

INGEGNERIA MECCANICA

CORSO DI TECNOLOGIA DEI MATERIALI

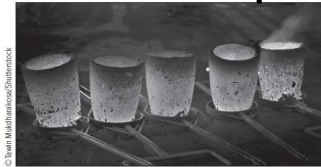
MATERIALI CERAMICI

INGEGNERIA MECCANICA - CORSO DI TECNOLOGIA DEI MATERIALI

Introduzione

- Per le loro caratteristiche favorevoli come elevata durezza, resistenza all'usura, stabilità chimica, resistenza alle alte temperature e basso coefficiente di espansione termica, i ceramici avanzati vengono selezionati come materiale preferito per molte applicazioni:

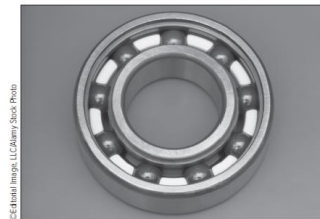
- Lavorazione dei minerali
- Guarnizioni
- Valvole
- Scambiatori di calore
- Stampi per la formatura dei metalli
- Motori diesel adiabatici
- Turbine a gas
- Prodotti biomedicali
- Strumenti di taglio



(a)



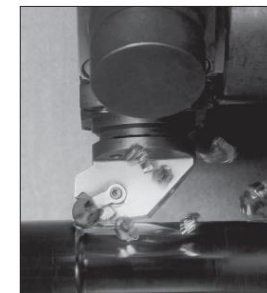
(b)



© Eclat Images, LLC/Alamy Stock Photo



Per gentile concessione di Kennametal



Caratteristiche dei materiali ceramici

- I materiali ceramici sono inorganici e non metallici
- Sono costituiti principalmente da forti legami ionici o covalenti
- Eccellenti isolanti elettrici e termici
- Fragili e meno duttili e tenaci dei metalli
- Alta stabilità chimica e alta temperatura di fusione
- Ceramiche tradizionali: componenti base (argilla e silice)
- Ceramiche avanzate: composti puri (Al_2O_3 , SiC)

Legame Ionico e Covalente in Ceramiche Semplici

- Insieme di legami di tipo ionico e covalente
- Il rapporto tra legami ionici e covalenti dipende dalla differenza di elettronegatività tra gli elementi

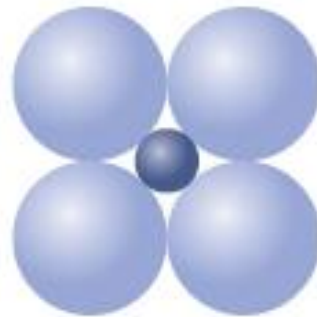
Composto ceramico	Atomi di legame	Differenza di elettronegatività	% di carattere ionico	% di carattere covalente
Biossido di zirconio, ZrO_2	Zr—O	2.3	73	27
Ossido di magnesio, MgO	Mg—O	2.2	69	31
Ossido di alluminio, Al_2O_3	Al—O	2.0	63	37
Biossido di silicio, SiO_2	Si—O	1.7	51	49
Nitrato di silicio, Si_3N_4	Si—N	1.3	34.5	65.5
Carburo di silicio, SiC	Si—C	0.7	11	89

Disposizioni Ioniche Semplici

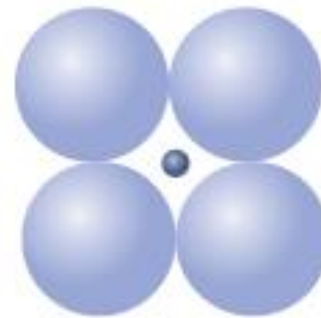
- La disposizione degli ioni dipende da
 - dimensione relativa degli ioni
 - necessità di bilanciare le cariche elettriche
- Se l'anione non tocca il catione, la struttura diventa instabile
- Rapporto tra raggi = $r_{\text{catione}}/r_{\text{anione}}$
- Rapporto di raggi critico per la stabilità per numeri di coordinazione 8, 6 e 3 sono rispettivamente >0.732 , >0.414 e >0.155



Stabile



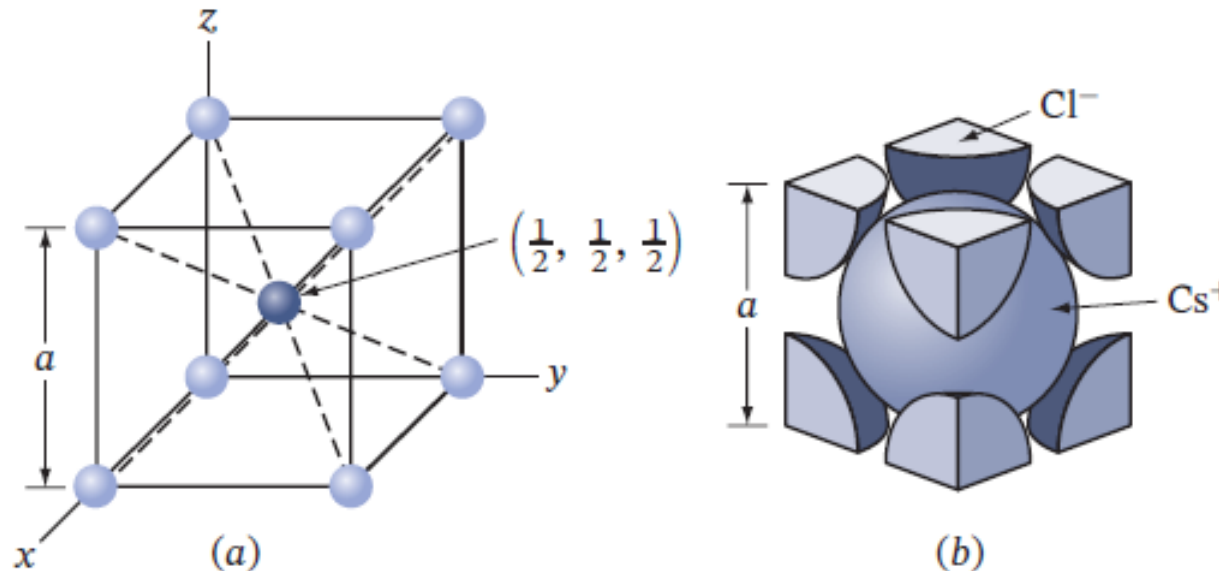
Stabile



Instabile

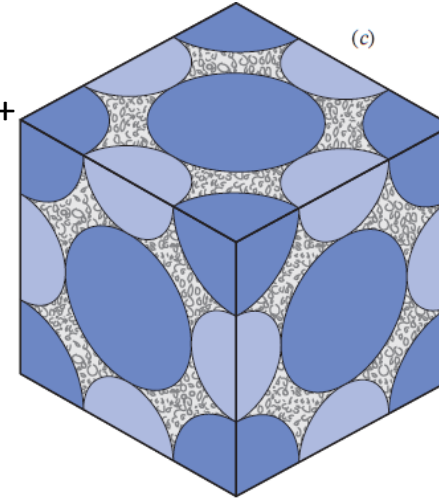
Struttura Cristallina del Cloruro di Cesio

- CsCl è formata da legami ionici con rapporto tra i raggi = 0.94 e CN = 8
- Otto ioni cloruro circondano un catione centrale di cesio nella posizione $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$
- CsBr, TiCl e TiBr hanno struttura simile



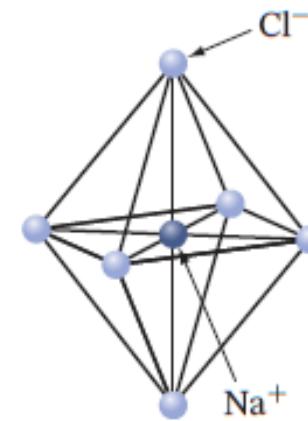
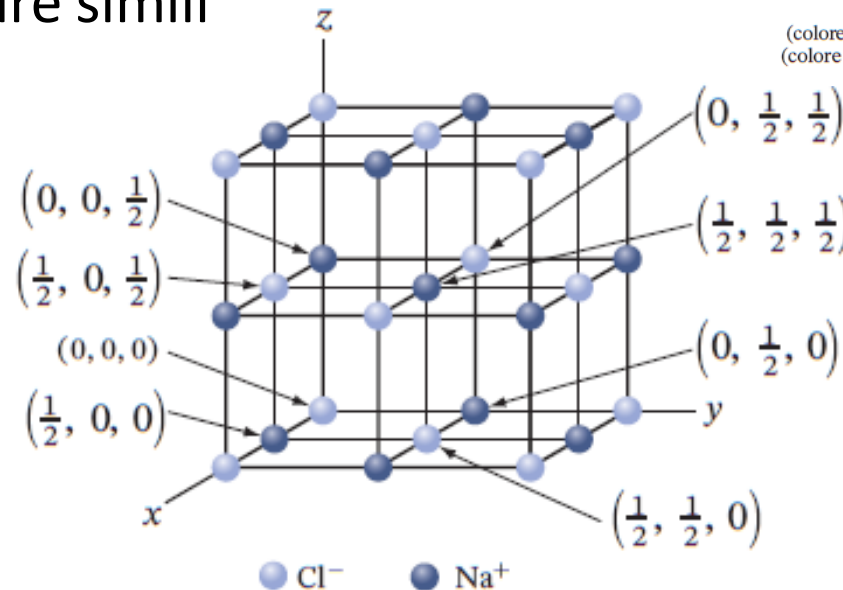
Struttura Cristallina del Cloruro di Sodio

- Legami fortemente ionici con ioni Na^+ che occupano le posizioni interstiziali tra CFC e ioni Cl^-
- Rapporto tra i raggi = 0.56, CN = 6
- MgO , CaO , NiO e FeO hanno strutture simili



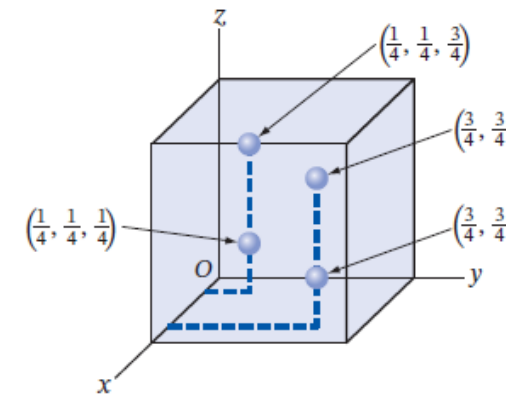
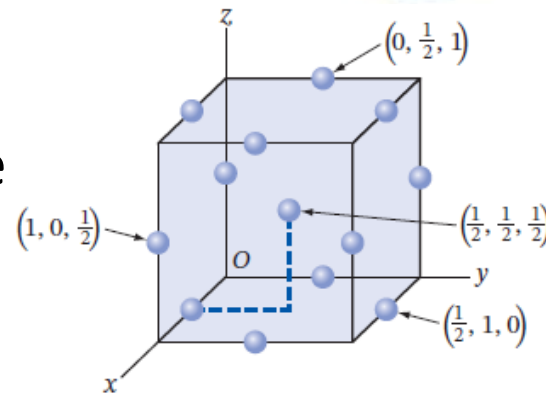
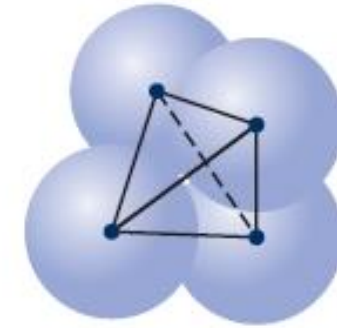
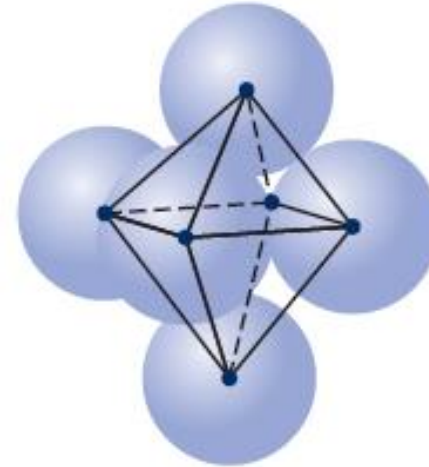
Struttura del cristallo di cloruro di sodio
NaCl

