]$$

$$[1, 6, 6]$$



$$1, \frac{2}{4}, 1$$

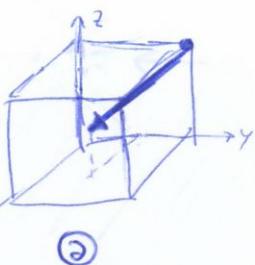
$$[4, 2, 4]$$



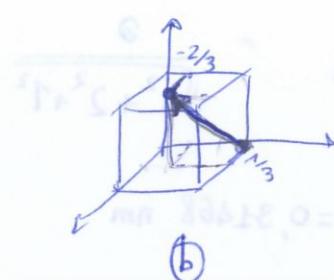
$$1, -1, \frac{1}{4}$$

$$[4, \bar{4}, 1]$$

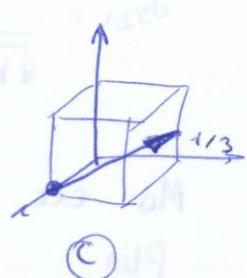
$$\bullet \textcircled{a} [1 \bar{1} \bar{2}] \rightarrow \frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, 1$$



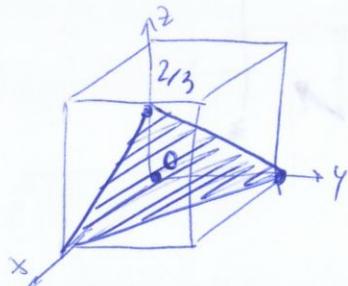
$$\textcircled{b} [1 \bar{2} 3] \rightarrow \frac{1}{3}, \frac{2}{3}, 1$$



$$\textcircled{c} [\bar{3} 3 1] \rightarrow 1, 1, \frac{1}{3}$$



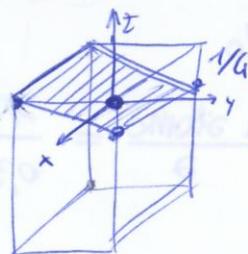
Dividere per numero più grande!



$$(1 \ 1 \ \frac{2}{3})$$

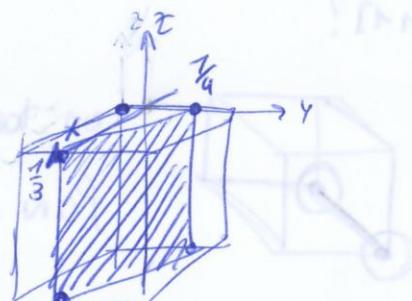
↓ reciproco per piani

$$(1 \ 1 \ 3)$$



$$\infty -1 \frac{1}{4}$$

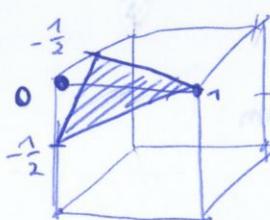
$$(0 \ \frac{1}{4} \bar{4})$$



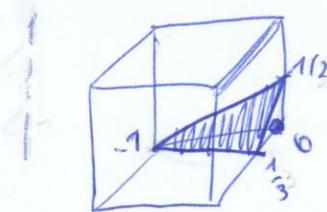
$$(0 \ 1 \ \frac{12}{5})$$

$$(0 \ 5 \ 12)$$

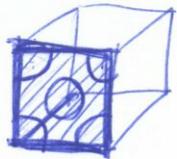
$$\bullet (\bar{2} \ 1 \ \bar{2}) \xrightarrow{\text{reciproci}} -\frac{1}{2} \ 1 \ -\frac{1}{2}$$



$$(3 \bar{1} 2) \rightarrow \frac{1}{3} -1 \frac{1}{2}$$



④



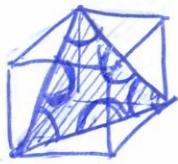
$$\rho_{PL} = \frac{2 \text{ atomi}}{0,40856^2}$$

⑤



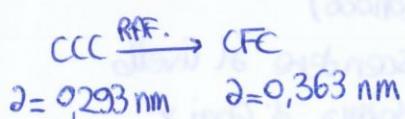
$$\rho_{PL} = \frac{2 \text{ atomi}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot a}$$

⑥



$$\rho_{PL} = \frac{\frac{3}{6} \cdot \frac{1}{6} + \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{2}}{(\sqrt{2} \cdot a) \cdot (\sqrt{2} \cdot a \cdot \sin 60^\circ)} \cdot \frac{1}{2}$$

- Fe 912°C



$$V_{\text{CCC}} = a^3 = 0,293^3 = 0,0251 \text{ nm}^3$$

$$V_{\text{CFC}} = 0,363^3 = 0,0478 \text{ nm}^3$$

 $\Delta V?$

$$\text{CCC} = \frac{\text{atomi}}{\text{cello}} = 8 \cdot \frac{1}{8} + 1 = 2$$

$$\text{CFC} = 8 \cdot \frac{1}{8} + 6 \cdot \frac{1}{2} = 4$$

$$\frac{V_{\text{CCC}}}{\text{ATOMO}} = \frac{0,0251}{2} = 0,0125$$

$$\frac{V_{\text{CFC}}}{\text{ATOMO}} = \frac{0,0478}{4} = 0,01195$$

$$\Delta V = \frac{\frac{\text{finale}}{\text{iniziale}} - \frac{\text{iniziale}}{\text{iniziale}}}{0,0125} \cdot 100 = -4,4\%$$

$$\boxed{\Delta V = \frac{\frac{V_{\text{ATOMO finale}}}{V_{\text{ATOMO iniz.}}} - \frac{V_{\text{ATOMO iniz.}}}{V_{\text{ATOMO iniz.}}}}{V_{\text{ATOMO iniz.}}} \cdot 100}$$

- PROBLEMATICA? Au CFC $a = 0,4078 \text{ nm}$ $\rho_A = 196,98 \text{ g/mol}$

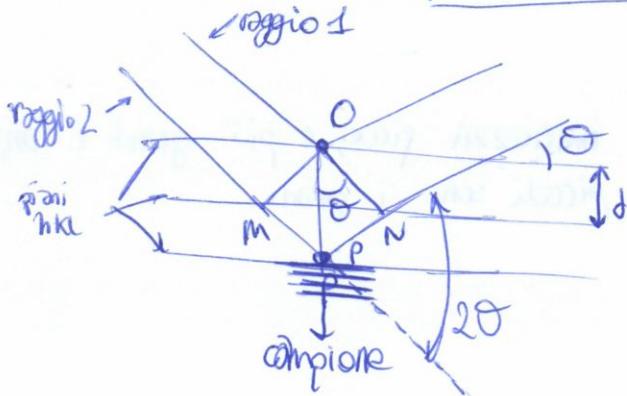
$$\frac{M}{V} = \frac{\text{4 atomi} \cdot \rho_A}{N_A \cdot a^3}$$

LEGGE BRAGG

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d_{hkl} \cdot \sin \theta$$

$$d_{hkl} = \frac{2}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

con λ costante per lo strumento che si utilizza.



θ = angolo di Bragg.

2θ = angolo di diffrazione

$(MP + PN) = n^\circ$ intero lunghezze λ band

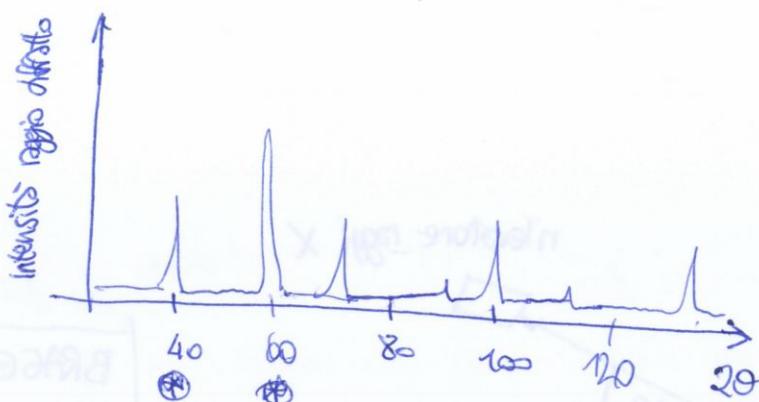


grafico ottenuto facendo variare θ da 0° a 90°

$$\frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \theta_2} = \frac{\sin^2 2\theta}{\sin^2 60^\circ} = 0,5$$

si tratta di ccc

$$ccc = h+h+l = pari$$

$$cfc = h, k, l \text{ tutti dispari o tutti pari}$$

} costruttivo

$$ccc = h+k+l = dispari$$

$$cfc = h, k, l \text{ non tutti dispari o tutti pari}$$

} distruttivo.

per reticolo ccc i primi piani sono $\{110\}$ e $\{200\}$

$$\frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \theta_2} = \frac{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2}{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2} = \frac{1^2 + 1^2 + 0^2}{2^2 + 0^2 + 0^2} = 0,5$$

per reticolo CFC i primi piani sono $\{111\}$ e $\{2\}$

$$\frac{\sin^2 \theta_1}{\sin^2 \theta_2} = \frac{h_1^2 + k_1^2 + l_1^2}{h_2^2 + k_2^2 + l_2^2} = \frac{1^2 + 1^2 + 1^2}{2^2 + 0^2 + 0^2} = 0,75$$

Quindi si prendono gli angoli delle prime due diffrazioni e il risultato è 0,5 si sa che è in ccc facendo rapporti degli angoli al quadrato.

