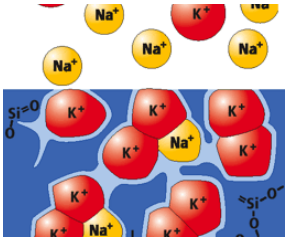
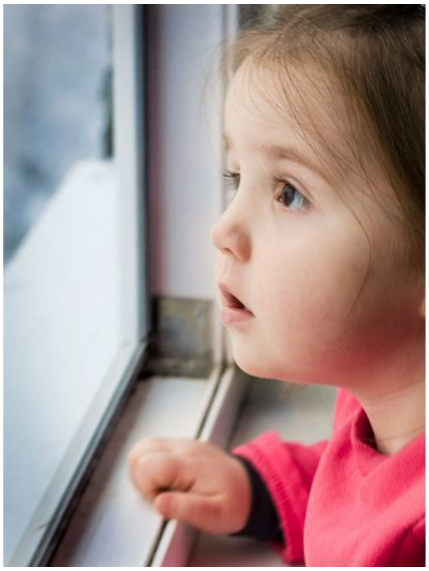
Antonio Licciulli
Corso di scienza e ingegneria dei materiali

Il vetro

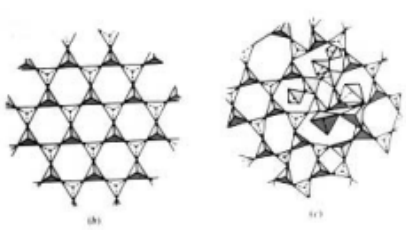


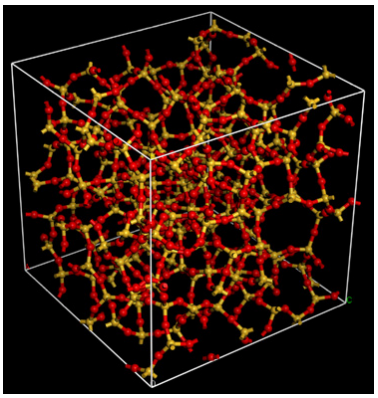
La magia della trasparenza del vetro discende dalla omogenea natura del suo disordine infinito

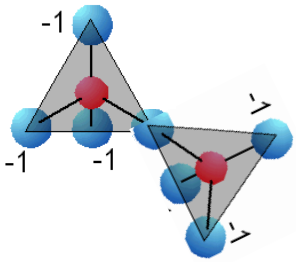


I vetri silicei e non

- **Vetri** = Prodotti inorganici di fusione consolidati raffreddandosi senza cristallizzare
  (definizione secondo ASTM 1972, 13, C242-C272)
- Nella silice cristallina, i tetraedri sono disposti ordinatamente nello spazio (ordine a lungo raggio)
- Nella silice vetrosa l'angolo formato dal legame Si-O-Si assume un numero infinito di valori tra 140° e 180°

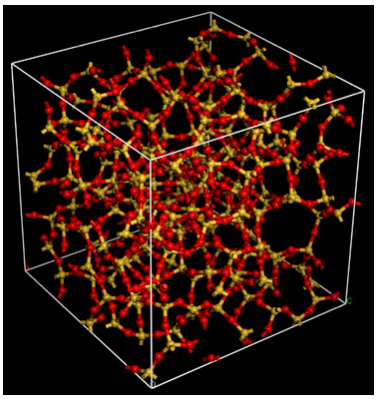






Definizione moderna

- Il vetro è un solido che non possiede ordine atomico a lungo raggio e che, al riscaldamento, rammollisce progressivamente fino a giungere allo stato fuso.
- Mette in evidenza: la struttura non cristallina il fenomeno della transizione vetrosa