(colore scuro) ioni cloro—(0.181 nm raggio) $\frac{r_{\text{Na}^+}}{R_{\text{Cl}^-}} = 0.56$
(colore chiaro) ioni sodio—(0.102 nm raggio)



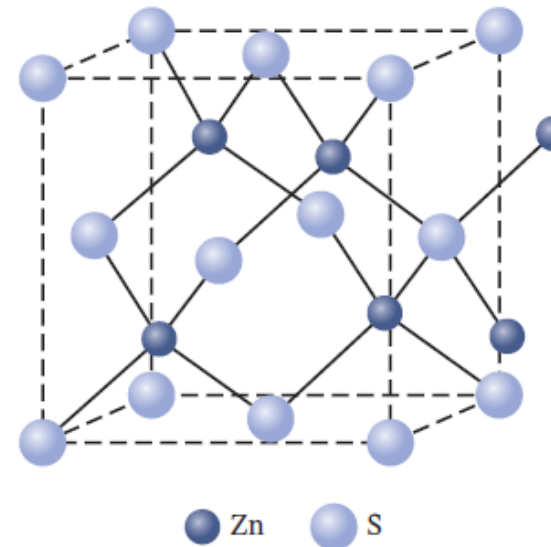
Posizioni Interstiziali nei Reticoli Cristallini CFC e EC

- Posizioni interstiziali ottaedriche: sei atomi o ioni equidistanti dal centro del vuoto
- Posizioni interstiziali tetraedriche: quattro atomi o ioni equidistanti dal centro del vuoto
- Ci sono quattro posizioni ottaedriche e otto posizioni tetraedriche per cella unitaria di tipo CFC



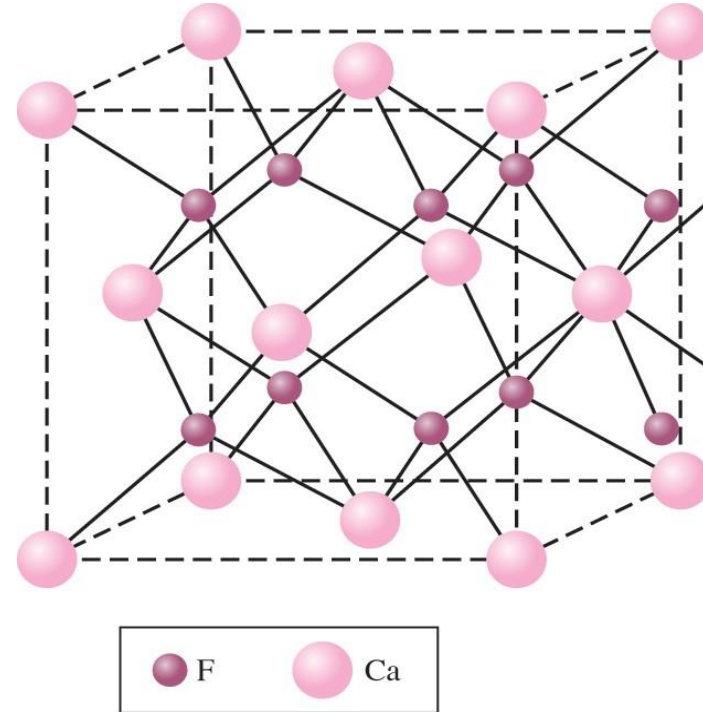
Struttura Cristallina del Solfuro di Zinco (ZnS)

- Quattro atomi di zinco e quattro atomi di zolfo
- Un tipo di atomo (Zn o S) occupa i punti del reticolo e l'altro occupa le posizioni interstiziali di una cella elementare CFC
- Atomi S $\longrightarrow (0,0,0) (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0) (\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}) (0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$
Atomi Zn $\longrightarrow (\frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}) (\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4}) (\frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4}) (\frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4})$
- Legami covalenti tetraedrici (87% carattere covalente) con CN = 8
- CdS, InAs, InSb e ZnSe hanno struttura simile



Struttura Cristallina del Fluoruro di Calcio (CaF_2)

- Gli ioni Ca^{2+} occupano le posizioni del reticolo CFC,
- gli ioni F^- sono posizionati nelle otto posizioni tetraedriche
- UO_2 , BaF_2 , PbMg_2 hanno struttura simile
- Il gran numero di posizioni interstiziali ottaedriche libere nel composto UO_2 consentono l'uso di questo materiale come combustibile nucleare
- I prodotti di fissione sono sistemati in queste posizioni vacanti



Altre Strutture Cristalline

- **Antifluorite**: struttura costituita da una cella elementare CFC con anioni (per esempio di O^{2-}) nelle posizioni del reticolo CFC. I cationi (per esempio, Li^+) occupano le otto posizioni tetraedriche del reticolo CFC

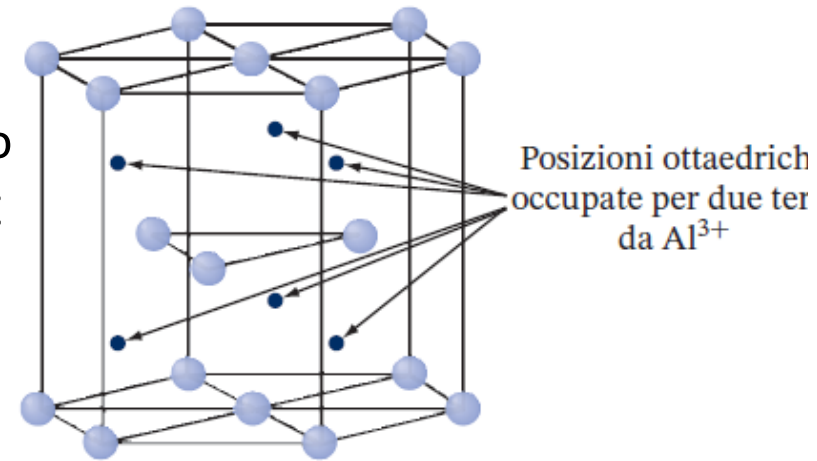
Esempi: Li_2O , Na_2O

- **Corindone (Al_2O_3)**: gli ioni ossigeno sono nelle posizioni della cella elementare EC

➤ due ioni Al^{3+} in posizione ottaedrica ogni tre ioni O^-

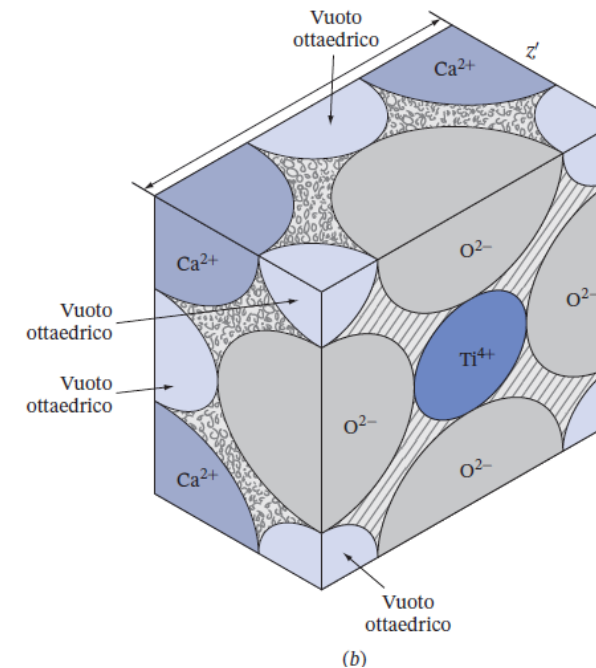
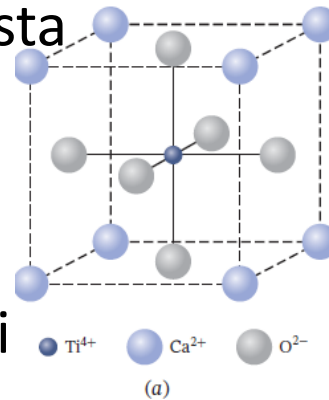
—————➤ distorsione della struttura

- **Spinello ($MgAl_2O_4$)**: gli ioni ossigeno formano un reticolo CFC e gli ioni Mg e Al occupano le posizioni interstiziali
- Questi sono materiali magnetici non metallici



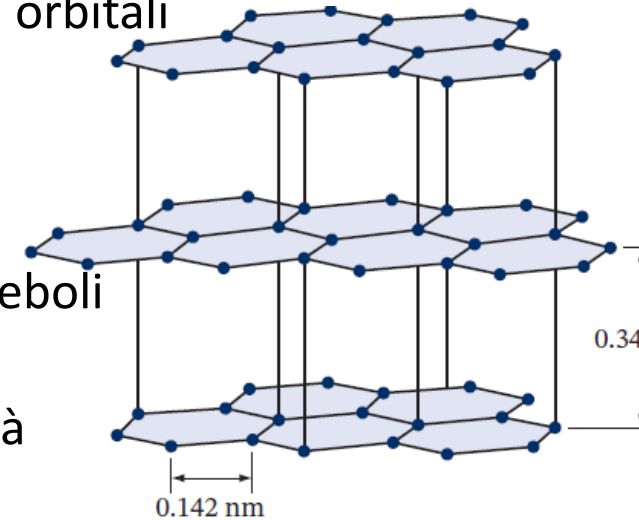
Altre Strutture Cristalline

- **Perovskite (CaTiO_3):** gli ioni Ca^{2+} e O^{2-} formano una cella elementare CFC
 - gli ioni Ca^{2+} occupano gli angoli
 - gli ioni O^{2-} occupano i centri delle facce
 - gli ioni Ti^{4+} sono in posizione ottaedrica
- BaTiO_3 ha la struttura della perovskite sopra i 120°C
- Altri composti aventi questa struttura sono SrTiO_3 , CaZrO_3 e SrZrO_3
- Questa struttura è importante per i materiali *piezoelettrici*