Sono stati catalogati gli spettri di tutti i materiali e per fare confronti si controllano:

① POSIZIONE PICCHI

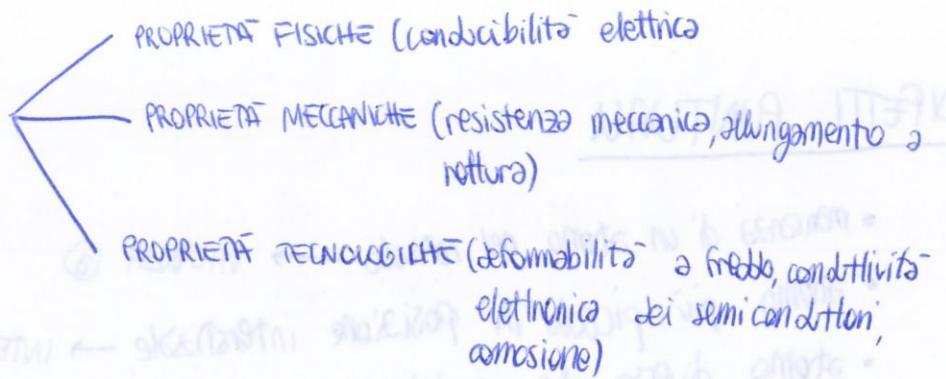
② INTENSITÀ PICCHI

DIFETTI NEI SOUDI

CRISTALLINI

Le proprietà di alcuni materiali sono profondamente influenzate (e spesso migliorate) dalle imperfezioni.

I difetti influenzano



Controllando le imperfezioni reticolari si ottengono materiali con proprietà che inizialmente non possedevano.

In realtà sia i materiali monofase che policristallini non sono perfetti su scala macroscopica, ma sono ricchi di **DIFETTI RETICOLARI**: luoghi dove viene meno la periodicità della struttura cristallina.

- ① PUNTUALI
- ② LINEARI
- ③ DI SUPERFICIE

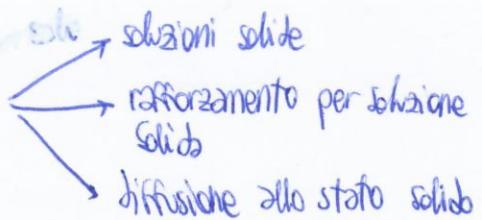
} in base alla dimensione

DIFETTO RETICOLARE = irregolarità del reticolo cristallino di un materiale che ha dimensioni dell'ordine della scala atomica (irregolarità nella periodicità)

- ① PUNTUALI

- a) VACANZE
- b) INTERSTIZIALI
- c) SOSTITUZIONALI

} influenzano



IMPUREZZE NEI SOLIDI

Tutti solidi reali sono impuri, difficile purezza > 99,999% → 10^{22} , 10^{23} atomi di impurezze per m^3

Impurezza può essere anche intenzionale: Cu in Ag → leghe

Per fare questo si ricorre a soluzioni solide

SOLVENTE: elemento presente in quantità maggiore

SOLUTO: elemento presente in quantità minore

in posizione interstiziale → atomo piccolo

in posizione sostituzionale → dimensioni non troppo diverse dell'atomo da sostituire

Soluzione solida di B(soluto) in A(solvente)

sostituzionale
interstiziale



SOLUZIONE SOLIDA SOSTITUZIONALE

Atomi di soluto sostituiscono alcuni atomi del reticolto ospitante (solvente).

Sono tollerate concentrazioni di soluto MOLTO ALTE, si può arrivare a SOLUBILITÀ TOTALE se sono rispettate le

REGOLE DI HUME-ROTHERY

- per 100% solubilità sostituzionale (es. Cu, Ni) {
 - ① differenza raggio atomico < 15% : FATTORE DIMENSIONE
 - ② soluto e solvente stessa struttura cristallina : FATTORE STRUTTURA CRIStALLINA (CCO, CFC, EC)
 - ③ bassa differenza di elettronegatività (altrimenti legame, in tal caso si parla di composti intermetallici): FATTORE ELETTRONEGATIVITÀ
 - ④ stessa valenza: FATTORE VALENZA
vale sia per metalli che per ceramici

COMPOSIZIONE DI UNA LEGA

- frazioni massiche, wt %
- frazioni atomiche, at %

lega binaria A-B

$$\rightarrow \text{frazione massica} \Rightarrow w_A = \frac{M_A}{M_{TOT}} = \frac{M_A}{M_A + M_B} \quad w_B = \frac{M_B}{M_{TOT}}$$

$$\rightarrow \text{frazione atomica} \Rightarrow z_A = \frac{Z_A}{Z_{TOT}}$$

$w_i \rightarrow z_i$

$$(70 \text{ wt\%}) \text{ Al} - (30 \text{ wt\%}) \text{ Cu}$$

- base di calcolo: 100g materiale

$$\text{Al} \rightarrow 70 \text{ g} \quad \text{Cu} \rightarrow 30 \text{ g}$$

- moli corrispondenti

$$n_{\text{Al}} = \frac{m_{\text{Al}}}{M_{\text{Al}}} = 2,59 \text{ mol} \rightarrow z_{\text{Al}} = \frac{n_{\text{Al}}}{n_{\text{Al}} + n_{\text{Cu}}} = 0,846$$

$$n_{\text{Cu}} = \frac{m_{\text{Cu}}}{M_{\text{Cu}}} = 0,172 \text{ mol} \rightarrow z_{\text{Cu}} = \frac{n_{\text{Cu}}}{n_{\text{Al}} + n_{\text{Cu}}} = 0,154$$

c'è differenza tra percentuali atomiche e in peso!

$z_i \rightarrow w_i$

$$\text{Al} (60 \text{ at\%}) - \text{Cu} (40 \text{ at\%})$$

- base di calcolo: 100 moli

$$\text{Al} \rightarrow 60 \text{ moli} \quad \text{Cu} \rightarrow 40 \text{ moli}$$

- grammi corrispondenti

$$m_{\text{Al}} = n_{\text{Al}} \cdot M_{\text{Al}}$$

$$m_{\text{Cu}} = n_{\text{Cu}} \cdot M_{\text{Cu}}$$

$$w_{\text{Al}} = \frac{m_{\text{Al}}}{M_{\text{TOT}}} = 0,389 \quad w_{\text{Cu}} = \frac{m_{\text{Cu}}}{M_{\text{TOT}}} = 0,611$$

INFUENZA SOLUZIONI SUDA SU PROPRIETÀ OTICHE

sostituzionali
nel reticolo
di alluminio

Fe, Titanio → blu (zaffiro)
Cromo → rosso (rubino)

MICROSCOPI

a forza atomica AFM

elettronico a trasmissione HR-TEM
(high resolution)

Microscopio

ottico

SEM → elettronico a scansione (nm)

TEM < nm

HR-TEM → livello atomico

AFM

grani,
seconde fasi/precipitati

dislocazioni

SEM

e^- → \bar{e}^- → detector → analisi elettroni riflessi

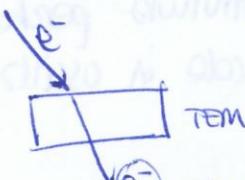
campione

camera in vuoto per far colpire
elettroni

campione conduttivo, se materiale
è isolante si fa una doratura
per renderlo conduttivo
(film di pochi atomi)

microscopio elettronico

TEM



microscopio elettronico

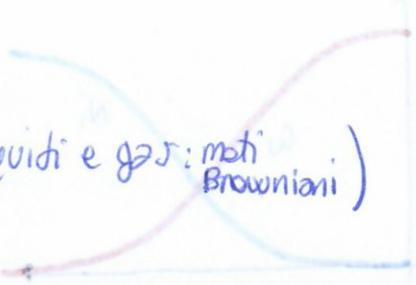
Detector: vanno analizzati al detector elettroni trasmessi,
non riflessi

campione deve essere attraversato dagli elettroni,
quindi campione deve essere molto sottile ($< 1 \text{ mm}$)

DIFFUSIONE

Trasporto materia per movimento di atomi.