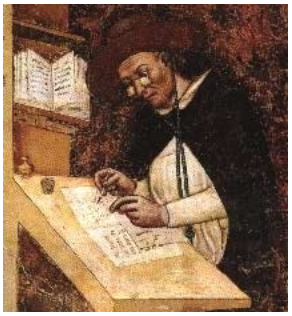


Storia del vetro

~ 3000 AC	Il vetro viene utilizzato nel Caucaso per la colorazione e smaltatura di vasellame
~ 1480 AC	Prima apparizione del vetro in Egitto colorazione con cromofori (Cu, Fe, Mn, Al), vetro cavo
~ 630 AC	Primo manuale sulla lavorazione del vetro Biblioteca d Sardanapal (Assiria) caratteri cuneiformi. Produzione di alcali dalle piante, frittaggi, coloranti
~ 900 AC	Rifioritura dell'industria del vetro in Siria e Mesopotamia
~ 250AC	Scoperta del vetro soffiato
~ 70	I romani trasferiscono la tecnologia del vetro in Europa (Spagna, Francia, Italia)

Storia del vetro

79 Plinio descrive il processo di manifattura del vetro e ne riporta le origini leggendarie attribuendone l'invenzione ai fenici
100 Soffiaggio del vetro in stampi
591 Gregorio di Tour menziona l'utilizzo di finestre di vetro nelle chiese
1180. Per la prima volta finestre di vetro trovano impiego domestico
1453 I segreti dell'arte del vetro si trasferiscono da Bisanzio a Venezia
1500 A Murano viene prodotto vetro per contenitori trasparente
1590 Prodotte dai vetrai di Murano le prime lenti molate per occhiali
1665 Produzione di spechi di grandi dimensioni in Francia



Storia del vetro (continua)

1782. Misura della temperatura tramite pirometri wedgwood

1859 Macchina semiautomatica per la produzione delle bottiglie di vetro

1867 Invenzione del forno di fusione in continua

1925 Processo Pittsburgh per il vetro piano

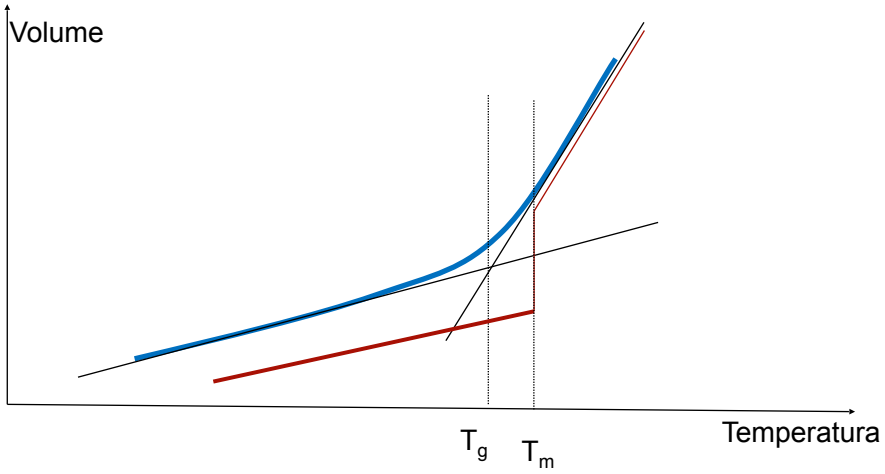
1967 Processo Float

1970 Produzione dimostrativa delle fibre ottiche

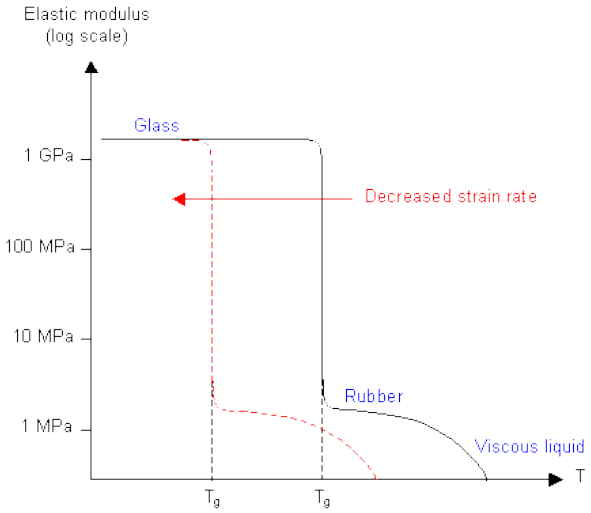
1983 Fibre di mullite estruse con il processo sol-gel