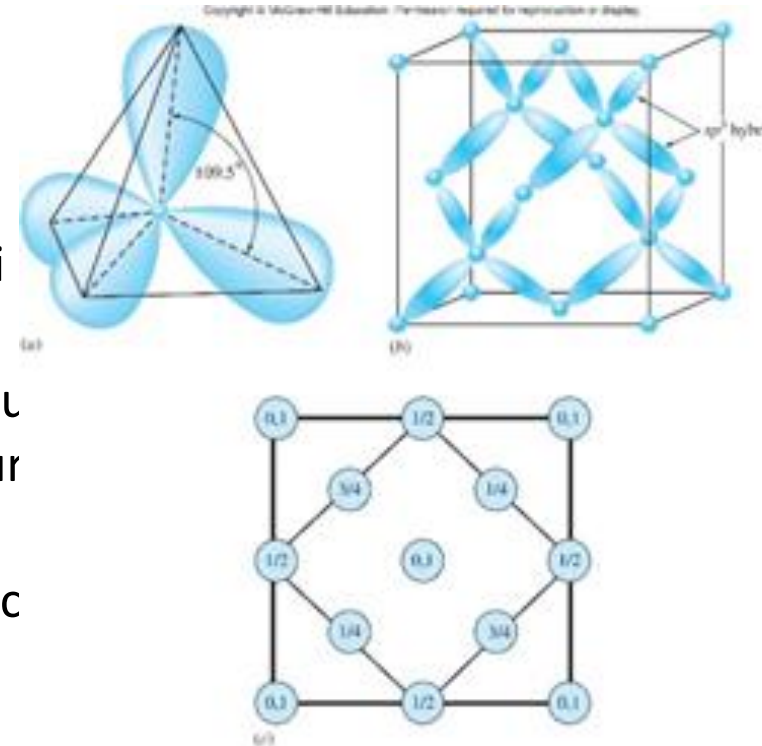
Allotropi del Carbonio – la grafite

- Il carbonio ha molti *allotropi* - può esistere in molte forme; ogni allotropo ha le sue proprietà e caratteristiche specifiche
- La **grafite** è una struttura a piani con atomi di carbonio fortemente legati in array esagonali, attraverso orbitali ibridi sp^2
- Ci sono elettroni liberi all'interno di ogni piano
- Elevata resistenza e conduttività lungo il piano
- I piani sono attratti l'uno dall'altro attraverso deboli legami secondari
- Per questo motivo la grafite ha ottime proprietà lubrificanti
- Per lo stesso motivo, la grafite è considerata anisotropa
- In media, ogni piano dista 0,34 nm dai piani adiacenti e ha una densità di $2,26 \text{ gr/cm}^3$



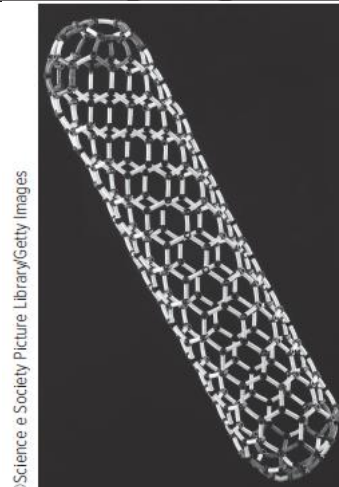
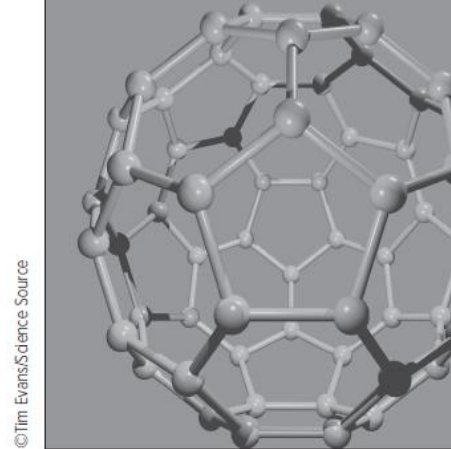
Allotropi del Carbonio – il diamante

- Il diamante è un altro allotropo del carbonio e ha una struttura cubica
- Nel diamante gli atomi di carbonio sono legati covalentemente attraverso orbitali ibridi sp^3
- La sua densità è di $3,52 \text{ gr/cm}^3$ rispetto ai $2,26 \text{ gr/cm}^3$ della grafite
- Il diamante è il materiale più rigido, più duro e meno comprimibile prodotto dalla natura
- Il diamante ha una conduttività termica molto elevata ma una conduttività elettrica minima
- Il diamante naturale ha un valore come pietra preziosa mentre il diamante sintetico ha applicazioni industriali (abrasivi, rivestimenti e utensili da taglio)



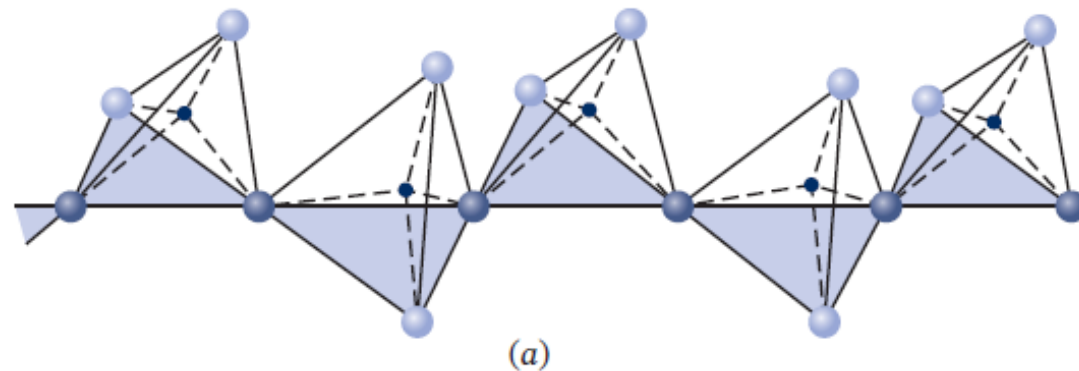
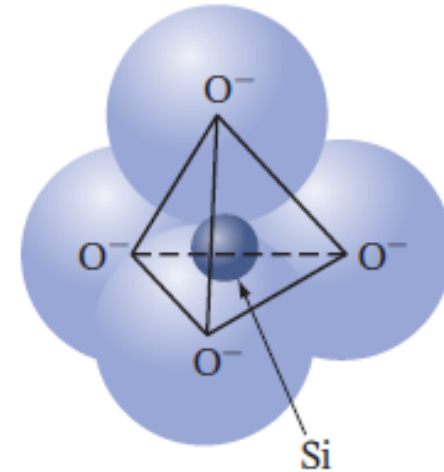
Allotropi del Carbonio – Fullereni

- **Fullerene:** cluster di atomi di carbonio in un intervallo molecolare compreso tra C_{30} e C_{100} .
- Questo polimorfo è stato chiamato fullerene o buckyball (appare molto simile a un pallone da calcio, composto da 12 pentagoni e 20 esagoni)
- Il diametro del fullerene C_{60} è pari a 0.710 nm ed è quindi classificato come un nanocluster
- I fullereni sono studiati per possibili applicazioni nelle industrie elettroniche e in pile a combustione, lubrificanti e superconduttori
- **Nanotubo di C:** avvolgimento di un singolo piano atomico di grafite (un *grafene*) in un tubo, con le estremità chiuse da due emifullereni. Possono essere a parete singola (SWNT) o multipla (MWNT)
- Si ritiene che i nanotubi abbiano una resistenza meccanica a trazione 20 volte superiore a quella degli acciai più resistenti



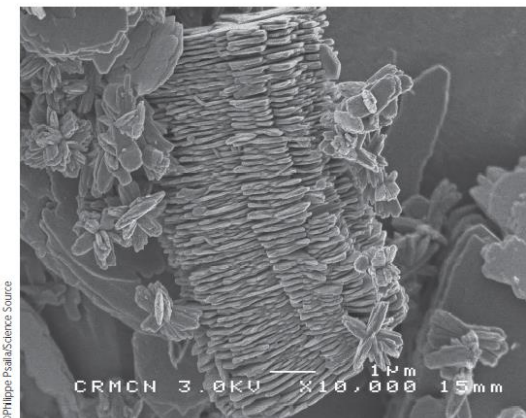
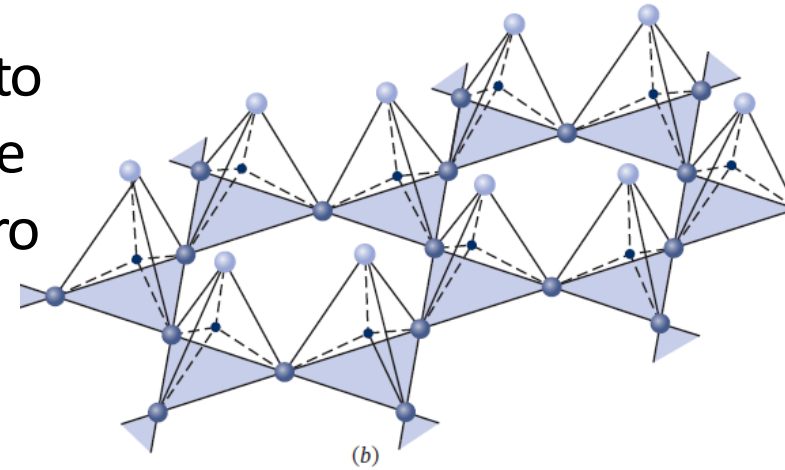
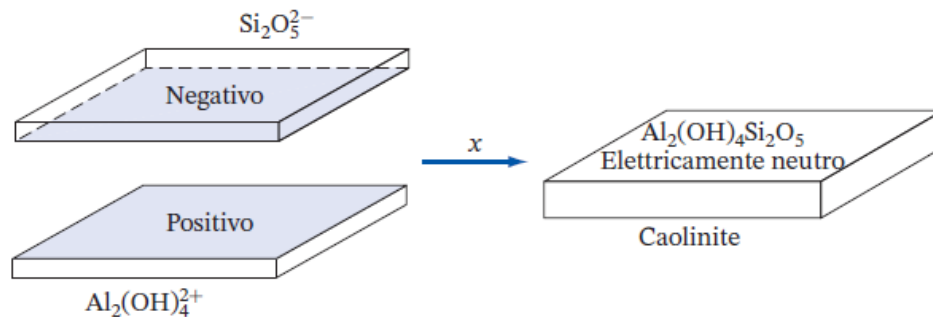
Strutture dei Silicati

- Il silicato (SiO_4^{4-}) è formato da atomi di silicio e ossigeno
- 50% ionico e 50% covalente
- Possono essere prodotte molte strutture di silicati
- **Struttura a isola:** gli ioni positivi si legano con gli ioni ossigeno del tetraedro SiO_4^{4-}
- **Struttura a catena/ad anello:** due angoli di ogni tetraedro di SiO_4^{4-} sono legati con gli angoli di altri tetraedri