Avviene sia nei liquidi che nei solidi → (liquidi e gas: moto Browniano)



La diffusione riguarda:

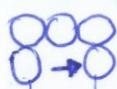
- ① VACANZE
- ② ATOMI INTERSTIZIALI

DIFFUSIONE VACANZE

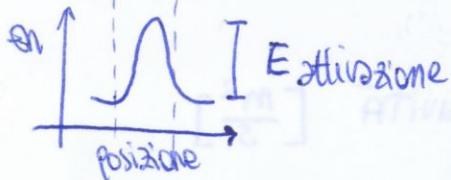
In assenza di forze esterne la diffusione ha direzione casuale, non ha direzioni preferenziali (AUTODIFFUSIONE)

L'energia di attivazione influenza sulla capacità di diffusione degli atomi (e quindi delle vacanze)

Se c'è un gradiente di concentrazione, la diffusione avviene in modo da aumentare l'entropia del sistema (si realizza una miscelazione)

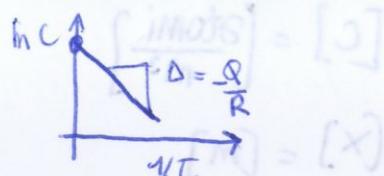


Se l'atomo supera Energia di attivazione allora si innesta la diffusione



$$P = e^{-\frac{E_a}{RT}}$$

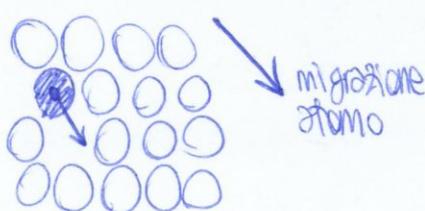
PROBABILITÀ DI INNESTO



$$\ln v = \ln C - \frac{E_a}{RT} \cdot \frac{1}{T}$$

LEGGE ARRHENIUS

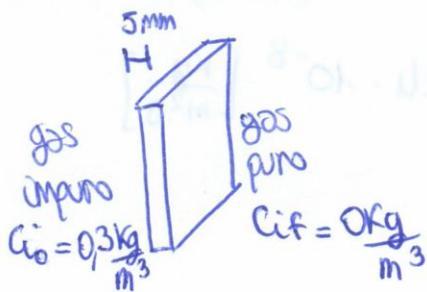
Modello lineare, più comodo per descrivere diffusione



migrazione vacanza,
sempre opposta
a direzione in cui
migra atomo

Esercizio ①

Foglio di palladio



$$A = 0,2 \text{ m}^2$$

$$D = 1 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$$

Massa d' H_2 che purifica ogni ora?

Ho diffusione stazionaria \rightarrow uso 1^a legge Fick

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x}$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\text{concentrazione finale} - \text{concentrazione iniziale}}{\text{spessore lamina}}$$

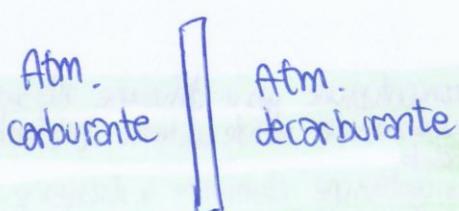
$$J = 1 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0 - 0,3}{0,005} \left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right] \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \left[\frac{1}{\text{m}} \right] = 6 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$$

$$6 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \cdot 0,2 \text{ m}^2 = 1,2 \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] = 1,32 \left[\frac{\text{kg}}{\text{ore}} \right]$$

Esercizio ②

Cementazione acciaio

700 °C



$$D = 3 \cdot 10^{-11} [\text{m}^2/\text{s}]$$

Calcolare J del C se la c_i a 5 mm è 1,2 e 0,8 kg/m^3

x	c_i
5 mm	1,2 kg/m^3
10 mm	0,8 kg/m^3

Esercizio ①

Piastra di acciaio

$C_0 = 0,25\%$ in peso di carbonio

Trattato a 950° in contatto con atm. carburante che porta e mantiene a $1,2\%$ in peso = C_s

Quanto ci vuole per avere un contenuto di C pari a $0,8\% = C_x$ in peso a $x = 0,5 \text{ mm}$?

$$C_0 = 0,25\%$$

$$C_s = 1,2\%$$

$$C_x = 0,8\%$$

$$D = 1,6 \cdot 10^{-11} [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

$$\frac{0,8 - 0,25}{1,2 - 0,25} = 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{0,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}}{2\sqrt{1,6 \cdot 10^{-11} \cdot t}} \right]$$

$$0,6210 = \operatorname{erf}(8)$$

Da tabella:

$$\begin{array}{ccc} 0,3794 & < & 0,4210 & < & 0,4284 \\ 0,35 & < & z & < & 0,40 \end{array}$$

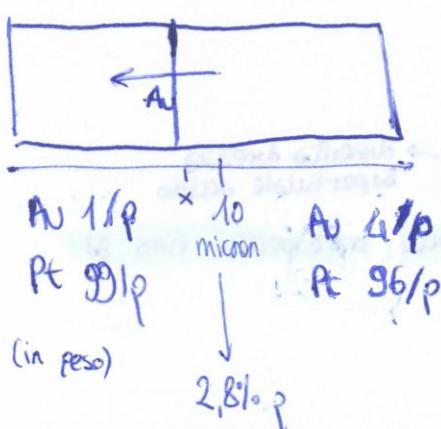
Faccendo interpolazione

$$\frac{z - 0,35}{0,40 - 0,35} = \frac{0,4210 - 0,3794}{0,4284 - 0,3794} \Rightarrow z = 0,392$$

$$t = 7,1 \text{ h}$$

Esercizio: coppie di diffusione Pt-Au, TERMOCAPPIE

Pt Au Pt Au t?



Au 1/p 10 micron
Pt 99/p
(in peso)

$$D_0 = 1,3 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$Q = 252000 \frac{J}{mol}$$

$$T = 1273 K$$

2,8% p

L'oro va verso l'ormina con concentrazione minore, cioè verso sx.

Calcolare t tale che la percentuale è 28% Au

$$28 = \left(\frac{1+4}{2} \right) - \left(\frac{1-4}{2} \right) \text{erf} \left(\frac{10 \cdot 10^{-6}}{2\sqrt{Dt}} \right)$$

10 micron

funzione dell'errore

$$D = D_0 \cdot e^{-Q/RT} = 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-252000/8,314 \cdot 1273} = 5,9 \cdot 10^{-16} m^2/s$$

$$0,2 = \text{erf} \left(\frac{206}{\sqrt{t}} \right)$$

$$\rightarrow z = \frac{x}{2\sqrt{Dt}}$$

z	$\text{erf}(z)$
0,15	0,1680
0,20	0,2227

② $\rightarrow 0,2$ interpolazione di z dai due punti

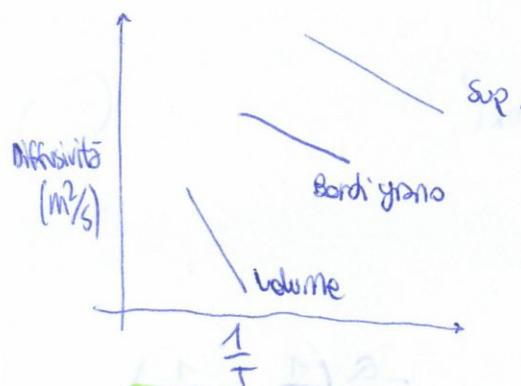


$$\frac{2 - 0,15}{0,20 - 0,15} = \frac{0,2 - 0,1680}{0,2227 - 0,1680} = 0,179$$

$$0,179 = \frac{206}{\sqrt{t}}$$

$$t = 15,3 \text{ giorni}$$

TIPI DI DIFFUSIONE: MASSIVA - SUPERFICIALE - AI BORDI DI GRANO



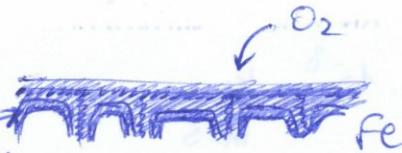
$$D_{\text{volume}} < D_{\text{bordo grano}} < D_{\text{superficie}}$$

$Q_{\text{volume}} > Q_{\text{bordo grano}} > Q_{\text{sup.}}$

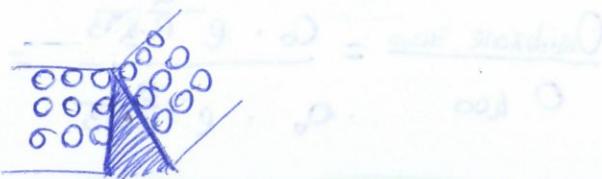
Sono diverse le energie di attivazione della diffusione.

In particolare En. di attivazione (Q) per caso superficiale è minore di Nati.

Limite
di penetrazione
dell'istante t



ossigeno attacca prima superficie e poi i bordi di ciascun grano piuttosto che il volume all'interno.



piani cristallini con orientazione diversa, si formano spazi tra questi piani
⇒ corrosione intergranulare

* autodiffusione è la più lenta di tutte:

interstiziale > sostituzionale > autodiffusione

+

∇ diffusione

-

interstiziale non necessita di vacanze per avvenire

* può capitare per gli ossidi che la diffusione di sostanze come l'ossigeno avvenga accompagnata dall'attivazione di reazioni chimiche.