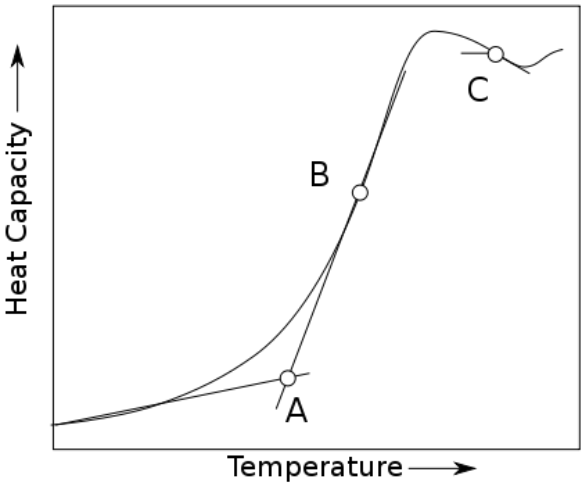
Espansione termica del vetro

- Dalla curva dell'espansione si definisce la temperatura di transizione vetrosa come intersezione
  - tale temperatura dipende dalla velocità di raffreddamento del vetro dalla sua temperatura di fusione



Rigidità e capacità termica nei sistemi vetrosi





Categorie di atomi nella struttura vetrosa

- Dalle regole di Zachariesen's possono derivarsi le seguenti definizioni:
  - **Formatori di reticolo (Network formers)** con numero di coordinazione 3 o 4 (Si, B, P, Ge; As .) e intensità di campo tra 1,4 e 2 N/m
  - **Modificatori di reticolo (Network modifiers)** (Na, Ca, Ba, K.)con numero di coordinazione ≥6 e intensità di campo tra 0,1 e 0,4 N/m
  - **Ossidi intermedi (Network itermediates)** (Al, Li, Zn, Mg, Pb ..) con coordinazione tra 4 e 6 e intensità di campo tra 0,5 e 1 N/m

Ossidi formatori di reticolo vetroso

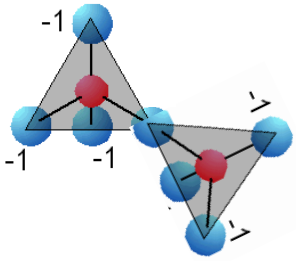
- Ipotesi del "random network" Zachariesen 1933
  - Il vetro è costituito da un network continuo casuale rigido in cui gli atomi si dispongono come allo stato liquido.
  - Zachariesen individua gli atomi inclini a formare strutture di ossidi vetrosi tramite 4 regole:

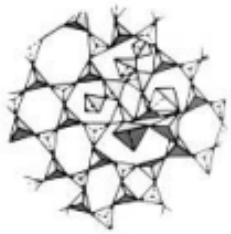
1) l'ossigeno può legarsi al massimo due atomi formatori di reticolo

2) Il numero di coordinazione dell'atomo formatore di reticolo deve essere piccolo (≤4)

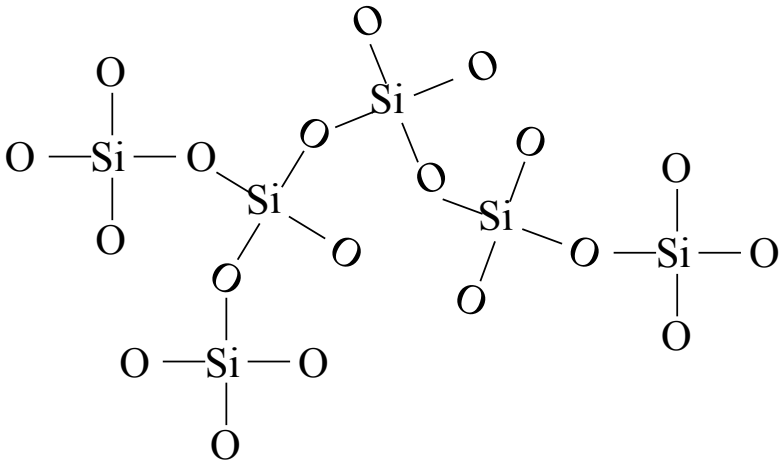
3) I poliedri di coordinazione formati dagli atomi di ossigeno devono condividere gli angoli ma non lati o facce