Struttura a Strati di Silicati

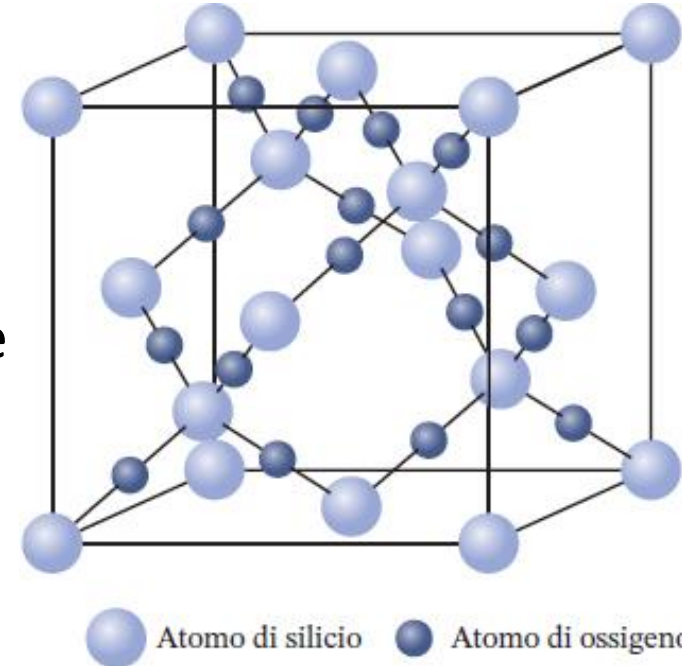
- Struttura a strati: tre angoli complanari di un tetraedro di silicato sono legati agli angoli di tre altri tetraedri di silicato
- Ogni tetraedro ha un ossigeno libero e quindi lo strato può legarsi con un altro tipo di strato
- Se i legami sono deboli, gli strati scorrono facilmente uno sull'altro (ad es. i cristalli di caolinite)



Caolinite:
strati di
 $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}$
 SiO_5^{2-}

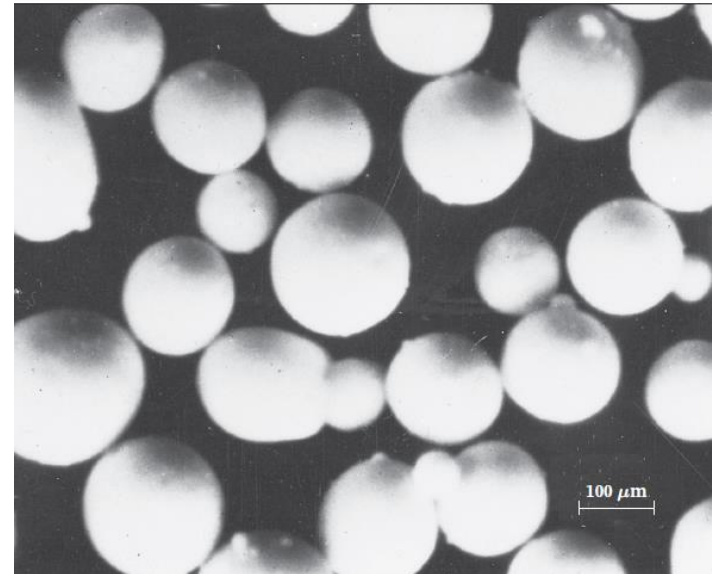
Reticoli di Silicati

- **Silice**: tutti i quattro angoli del tetraedro di SiO_4^{4-} condividono atomi di ossigeno
 - Strutture di base: quarzo, tridimite e cristobalite
 - La silice è la componente importante di molte ceramiche tradizionali e di vetri
- **Feldspati**: infiniti reticoli tridimensionali
 - Alcuni ioni Al^{3+} sostituiscono
 - Strutture di base: quarzo, gli ioni Si^{4+} → carica netta negativa
 - Ioni alcalini e alcalino terrosi si posizionano nelle posizioni interstiziali



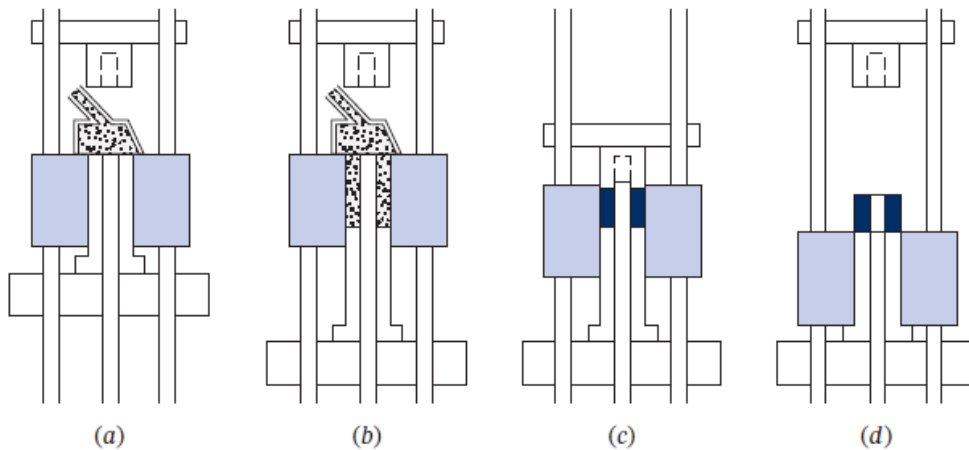
Lavorazione dei Materiali Ceramici

- I prodotti ceramici sono ottenuti per compattazione di polveri o particelle in forme e successivo riscaldamento per legare insieme le particelle e eliminare le porosità
- Preparazione del materiale: particelle, leganti e lubrificanti sono miscelati a umido o a secco
- Formatura: forme utili possono essere ottenute sia a secco che nelle condizioni plastica o liquida
- Il processo di formatura a freddo è predominante
- La pressatura, la colata e l'estrusione sono i metodi comunemente usati per la formatura



Pressatura

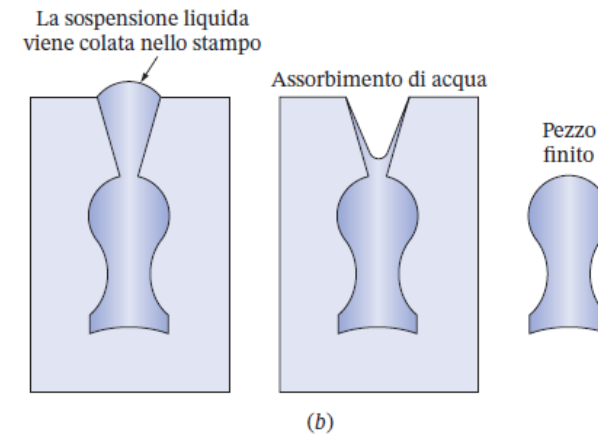
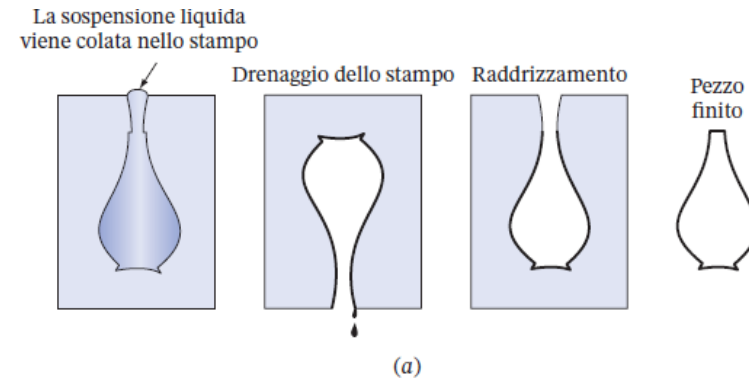
- **Pressatura a secco:** simultanea compattazione uniassiale e formatura di una polvere con leganti
 - Grande varietà di forme con uniformità e tolleranze ristrette



- **Pressatura isostatica:** la polvere ceramica è caricata in una camera flessibile e viene applicata una pressione esterna alla camera con fluido idraulico
 - Esempi: isolanti di candele, utensili in carburo
- **Pressatura a caldo:** la combinazione di calore e pressione produce parti ad alta densità con proprietà meccaniche migliorate

Colaggio

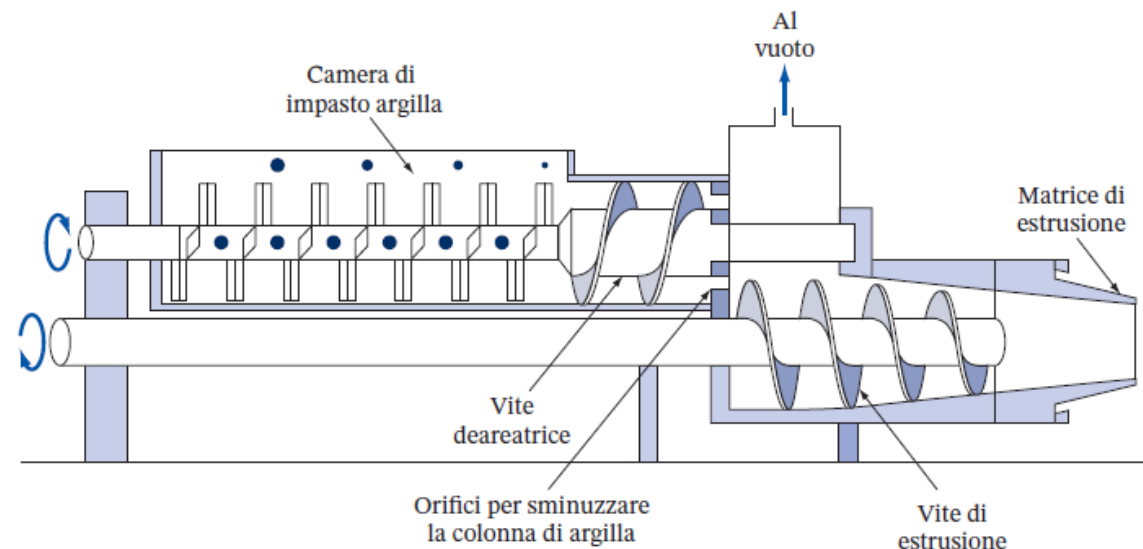
- Metodo economico e preferito nella produzione di forme ceramiche complesse e con pareti sottili
- La polvere di materiale ceramico ed un liquido sono miscelati per preparare una sospensione stabile (barbottina)
- La barbottina viene versata in uno stampo poroso e la porzione liquida è parzialmente assorbita dallo stampo
- Si forma uno strato di materiale semi-solido sulla superficie dello stampo
- La barbottina in eccesso è rimossa dalla cavità
- Il materiale nello stampo viene lasciato essiccare e poi cotto



(a) Colata per drenaggio in stampo poroso di gesso. (b) Colata solida.