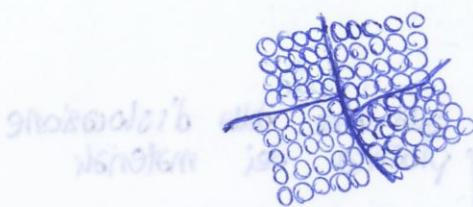
DIFETTI DI SUPERFICIE

- **SUPERFICI ESTERNE** → è difetto perché atomi che ne fanno parte non hanno massimo numero di legami consentito e quindi sono più reattivi



— sup esposte ad esempio a ossidazione e corrosione, sfruttate da catalizzatori

- **BORDI DI GRANO** → superfici di separazione tra due piani orientati in modo diverso, sono difetti superficiali che separano due grani adiacenti nei solidi policristallini.
Sono porzioni di spazio che misurano da due a cinque diametri atomici di larghezza.



medesima disposizione reciproca degli atomi ma su piani diversi

bordi di grano ↗ ricchi di legami distorti, impurezze, dislocazioni, atomi con NC inferiore
zone ad elevata reattività chimica, diffusività e mobilità evidenziabili da opportune reazioni chimiche (attacco chimico)

può anche accadere che avvengano scomimenti del materiale lungo bordi di grano



superficie non attaccata chimicamente



superficie attaccata chimicamente lungo bordi di grano.
sup. attaccate in modo diverso, riflettono in modo diverso

} osservazione bordi di grano mediante microscopia ottica

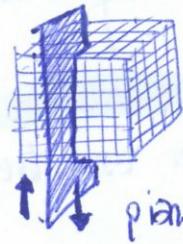
osservato con chiaro effetto chiaroscuro

effetto chiaroscuro

vettore di Burgers è \perp alla linea di dislocazione a spigolo (asse)

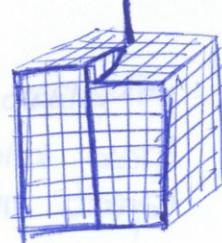
DISLOCAZIONE A VITE

reticolo perfetto



piano di taglio

linea di dislocazione a vite



Si forma quando il reticolo cristallino viene sottoposto ad uno sforzo di taglio. Caratterizzati da formazione di una rampa a spirale di atomi.

Il vettore di Burgers è parallelo all'asse di dislocazione.

Entrambe le dislocazioni hanno assi che attraversano INTERAMENTE il reticolo

TENSIONI ELASTICHE INDOTTI DA DISLOCAZIONI

Nelle dislocazioni

a spigolo

→ sopra asse dislocazione → compressione
(c'è più densità di atomi)
sotto asse dislocazione → trazione

Nelle dislocazioni a vite



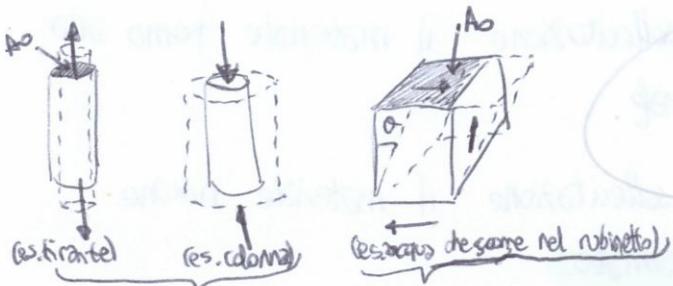
DISLOCAZIONI MISTE

Somma dislocazioni a spigolo e a vite

linee di dislocazione sono visibili al microscopio, per il resto il reticolo rimane perfetto.

CARICO APPLICATO - SFORZO - DEFORMAZIONE

CARICO - SFORZO

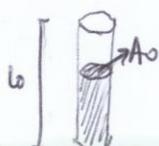


SFORZO (σ)

SFORZO DI TAGLIO (τ)

$$\rightarrow \frac{F}{A} \left[\frac{N}{m^2} \circ Pa \right]$$

DEFORMAZIONE E in seguito a trazione e compressione assiale

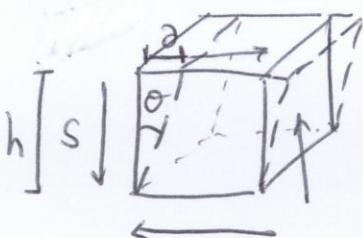


$$E = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

l_0 = lunghezza iniziale

l = lunghezza finale dopo deformazione

DEFORMAZIONE γ in seguito a taglio



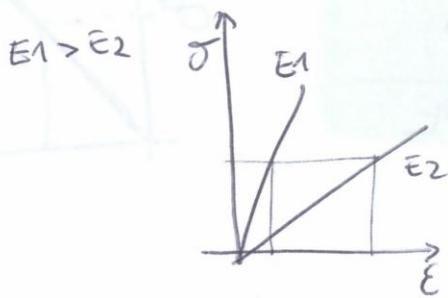
$$\gamma = \frac{\theta}{h} = \operatorname{tg} \theta$$

θ = angolo di taglio

se θ piccolo $\operatorname{tg} \theta \approx \theta$

s = sollecitazione / forza di taglio

Modulo elastico maggiore = rigidità maggiore → in realtà indica rigidità non elasticità



ϵ_2 si deforma di più, - rigido

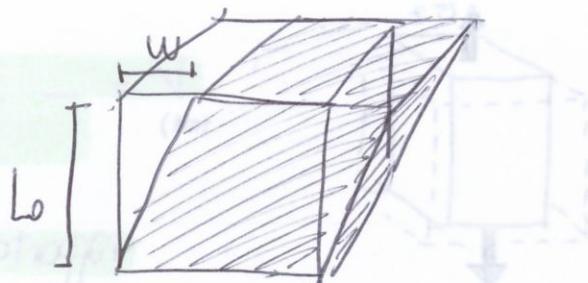
DEFORMAZIONE ELASTICA DI TAGLIO

$$T = G \cdot \gamma$$

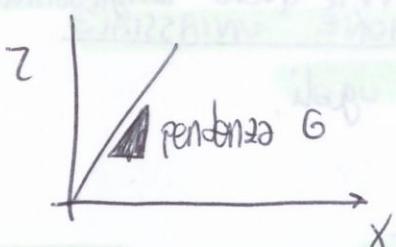
↓
sforzo di
Taglio
applicato

↓
modulo
elastico
di taglio

↓
deformazione
elastica



$$\gamma = \frac{w}{L_0}$$



Deformandosi elasticamente il materiale immagazzina energia
rilasciata quando cessa sollecitazione.

$$dW = \frac{F \cdot dL}{A \cdot I} = \sigma d\epsilon$$

Lavoro per unità
di volume

$$\left[\frac{J}{m^3} \right]$$

⑥ modulo Poisson: $0 < \nu < 0,5$

aumenta volume per trazione, tipico dei metalli ($\approx 0,3$) e della gran parte dei materiali.

Tra 0,3 e 0,25 → maggior parte materiali

se $\nu = 0,25$

$$|\epsilon_x| = 1/\nu \epsilon_z \quad |\epsilon_y| = 1/\nu \epsilon_z$$

$$|\epsilon_x| + |\epsilon_y| = 1/2 \neq \epsilon_z$$

Volume per trazione aumenta più longitudinalmente di quanto si riduce trasversalmente, $\Delta V > 0$.

⑦ coeff. Poisson = 0

(sighero)

→ no variazione trasversale

$$|\epsilon_x| = 0$$

$$|\epsilon_y| = 0$$

$$|\epsilon_x| + |\epsilon_y| = 0$$

$$\Delta V > 0$$

Allungamento non bilanciato trasversalmente → altre variazioni volume

⑧ coeff. Poisson < 0

(materiali con strutture complesse dette eugetiche)

cioè per trazione la variazione trasversale è positiva

se $\nu < 0$

$$\epsilon_x > 0$$

$$\epsilon_y > 0$$

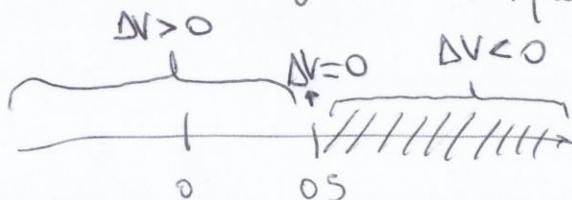
$$\nu = \frac{\epsilon_x}{\epsilon_z} = - \frac{\epsilon_y}{\epsilon_z}$$

se ν è negativo, sia ϵ_x che ϵ_y devono essere > 0 per verificare equazione.

⑨ coeff. Poisson $> 0,5$

→ FISICAMENTE IMPOSSIBILE!

Comporterebbe riduzione volume con allungamento, cioè volume = 0 per un determinato allungamento → impossibile.



COSTANTI ELASTICHE

E
G
v

legate da relazione che vale se materiale è isotropo

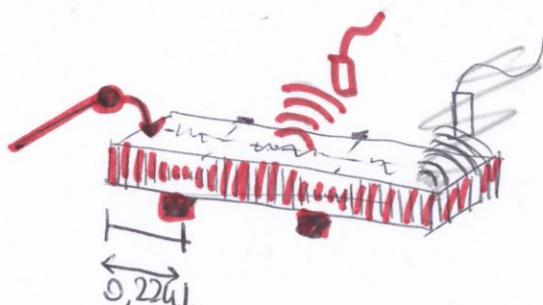
$$G = \frac{E}{2(1+v)}$$

MISURA COSTANTI ELASTICHE

- dinamiche (es. prove di trazione)
- misura velocità di propagazione delle onde sonore del materiale

Velocità suono in un solido \Rightarrow

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$



100Hz - 50kHz

Si colpisce materiale generando suono.
Si misura con microfono
Freq. in uscita.