Estrusione

- Per estrusione possono essere prodotte sezioni trasversali semplici e forme cave
- Il precursore ceramico (argilla e acqua – materiale plastico) viene forzato in una matrice rigida in acciaio o lega per mezzo di una vite a motore
- La filiera di estrusione controlla la forma del prodotto finale
- Esempi: mattoni refrattari, tubature fognarie, laterizi forati



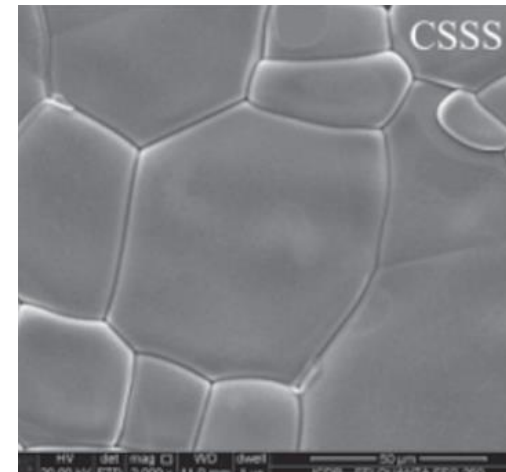
Trattamenti Termici

- **Essiccamento:** i componenti sono essiccati prima della cottura per rimuovere l'acqua dalla massa ceramica
 - di solito eseguito a o al di sotto di 100°C
- **Sinterizzazione:** piccole particelle vengono consolidate mediante fenomeni di diffusione allo stato solido ottenendo un prodotto denso e coerente
 - eseguito ad alte temperature, ma inferiori al punto di fusione
 - maggiore il tempo di sinterizzazione, più grandi sono le particelle che si formano
- **Vetrificazione:** durante la cottura, la fase vetrosa liquefa e riempie gli spazi porosi
 - durante il raffreddamento, la fase liquida del vetro solidifica e si forma una matrice vetrosa che lega le particelle tra loro



Ceramici Tradizionali

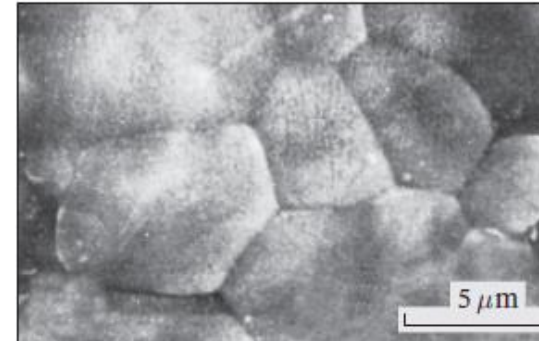
- Sono prodotti da argilla, silice e feldspato
- Argilla: costituita principalmente da silicati di alluminio idrati ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), conferisce lavorabilità e durezza
- Silice: SiO_2 , chiamata anche selce o quarzo, ha un'elevata temperatura di fusione ed è il componente refrattario della ceramica tradizionale
- Feldspato di potassio: ha una composizione di base $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$, ha una bassa temperatura di fusione e, durante la cottura, produce una fase vetrosa che lega i componenti refrattari
- Esempi: tegole, piastrelle per pavimento, porcellana elettrica, porcellana da tavola e sanitari



Micrografia di una porcellana isolante elettrici

Ceramici Avanzati

- **Allumina (Al_2O_3):** l'ossido di alluminio viene drogato con ossido di magnesio, pressato a freddo e sinterizzato
 - Struttura uniforme, usata per applicazioni elettriche
- **Nitruro di silicio (Si_3N_4):** un compatto di polvere di silicio viene nitrurato in un flusso di azoto gassoso
 - Moderata resistenza meccanica, usato in componenti di motori avanzati
- **Carburo di silicio (SiC):** carburo refrattario, molto duro sinterizzato a 2100°C
 - usato come rinforzo in materiali compositi
- **Zirconia (ZrO_2):** polimorfa, è soggetta a criccatura
 - combinata con 9% MgO per produrre ceramici con alta tenacità a frattura



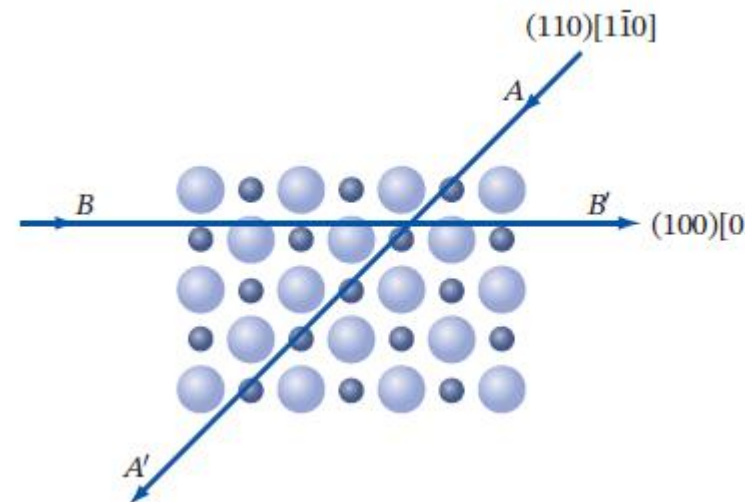
Proprietà Meccaniche dei Ceramici

- La resistenza meccanica dei ceramici è molto variabile, ma sono generalmente fragili
- La resistenza a trazione è inferiore alla resistenza a compressione

Materiale	Densità g/cm ³	Resistenza a compressione	Resistenza a trazione	Resistenza a flessione	Tenacità a frattura
		MPa	MPa	MPa	MPa√-m
Al ₂ O ₃ (99%)	3.85	2585	207	345	4
Si ₃ N ₄ (pressato a caldo)	3.19	3450	...	690	6.6
Si ₃ N ₄ (dopo "reaction bonding")	2.8	770	...	255	3.6
SiC (sinterizzato)	3.1	3860	170	550	4
ZrO ₂ , 9% MgO (parzialmente stabilizzata)	5.5	1860	...	690	8+

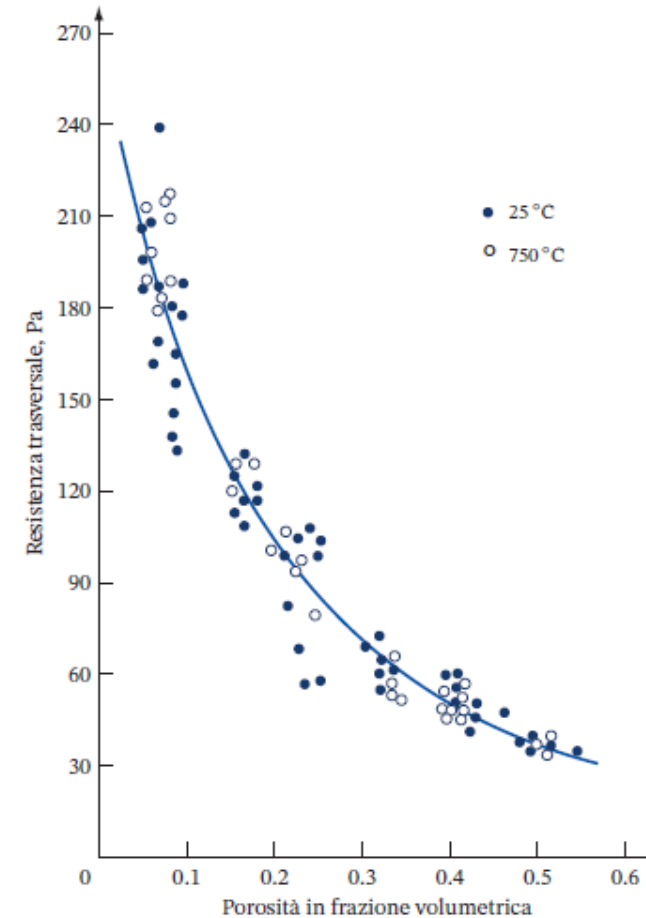
Meccanismo di Deformazione

- I ceramici hanno una bassa deformabilità a causa del tipo di legami prevalenti.
- Ceramiche legate covalentemente: mostrano frattura fragile provocata dalla separazione dei legami tra coppie di elettroni senza la loro successiva riformazione
- Ceramiche legate ionicamente: i monocristalli mostrano una considerevole deformazione plastica. I ceramici policristallini sono fragili
- Esempio: cristallo NaCl
 - lo scorrimento lungo la famiglia di piani $\{100\}$ è raramente osservato perché entrano in contatto cariche uguali
 - la frattura avviene ai bordi di grano



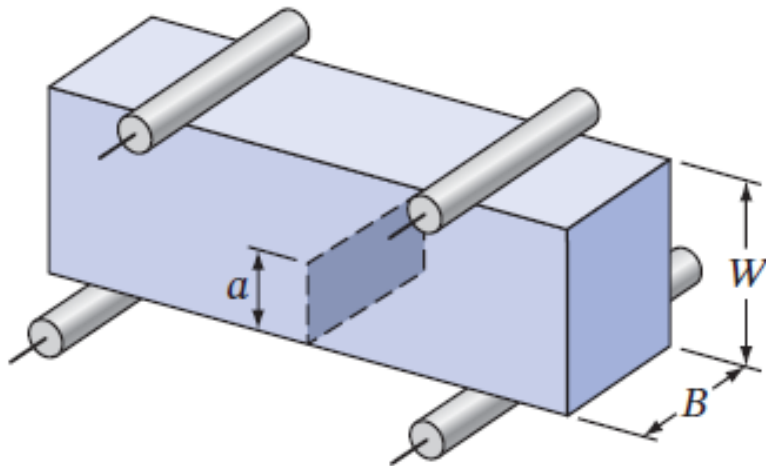
Fattori che Influenzano la Resistenza Meccanica

- La rottura avviene principalmente per difetti superficiali
- I pori sono regioni di concentrazione degli sforzi e di formazione di cricche
- I pori diminuiscono l'area della sezione resistente
- La dimensione dei difetti è correlata alla dimensione dei grani
- I materiali ceramici con dimensioni dei grani piccole hanno minori difetti e quindi sono più forti
- La composizione, la microstruttura, la condizione superficiale, la temperatura e l'ambiente determinano la resistenza meccanica



Tenacità dei Materiali Ceramici

- I ceramici hanno bassa tenacità a causa della loro fragilità
- Molta ricerca è stata svolta per aumentare la tenacità
- La pressatura a caldo con additivi e legami mediante reazioni chimiche aumentano la tenacità
- I valori di K_{IC} sono ottenuti da *prove di flessione a quattro punti*



$$K_{IC} = Y \sigma_f \sqrt{\pi a}$$

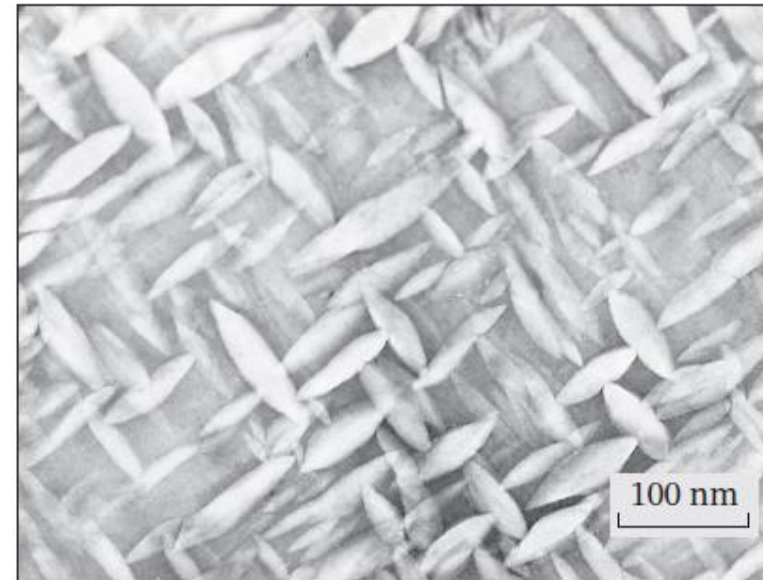
σ_f = sforzo a rottura (MPa)

a = metà del massimo difetto interno

Y = costante adimensionale

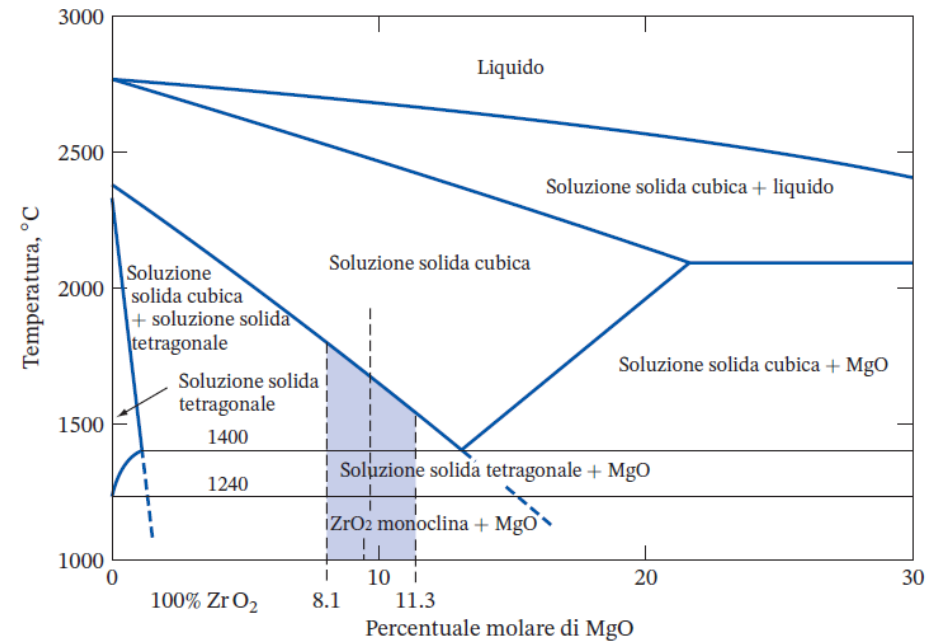
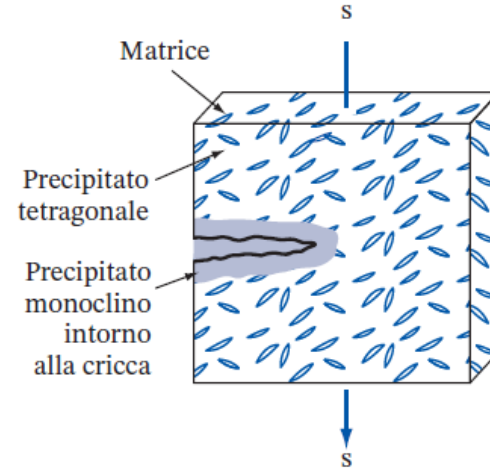
Invecchiamento di ZrO_2 Parzialmente Stabilizzata

- La trasformazione della Zirconia combinata con altri ossidi refrattari (MgO) può produrre materiali ceramici con alta tenacità a frattura
- ZrO_2 esiste in 3 strutture:
 - Monoclina → fino a $1170^\circ C$
 - Tetragonale → $- 2370^\circ C$
 - Cubica → sopra $2370^\circ C$
- L'aggiunta di 10% molare di MgO stabilizza la struttura cubica in modo che a temperatura ambiente possa esistere in uno stato metastabile
- La figura mostra una micrografia TEM di ZrO_2 parzialmente stabilizzato con MgO invecchiato in modo ottimale che mostra il precipitato sferoidale oblato tetragonale



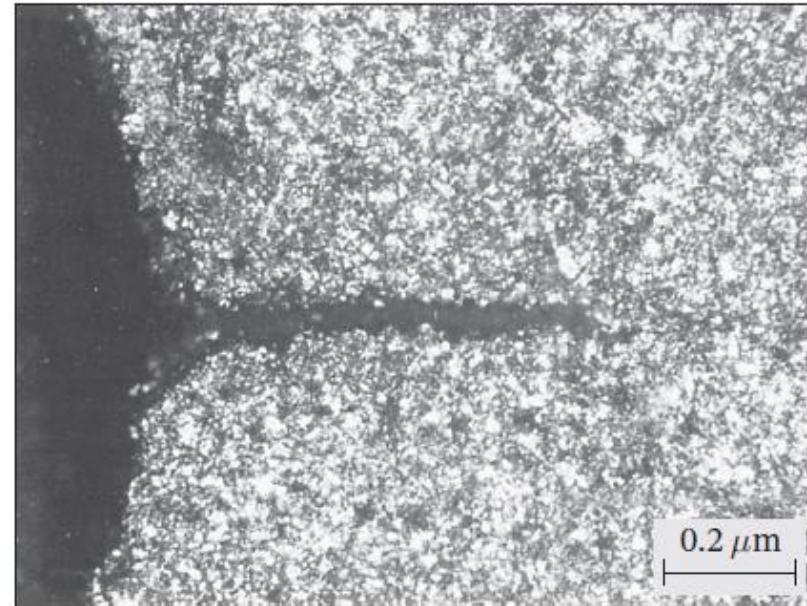
Trasformazione di Tenacizzazione della Zirconia

- Se una miscela di ZrO_2 – 9% molare MgO viene sinterizzata a circa $1800^\circ C$ e raffreddata rapidamente, sarà in uno stato metastabile
- Se riscaldata di nuovo a $1400^\circ C$ e mantenuta a questa temperatura per un tempo sufficiente, precipita un precipitato a struttura tetragonale
- Sotto l'azione di sforzi, questa struttura tetragonale si trasforma in fase monoclinica, aumentando il volume e ritardando la propagazione della cricca



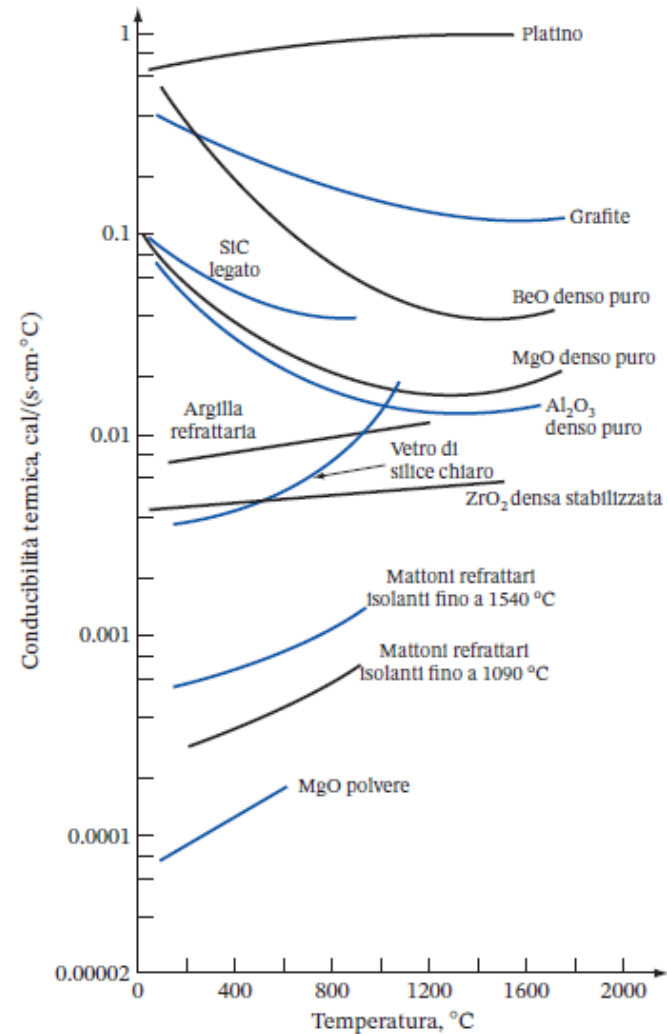
Rottura per Fatica

- La rottura per fatica è rara a causa dell'assenza di deformazione plastica
- Una cricca di fatica diritta è stata riportata per l'allumina dopo 79000 cicli di compressione
- I ceramici sono duri e possono essere utilizzati come abrasivi
- Esempi: Al_2O_3 , SiC
- Combinando diversi ceramici, possono essere sviluppati abrasivi migliori
- *Esempi:* 25% ZrO_2 + 75% Al_2O_3



Proprietà Termiche dei Ceramici

- Bassa conducibilità termica e alta resistenza al calore
- Molti composti sono utilizzati come refrattari industriali
- Per i refrattari isolanti, la porosità è desiderata
- I refrattari densi hanno bassa porosità e alta resistenza alla corrosione e alla erosione
- L'ossido di alluminio e MgO sono costosi e difficili da lavorare e quindi non vengono utilizzati come refrattari

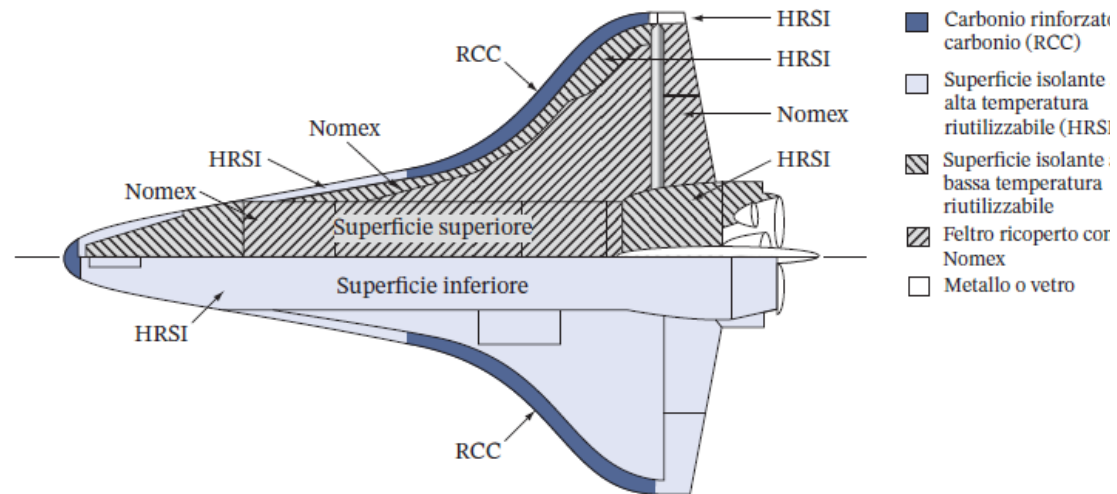
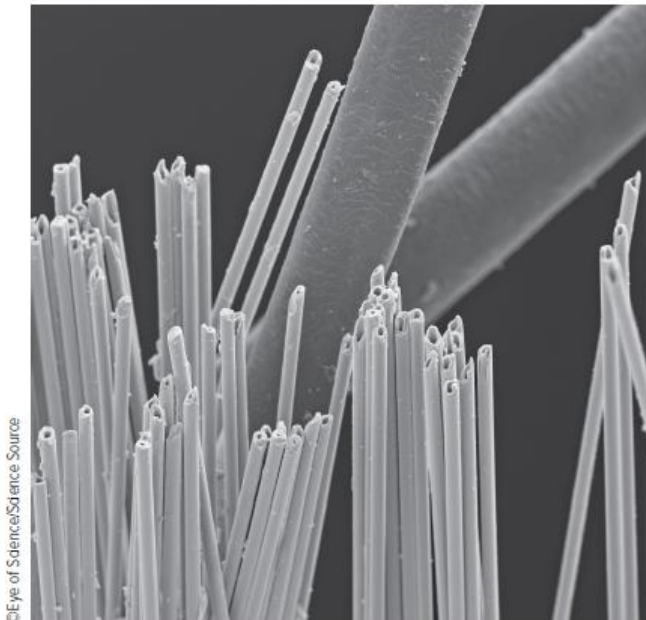