IMPULSE EXCITATION TECHNIQUE

- SONIC RESONANCE

f = frequenza onde acustiche (microfono)

$$E = 0,9465 \left(\frac{mf^2}{w} \right) \left(\frac{l^3}{t^3} \right) T$$

w = width (larghezza)

t = thickness (spessore)

T = Correction coefficient

DEFORMAZIONE PLASTICA

scomimento piani cristallini

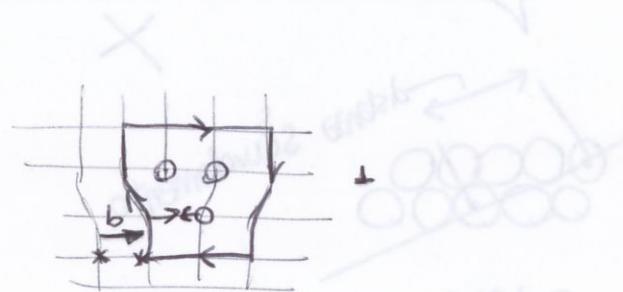
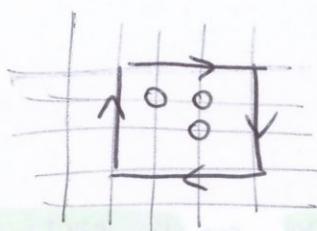


tende a far "scivolare" gli atomi

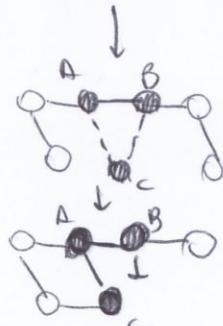
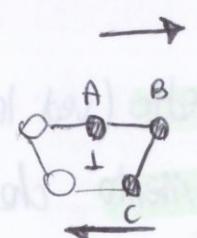
Deformazione reticolare perfetta: scomimento tra piani atomici con **rottura** legami molto **forti**.

La resistenza d' cristallo perfetto dovrebbe essere 1.000 - 10.000 volte maggiore rispetto a quella osservata

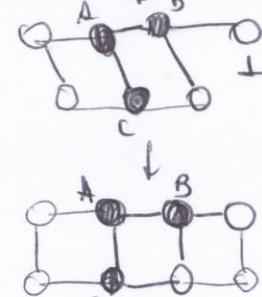
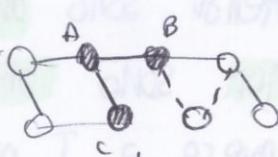
Deformazione cristallo reale: rottura di un minor numero di legami forti per la presenza di dislocazioni.



più facile spezzare e riformare
legami diversi tra i tre
diversi atomi perché
distanze sono minori →
sollecitazioni necessarie minori

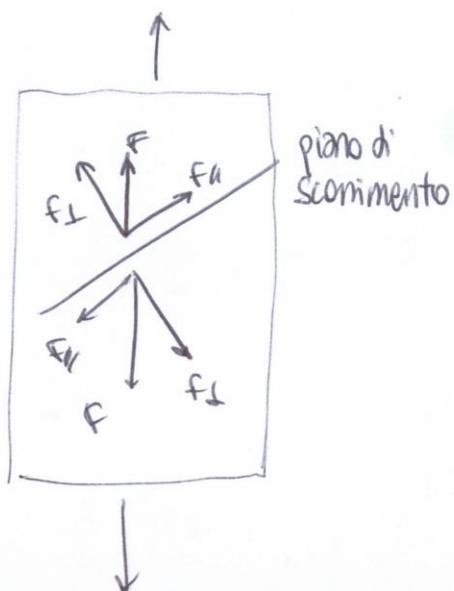


sollecitazione
di taglio provoca
spostamento
verso dx di A
fino allo
sostituzione completa
di B con A



deformazione
continua fino
alla formazione
di un reticolo
perfetto.

DEFORMAZIONE PLASTICA IN UN MONOCRISTALLO

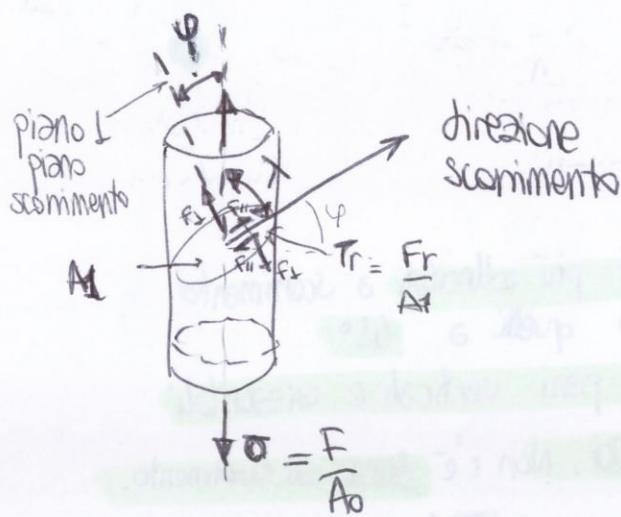


$2F_{\perp}$ annullano gli effetti

$2F_{\parallel}$ generano sforzo di taglio

Scorrimento relativo degli atomi
→ spostamento netto materiale
di un punto all'altro →
deformazione plastica

LEGGE SCHMID



φ → angolo tra perpendicolare a piano scorrimento

$$b = 1 \text{ mm} \cdot 900$$

$$\lambda \rightarrow$$

$$F_r = F \cos \lambda \quad (F_{\parallel})$$

$$F_l = A_0 / \cos \varphi$$

$$Tr = \frac{F \cos \lambda}{A_0 / \cos \varphi} = \frac{F}{A_0} \cos \lambda \cdot \cos \varphi = \sigma \cdot \cos \lambda \cos \varphi$$

Quando forze di taglio sono tali da causare scivolamento/slittamento dei piani → si è raggiunto un valore di τ critico.

Nei monocrstalli c'è sforzo critico σ_c di taglio che innesca lo scorrimento.

Lo sforzo critico rappresenta lo sforzo di snervamento per monocrstallo (σ_s)

sforzo critico piccolo se

sistema scorrimento efficiente (sistema principale)
= struttura compatta ($c_c > c_{FC} > c_{CC}$)
legami chimici deboli

materiale senza impurezze

aumenta temperatura

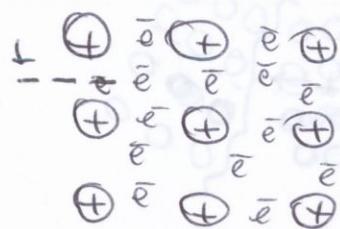
Snervamento

→ soglia tra deformazione elastica e plastica!

sia metalli che ceramici hanno distruzioni ma solo metalli sono duttili:

METALLI

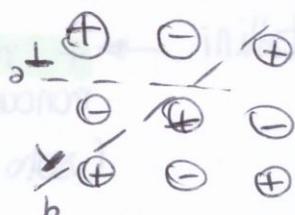
→ tutti cationi molto vicini



cationi tutti
dello stesso elemento
e perfettamente
intercambiabili

MATERIALE CERAMICO
IONICO

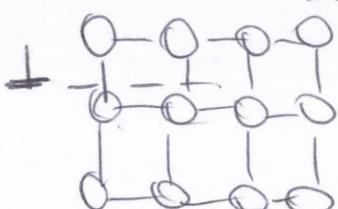
→ cationi e anioni alternati,
sistemi poco compatti



a) scorrimento
catione in
posizione adiacente
è sfavorevole
perché occupato
da anione

MATERIALE CERAMICO
COVALENTE

→ atomi fortemente
legati da
legame direzionale



b) scorrimento
facilitato perché
sostituzione
tra cationi
ma poco compatto

Meno compatti dei metalli → fragili e non duttili!
e con legami forti e
direzionali (non
perfettamente intercambiabili)

AUMENTO DELLA RESISTENZA NEI METALLI

livello
Macroscopico

livello
microscopico

deformazione plastica

← → movimento dislocazioni

Aumento resistenza
meccanica

← → Riducendo mobilità
dislocazioni

limitando/ostacolando movimento dislocazioni si rende materiale
più duro ma anche più fragile (cioè più simile ai ceramici,
altoresistenziali ma fragili)

(nei polimeri aumento della resistenza si ottiene bloccando
scorrimento catene)

TECNICHE RINFORZO METALLI

- riduzione dimensione del grano (affinamento)
- formazione soluzione solidi
- formazione di precipitati
- Incrudimento (aumento numero dislocazioni al punto che si ingombriano reciprocamente)