Refrattari Acidi e Basici

- Refrattari acidi:
 - i **refrattari di silice** hanno una elevata resistenza meccanica e rigidità
 - **Argille refrattarie**: miscela di argilla refrattaria plastica, argilla flint e argilla chamotte. Le particelle variano da grossolane a fini
 - **Refrattari ad alto contenuto di allumina**: contiene il 50-90% di allumina e hanno una maggiore temperatura di fusione
- Refrattari basici: formato principalmente da MgO e CaO
 - hanno alte densità, temperatura di fusione e resistenza all'attacco chimico
 - utilizzati come rivestimenti dei convertitori ad ossigeno utilizzati per la produzione dell'acciaio

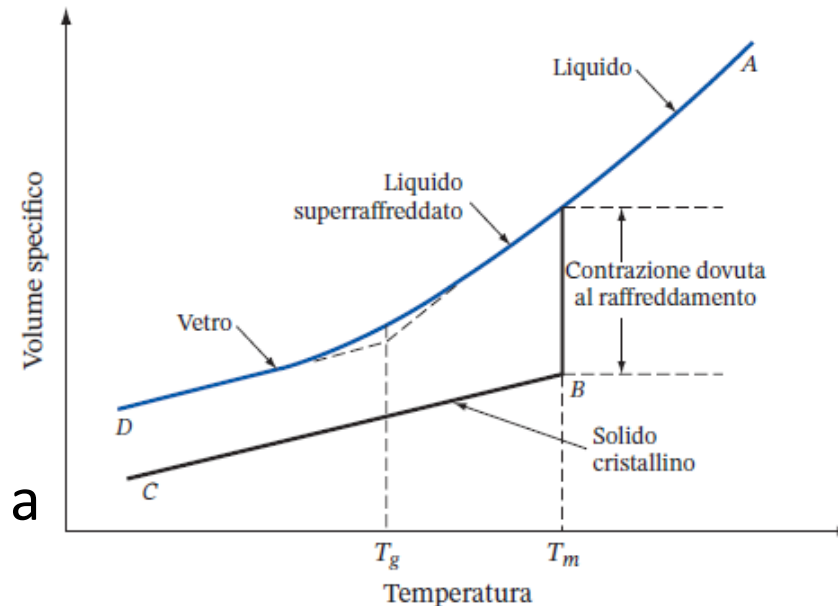
Isolamento per la Navetta Space Shuttle

- Circa il 70% della superficie esterna è protetta dal calore da 24000 piastrelle di materiale ceramico
- Materiale: composto a fibre di silice
- La densità è 142 kg/m^3 e può resistere a temperature fino a 1260°C



Vetri

- Combinazione di trasparenza, resistenza meccanica, durezza e resistenza alla corrosione
- Il vetro è un prodotto inorganico di fusione raffreddato fino ad una condizione rigida senza cristallizzazione
- Il vetro non cristallizza quando raffreddato
- Durante la solidificazione, si trasforma da materiale gommoso a vetro rigido

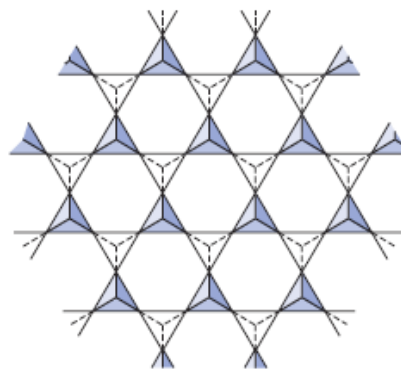


Struttura dei Vetri

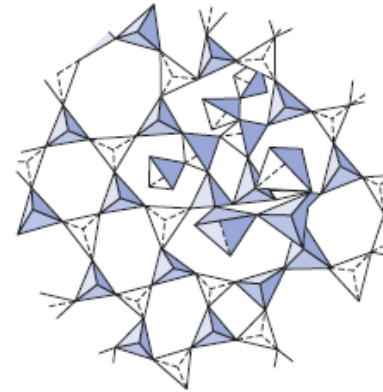
- La subunità fondamentale del vetro è il tetraedro SiO_4^{4-}
- Lo ione Si^{4+} è legato con legame ionico-covalente a quattro atomi di ossigeno
- Nella ***cristobalite***, i tetraedri Si-O sono uniti angolo-angolo formando un ordinamento ad ampio raggio
- Nel semplice vetro di silice, i tetraedri sono uniti angolo-angolo formando un reticolo disordinato



(a)



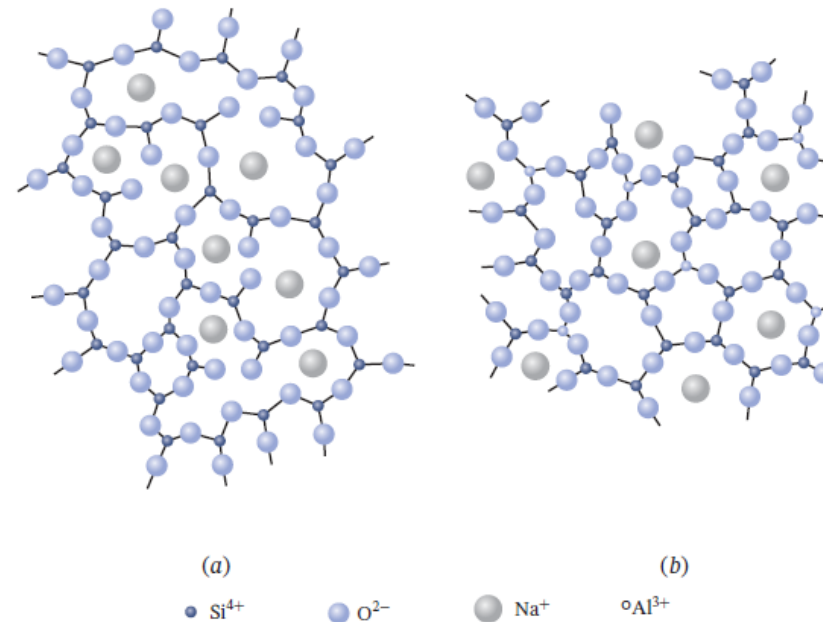
Cristobalite



Semplice vetro di silice

Vetri Modificati da Ossidi e Ossidi Intermediari

- Modificatori di reticolo: ossidi che rompono il reticolo vetroso
 - aggiunti ai vetri per aumentare la lavorabilità
 - Esempi: Na_2O , K_2O , CaO , MgO
 - l'atomo di ossigeno entra nel reticolo e un altro ione si pone negli interstizi
- Ossidi intermediari: non possono formare da soli un reticolo vetroso, ma possono unirsi ad un reticolo preesistente
 - aggiunti per ottenere proprietà speciali
 - Esempi: Al_2O_3 , ossido di piombo



Composizione dei Vetri

- **Vetri sodico-calcici:** vetro molto comune (90%)
 - 71-73% SiO_2 , 12-14% Na_2O , 10-12% CaO
 - più facile da lavorare, utilizzato per lastre piane e recipienti
- **Vetri al borosilicato:** ossidi alcalini sono sostituiti da ossido di boro nel reticolo vetroso di silice
 - noto come vetro Pyrex, viene usato per attrezzature da laboratorio e tubazioni
- **Vetri al piombo:** l'ossido di piombo agisce come modificatore del reticolo e formatore di reticolo
 - basso punto di fusione – usato per vetri a tenuta saldati
 - usato in finestre antiradiazione, vetri ottici e lamine per TV

Deformazione Viscosa dei Vetri

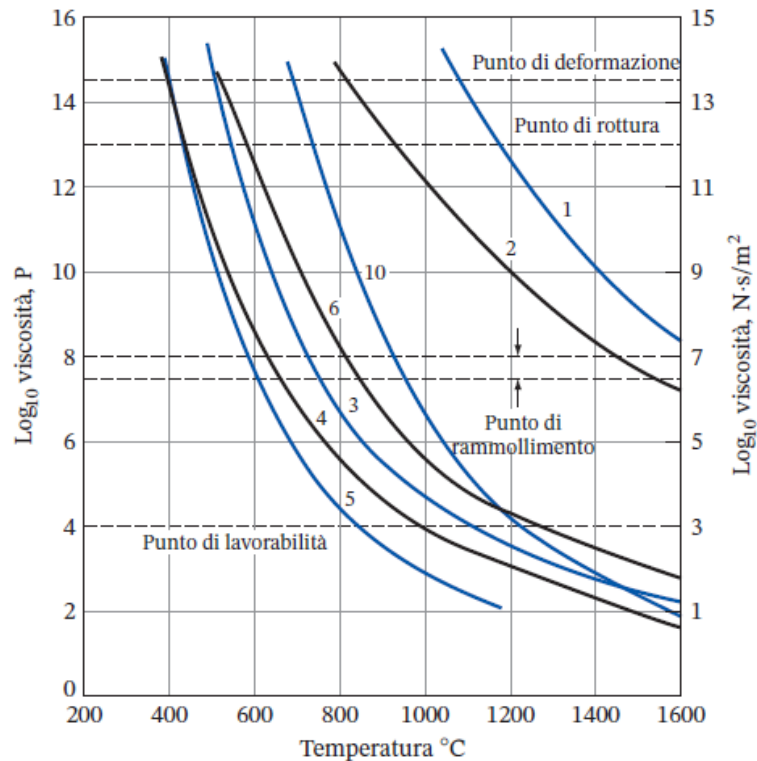
- Il vetro è viscoso sopra la T_g ; la viscosità **diminuisce** all'aumentare della temperatura

$$\eta^* = \eta_0 e^{+Q/RT}$$

Q = energia di attivazione

η^* = viscosità del vetro (Pa·s)