② RAFFORZAMENTO PER AFFINAMENTO DEL GRANO

Bordi di grano ostacolano movimento dislocazioni

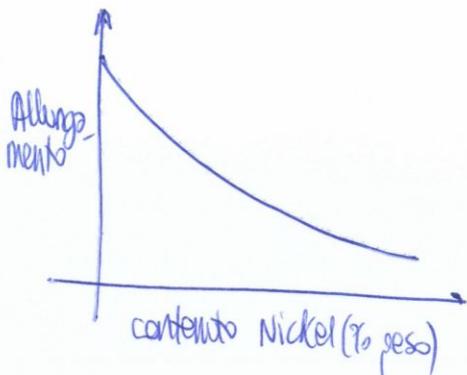
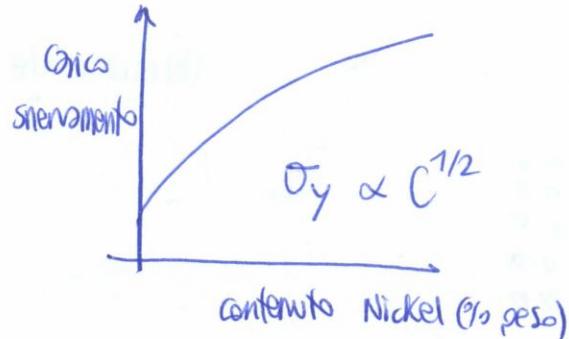
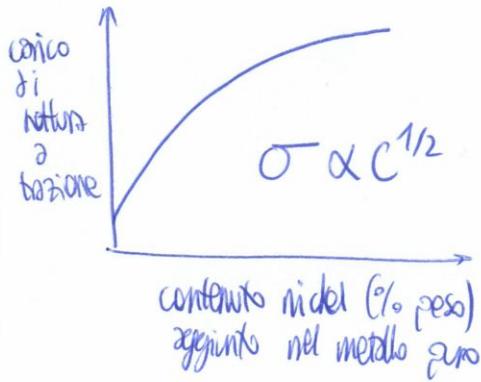


Definizione dimensione grani

- > taglia media (micron) → misurare dimensioni di un grande numero di grani e fare la media
- > norma ASTM codifica dimensione grani attraverso numero n ; si ricava da algoritmo
 - partire da n^o grani osservati in un'immagine di un pollice quadrato con ingrandimento $100\times$

$$N = 2^{n-1} \quad N = n^o \text{ grani contatti in un pollice quadrato}$$

LEGHETTE



lega
W-Ni

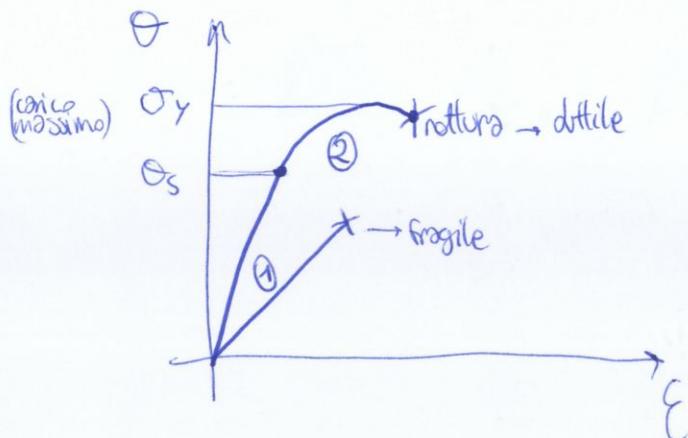
aumento atomi soluzione solidi

→ maggiore resistenza meccanica,
minore deformabilità (allungamento)

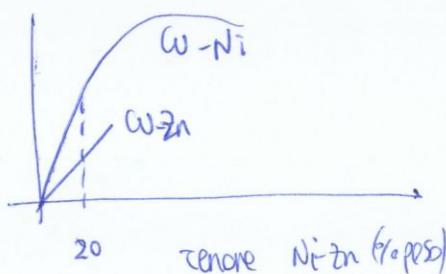
carico rottura
carico snervamento

CARICO SNERVAMENTO → fa passare la deformazione plastică de deformazione solo elastica a deformazione

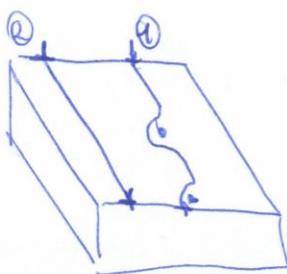
ROTTURA → supera limite di deformazione plastică e si rompe



① σ = E · ε comportamento elastico
② deformazione plastică

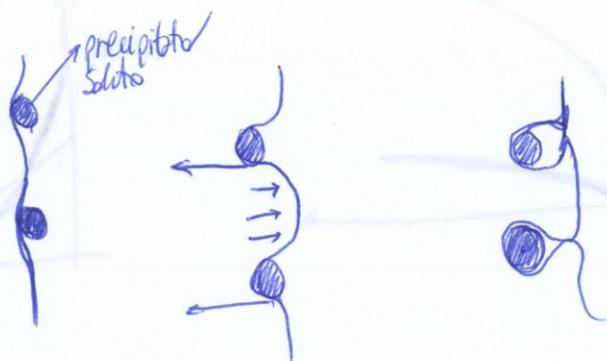


pendenza maggiore = rafforzamento maggiore
a seguito di aggiunta di elementi



linea di distorsione messa in movimento da sollecitazioni traslando fino a che non incontra soluto, che ne blocca traslazione.

La linea della distorsione viene rallentata e si deforma



la linea di distorsione forma linee chiuse attorno a soluto e poi può ricominciare a traslare regolarmente.

RAFFORZAMENTO PER DISPERSIONE

In modo simile a rafforzamento per precipitazione c'è quello per dispersione.

Disperdere piccole particelle di un materiale ad alto T di fusione in un metallo fuso intrappolando le particelle nella solidificazione del fuso.

→ Composito MMC
(Al-Sic)

RAFFORZAMENTO PER INCRIMENTO

Durante deformazione plastica A FREDDO le dislocazioni generano nuove dislocazioni.

Rallentamento movimento delle dislocazioni a causa dell'aumento della loro densità durante deformazione plastica

→ foresta disordinata di dislocazioni

RANKING FENOMENI RAFFORZAMENTO

metalli: sudorendo si rafforzano - perché i legami sono più forti

metalli: raffreddando rafforzano - perché i legami sono più forti

leghe: raffreddando rafforzano - perché i legami sono più forti

metalli: raffreddando e lavorando fanno il rafforzamento

leghe: raffreddando e lavorando fanno il rafforzamento

metalli puri → solo incrudimento non posso rafforzare per introducendo altri

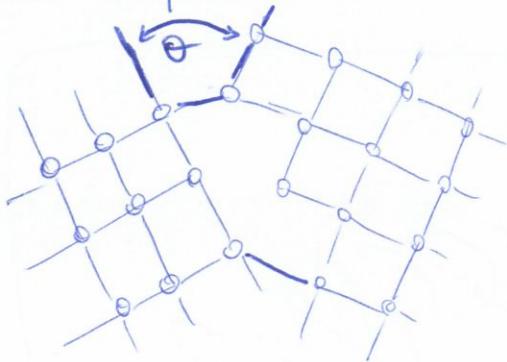
leghe → rafforzamento per soluzione e precipitazione

In seguito a lavorazioni meccaniche a freddo i materiali accumulano resistenza meccanica per incrudimento ma perdono lavorabilità e diventano fragili.

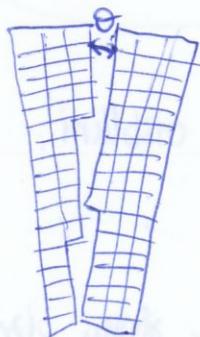
Con RICOTTURA si rende - fragile il materiale e più lavorabile

BORDI DI GRANO AD ALTO ANGOLO

Zone con struttura semi-amorfica in cui particelle racordano reticolati di due grani fortemente notati reciprocamente.



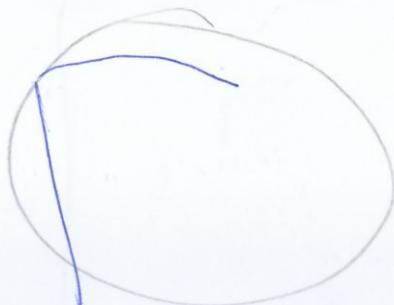
BORDI DI GRANO A BASSO ANGOLO



inserimento in un reticolo perfetto di una serie di dislocazioni a spigolo con linee di dislocazione poste alla distanza b/Θ

b = vettore di Burger Θ = angolo tra i reticolati dei due grani confinanti

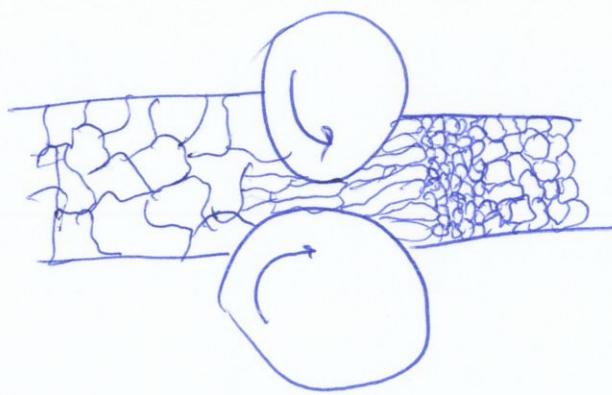
effetto come se avessi bordo di grano a basso angolo



dislocazioni che si spostano in corrispondenza alle soluzioni zodici, quindi
soltanto 5 dislocazioni in 37.021 \approx 1A spaziofillante. f. 42.
dislocazioni che si spostano e fanno sì che ogni dislocazione