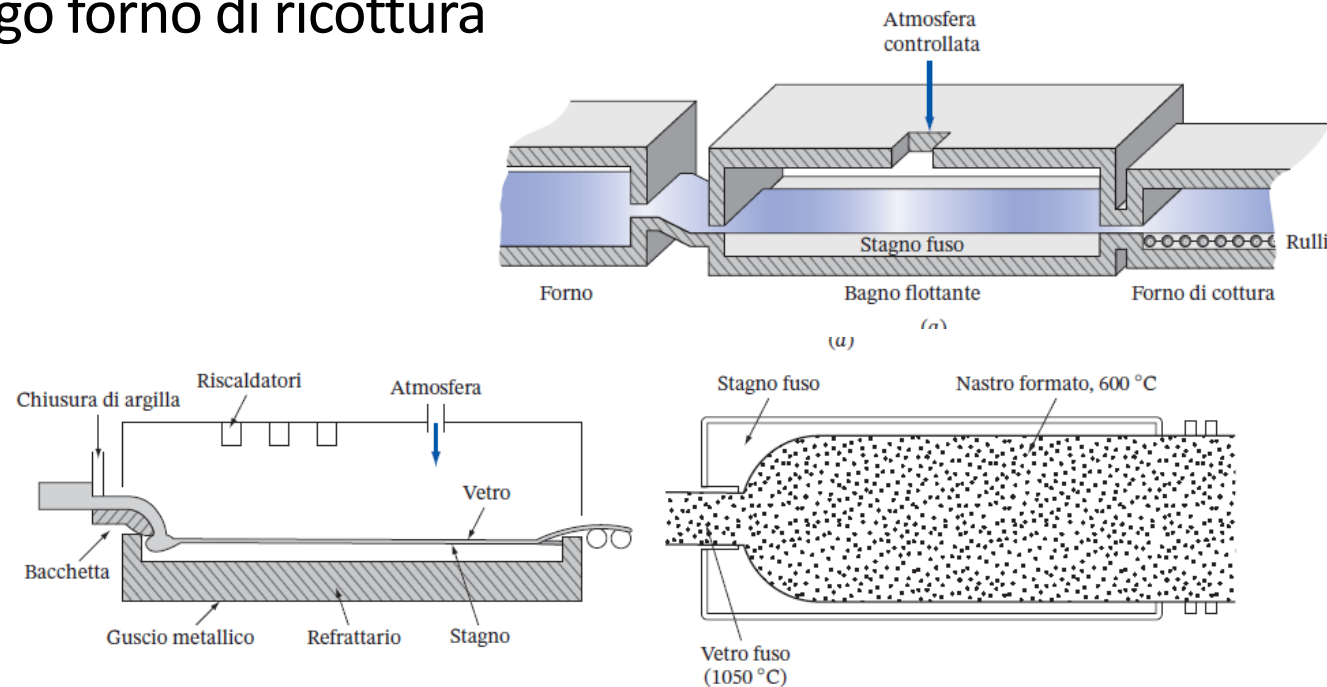
η_0 = costante pre-esponenziale (Pa·s)



1. Punto di lavorabilità: 10³ Pa·s - può essere condotta la fabbricazione del vetro
2. Punto di rammollimento: 10⁷ Pa·s – il vetro scorre sotto il suo proprio peso
3. Punto di ricottura: 10¹² Pa·s – gli sforzi interni vengono eliminati
4. Punto di deformazione: 10^{13.5} Pa·s – il vetro è rigido sotto questo punto

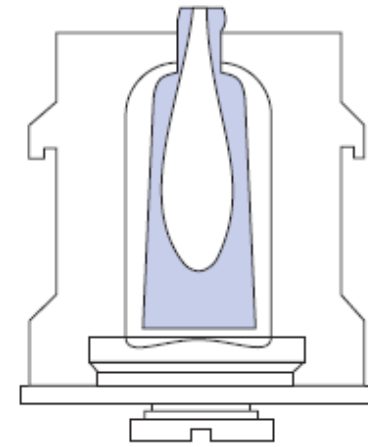
Metodi di Formatura

- Formatura di fogli e lastre di vetro: un nastro di vetro esce dal forno e fluisce sulla superficie di un bagno di stagno fuso
- Il vetro viene raffreddato dallo stagno fuso
- Dopo indurimento, viene tolta dal forno e fatta passare in un lungo forno di ricottura

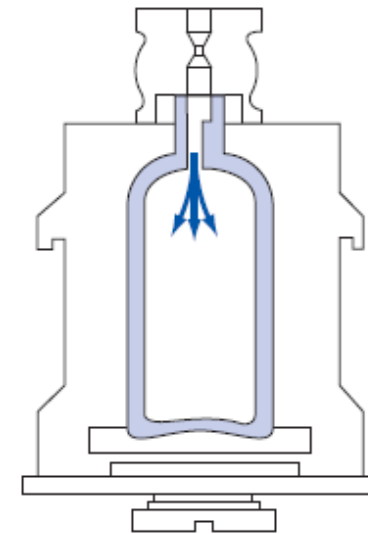


Soffiatura, Stampaggio e Colata

- **Soffiatura:** aria insufflata per forzare il vetro fuso nello stampo
- **Stampaggio:** articoli piani come le lenti ottiche sono prodotti pressando un pistone in uno stampo contenente il vetro fuso
- **Colata:** il vetro fuso è colato in uno stampo aperto
- **Colata per centrifugazione:** gocce di vetro fuso sono fatte cadere su uno stampo rotante



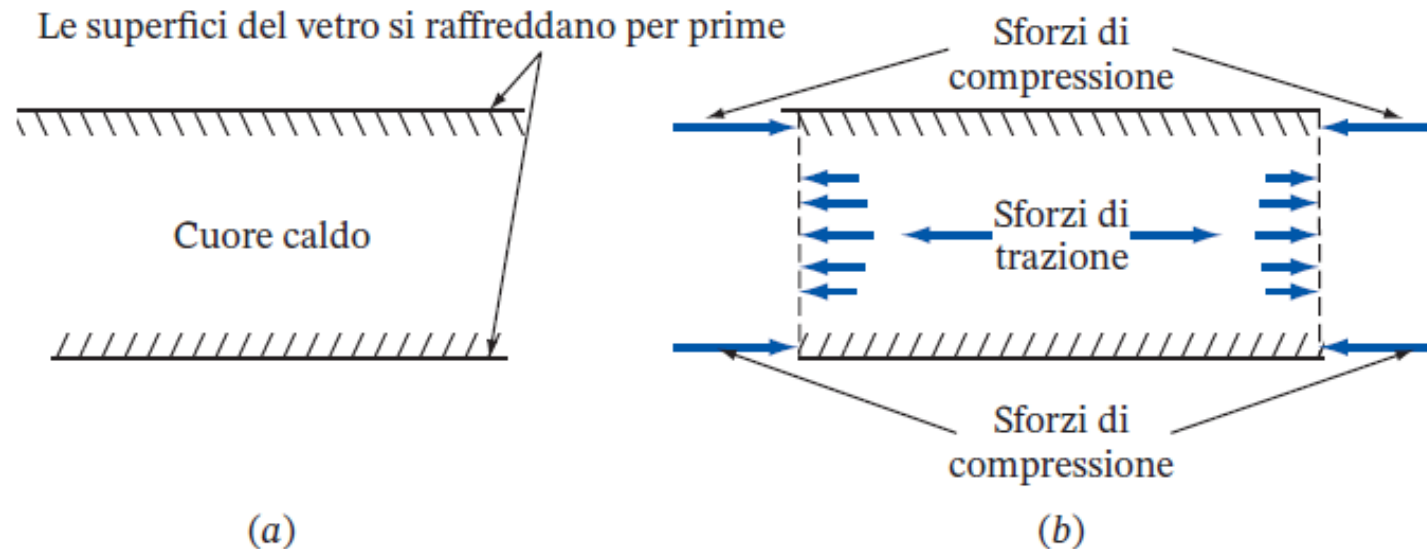
(a)



(b)

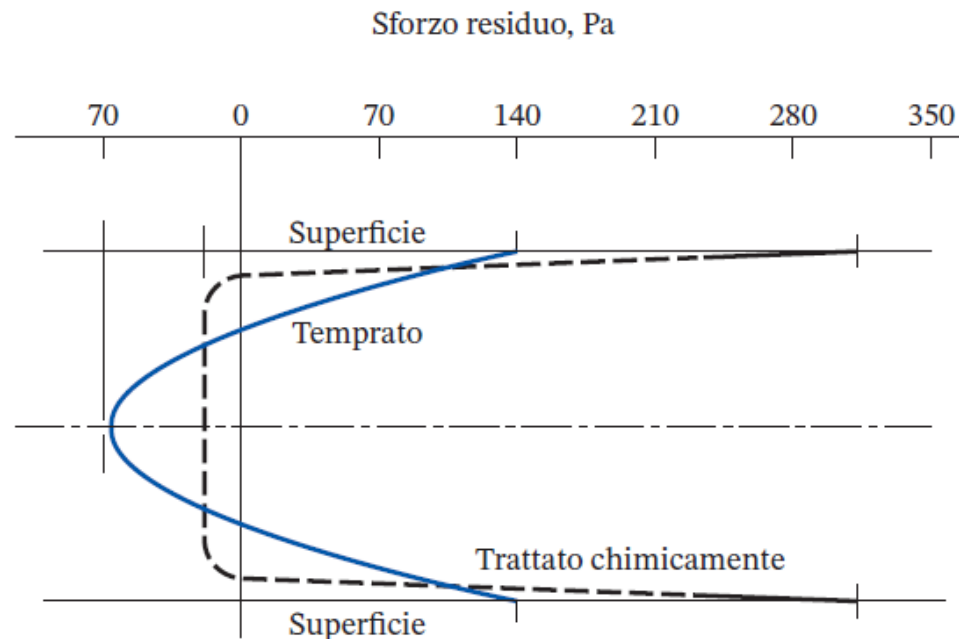
Vetro Temprato

- Il vetro viene riscaldato quasi fino al punto di fusione e poi raffreddato rapidamente
- La superficie si raffredda prima e si contrae
- Quando l'interno si raffredda e si contrae, si creano sforzi di trazione all'interno del vetro e sforzi di compressione sulla superficie
- La tempra rafforza il vetro
- Esempi: finestrini laterali delle automobili e vetri di sicurezza



Vetro Rafforzato Chimicamente

- Trattamenti speciali aumentano la resistenza chimica dei vetri
- Esempio: i vetri sodici allumino-silicati vengono immersi in un bagno di nitrato di potassio a 50°C per 6 - 10 ore
 - grandi ioni potassio sono introdotti sulla superficie provocando sforzi di compressione
 - lo strato di compressione è molto più sottile di quello ottenuto per tempra termica
 - utilizzato per vetrate di aerei supersonici e per lenti oftalmiche



Rivestimenti e ingegneria di superficie

- I rivestimenti proteggono la superficie
- Il rivestimento può essere metallico (cromo), polimerico (pitture) o ceramico
- Il rivestimento ceramico rende la superficie inerte, resistente all'usura e basso attrito
- **Esempi:** vetri silicati, ossidi, carburi, nitruri, boruri
- Vetri silicati:
 - applicato su substrato ceramico è detto **smalto vitreo**
 - applicato su substrato metallico è detto **smalto porcellana**
 - applicato su substrato vetroso è detto **smalto vetroso**
 - usati per i condotti di scarico dei motori e radiatori spaziali
 - ragioni estetiche e protezione ambientale

Rivestimenti di ossido e carburo

- Rivestimento di ossido:
protezione dall'ossidazione
ad alta temperatura
 - la zirconia è rivestita su
parti mobili del motore
 - processo a spray a
fiamma o termico
- Rivestimento di carburo:
protegge dall'usura
 - mulini rotanti rivestiti con
carburo di tungsteno