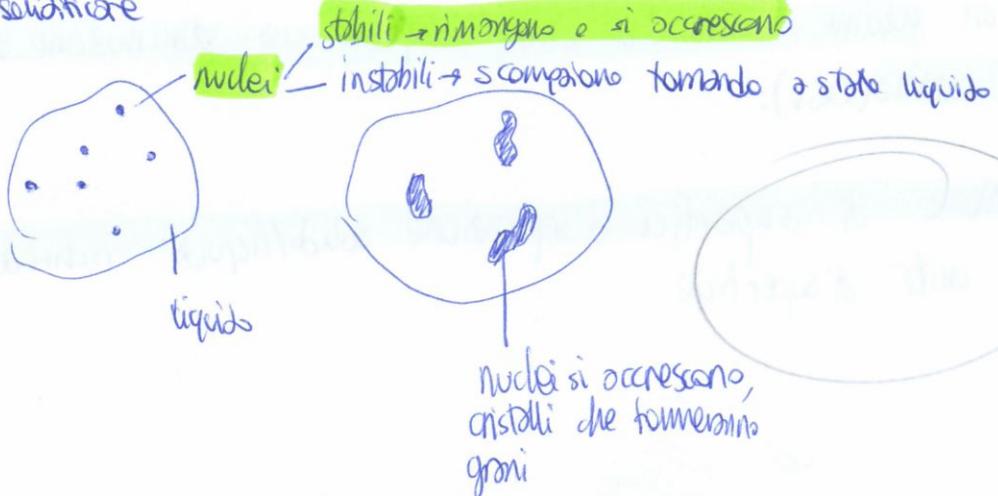
lavorazioni eseguite a caldo possono già indurre risciacquo e/o ricristallizzazioni



la ricristallizzazione non deve essere completa, altrimenti si ritorna al punto di partenza senza miglioramenti.

② SOLIDIFICAZIONE

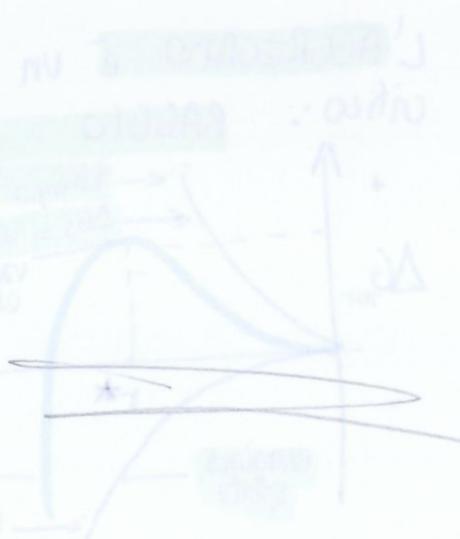
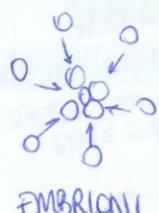
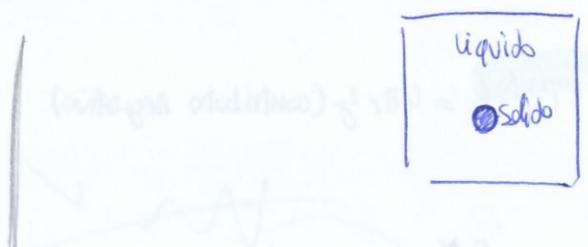
all'inizio tutto materiale liquido poi T si abbassa gradualmente fino a solidificare

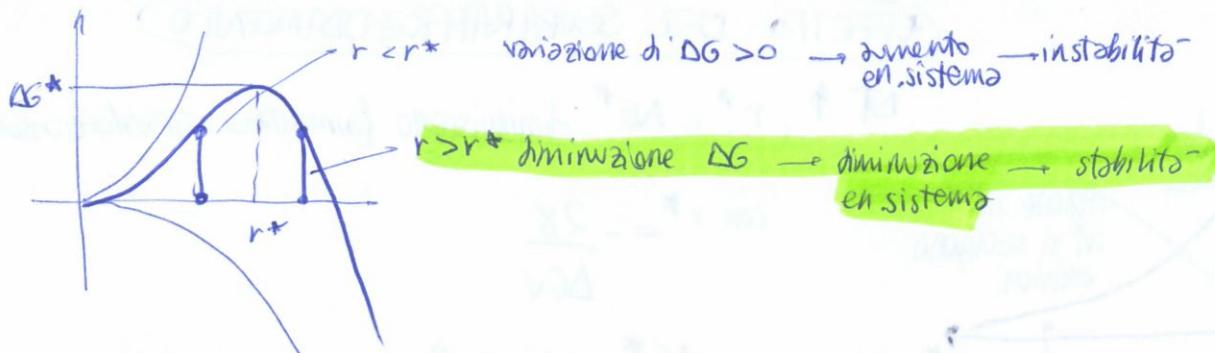


NUCLEAZIONE

In seguito a movimento disordinato delle particelle che formano il liquido (diffusione allo stato liquido)

NUCLEAZIONE AUTOGENA IN UN LIQUIDO





$$\frac{d\Delta G_T}{dr} = 0$$

$$\frac{d\Delta G_T}{dr} = \frac{12}{3} \pi r^2 \Delta G_V + 8\pi r \gamma$$

$$\frac{12}{3} \pi r^2 \Delta G_V + 8\pi r \gamma = 0 \quad \text{(CALCOLO RAGGIO CRITICO (max))}$$

$$r^* = -\frac{2\gamma}{\Delta G_V}$$

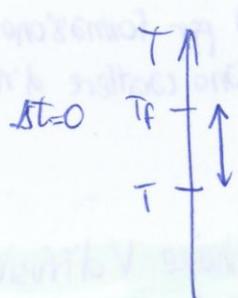
sostituendo r^* nell'espressione di ΔG_T ottengo EN. ATTIVAZIONE PER LA NUCLAZIONE (ΔG^*) :

$$\Delta G^* = \frac{16}{3} \cdot \frac{\pi \gamma^3}{(\Delta G_V)^2}$$

r^* e ΔG^* dipendono da ΔG_V che a sua volta è in valore assoluto maggiore quanto maggiore è sommarraffreddamento rispetto

a T_F : SORRARAFFREDDAMENTO

$$\Delta T = T_F - T$$

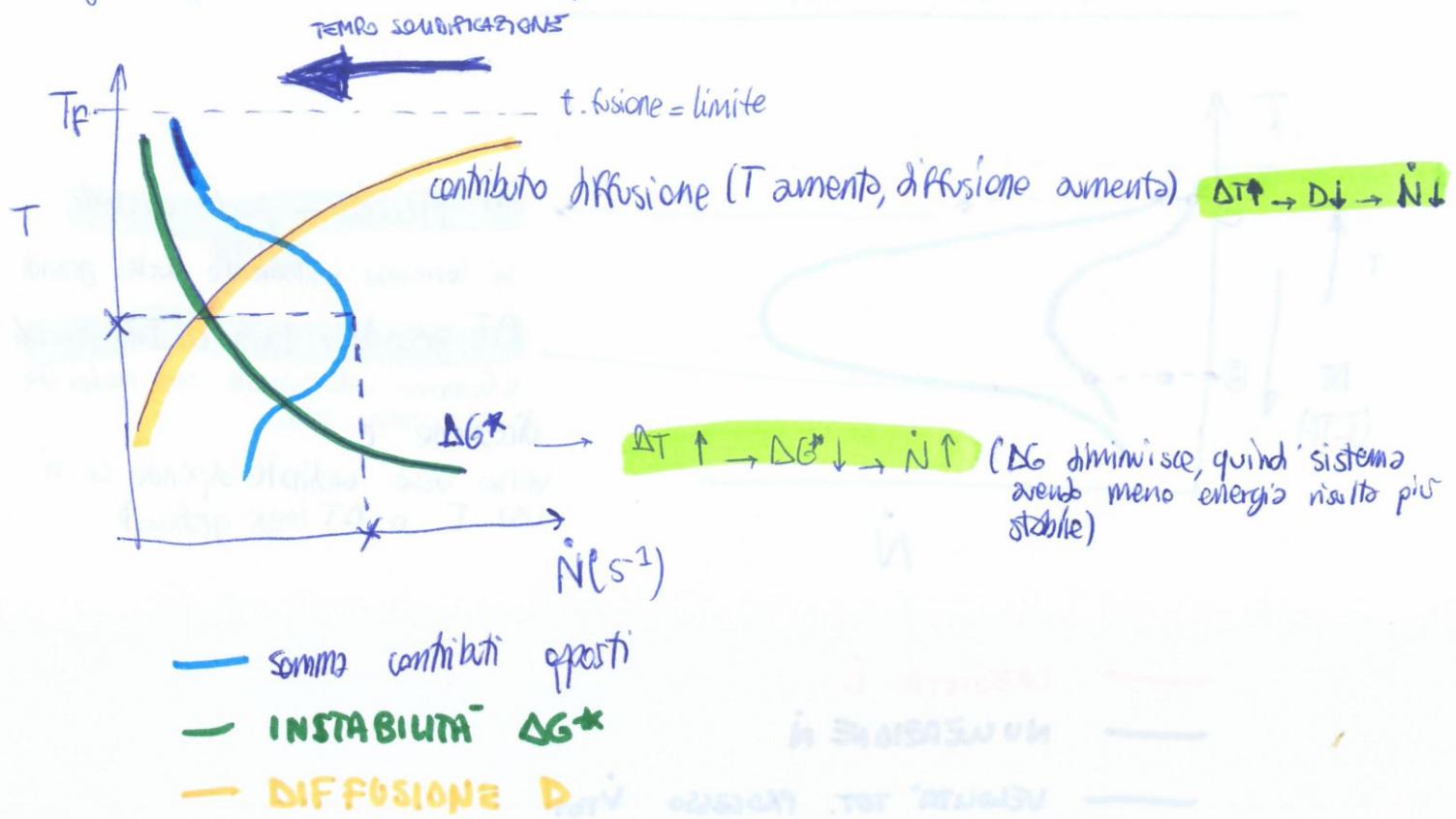


$$\Delta G_V < 0$$

$$|\Delta G_V| \uparrow \Delta T \uparrow$$

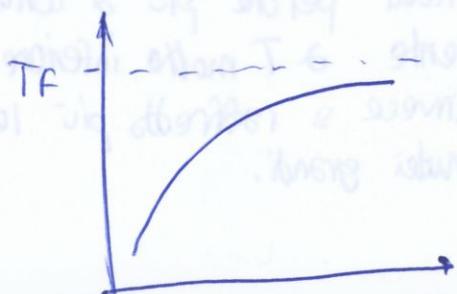
+ stabilità se T basse, perché più distanti da T di fusione

Bisogna quindi considerare contemporaneamente questi due effetti opposti



ASPECTI QUANTICI DELLA CRESITA (\neq reazione)

Una volta che nuclei sono stabili, tendono a crescere con aumento di T .



ASPECTI PRATICA SOLIDIFICAZIONE

1. **EQUASSICI** → nelle zone con maggiore rateo di sovraffreddamento → prevele fusione
2. **COLONNARI** → nelle zone con minore sovraffreddamento → prevele crescita

sulla superficie di una lingottiera T è sempre minore quindi si ottengono grani fini, all'interno i grani sono di dimensioni maggiori e con struttura colonnare allineata alla direzione di sovraffreddamento del calore.

(può capitare che, visto che $\downarrow T \rightarrow \downarrow$ Volume, all'interno del lingotto si formino delle cavità).

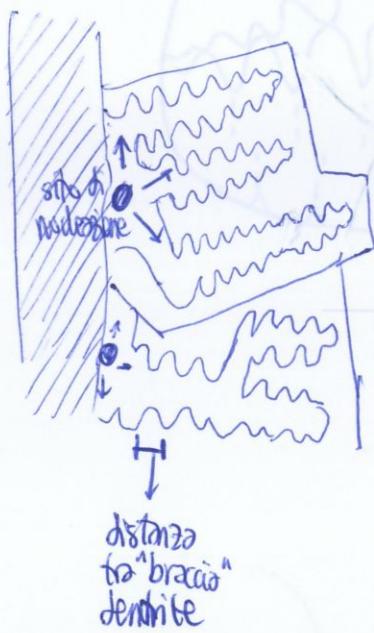
Le pareti della lingottiera agiscono da **AGENTE NUCLEANTE** → contribuiscono alla formazione di numerosi grani piccoli



SOLIDIFICAZIONE ETEROGENA

FORMAZIONI DENDRITICHE

Capita che i piani reticolari non presentino tutti la stessa velocità di accrescimento da liquido: i grani assumono struttura dendritica



alcune direzioni hanno velocità di accrescimento maggiore ed altre più lente

Il parametro più utilizzato per misurare condizioni locali di solidificazione è **SDAS** (Secondary dendrite arm spacing)

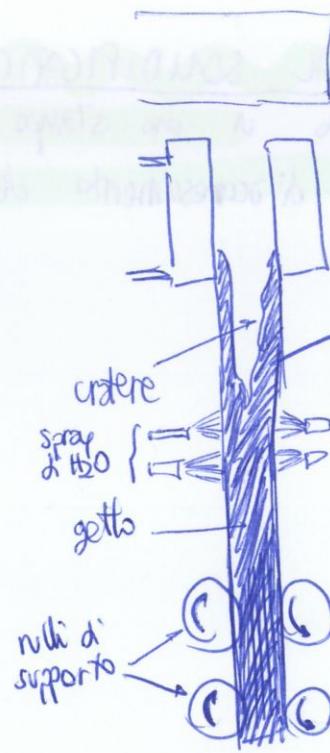
$$SDAS = K t_s^m \quad (\text{tempo solidificazione}, K \text{ costante del metallo})$$

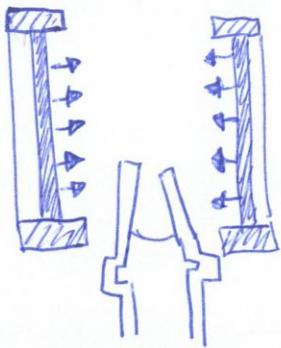
- sovraffreddamento elevato, $T_{solidificazione} \uparrow$, $t_{solidificazione} \uparrow$, distanza minore tra bracci dendriti
- sovraffreddamento ridotto, $T_{solidificazione} \downarrow$, $t_{solidificazione} \downarrow$, distanza maggiore tra bracci

COLATA SEMI-CONTINUA



COLATA CONTINUA (fondente)





Se si estrae forma dal basso si avrà direzione solidificazione, con metallo che esce dal forno che solidifica prima → **GRANI COLONNARI**

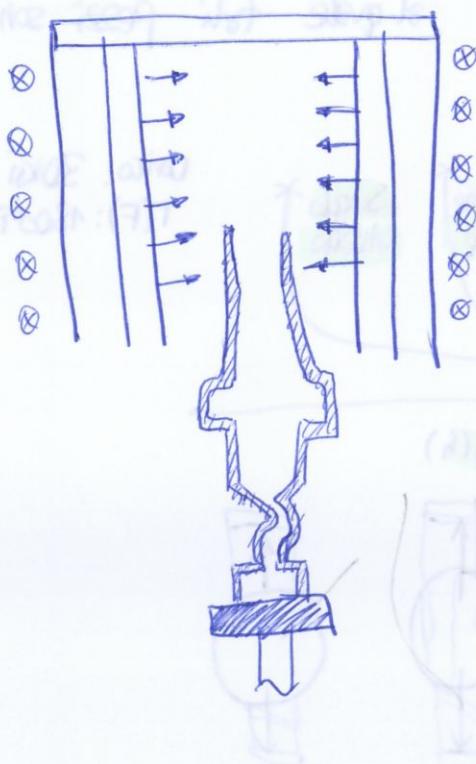
SINGLE CRYSTAL CASTING

Sistemi di colata per solidificazione monosintattica



no bordi
di grano
all'interno

solidificazione direzionale
condotta con un
selettore di cristallo
singolo

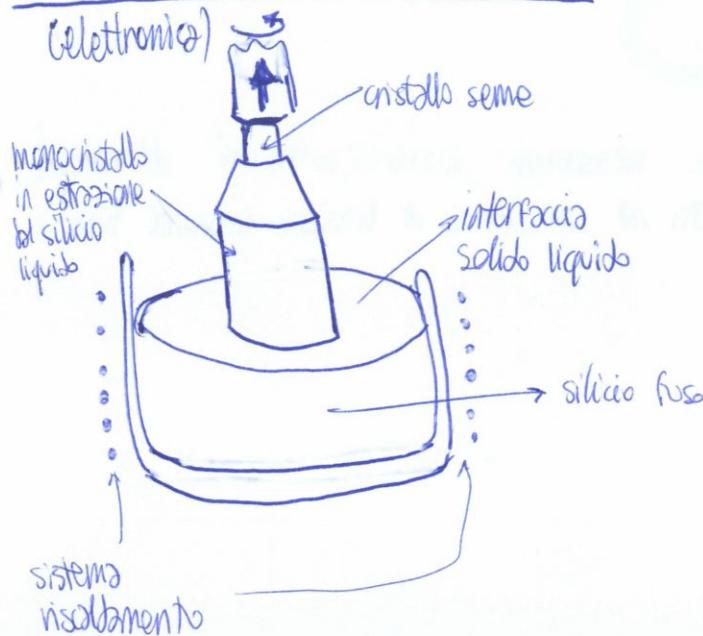


SELETTORI DI CRISTALLO PER FUSIONI MONO(RISTALLINE)



MONOCRISTALLI DI SILICO

(elettronica)



cristallo progressivamente allontanato fa solidificare silicio fuso secondo i suoi piani reticolari.

Quindi servono basse velocità di rotazione ed estrazione