4) I poliedri legati devono formare una struttura tridimensionale



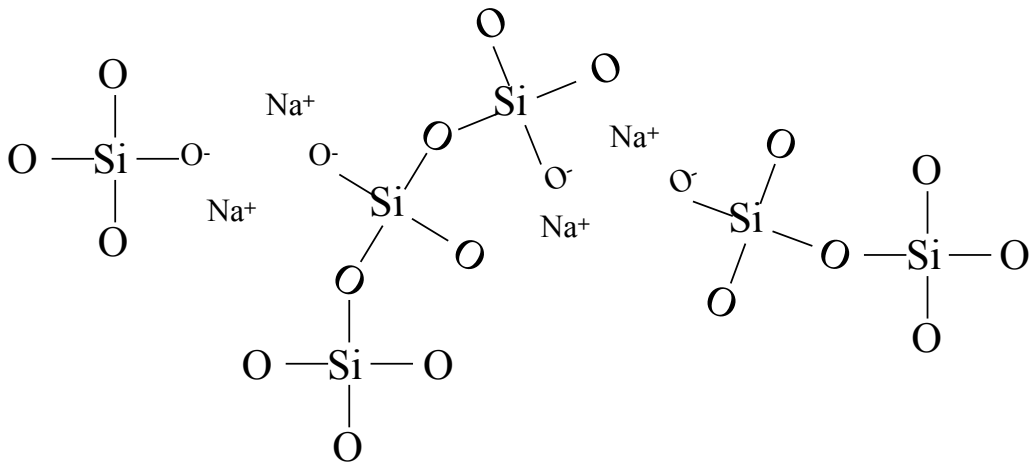


Vetro di pura silice



- Ogni tetraedro si collega a 4 tetraedri condividendo gli angoli non gli spigoli o le facce
- Tutto l'ossigeno è presenta forma legami ponte tra 2 cationi di silicio

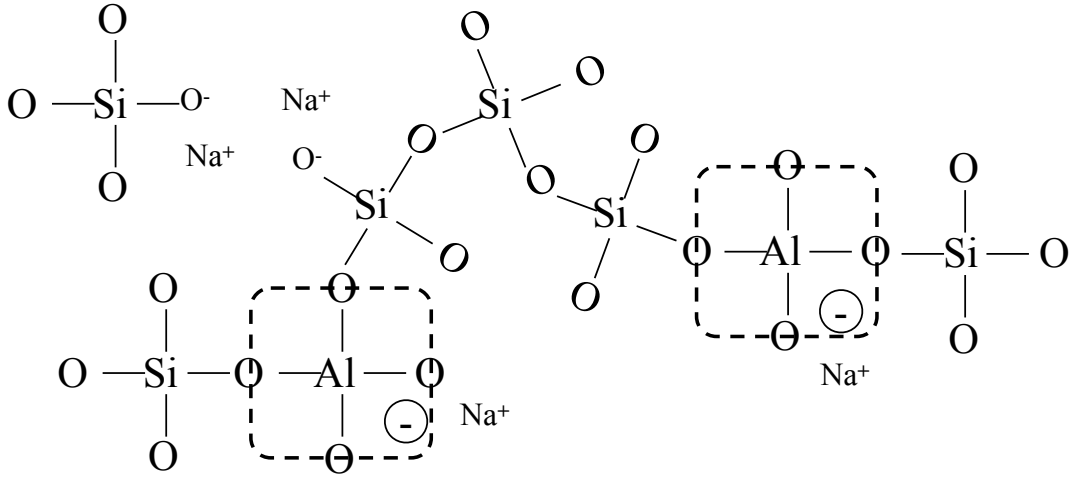
I silicati alcalini



Binary silicate glass ($6SiO_2$-$2Na_2O$)

- Network linkage is broken as entering of network modifier
- Non-bridging oxygen (NBO) is initiated and its charge is compensated with the metal cation

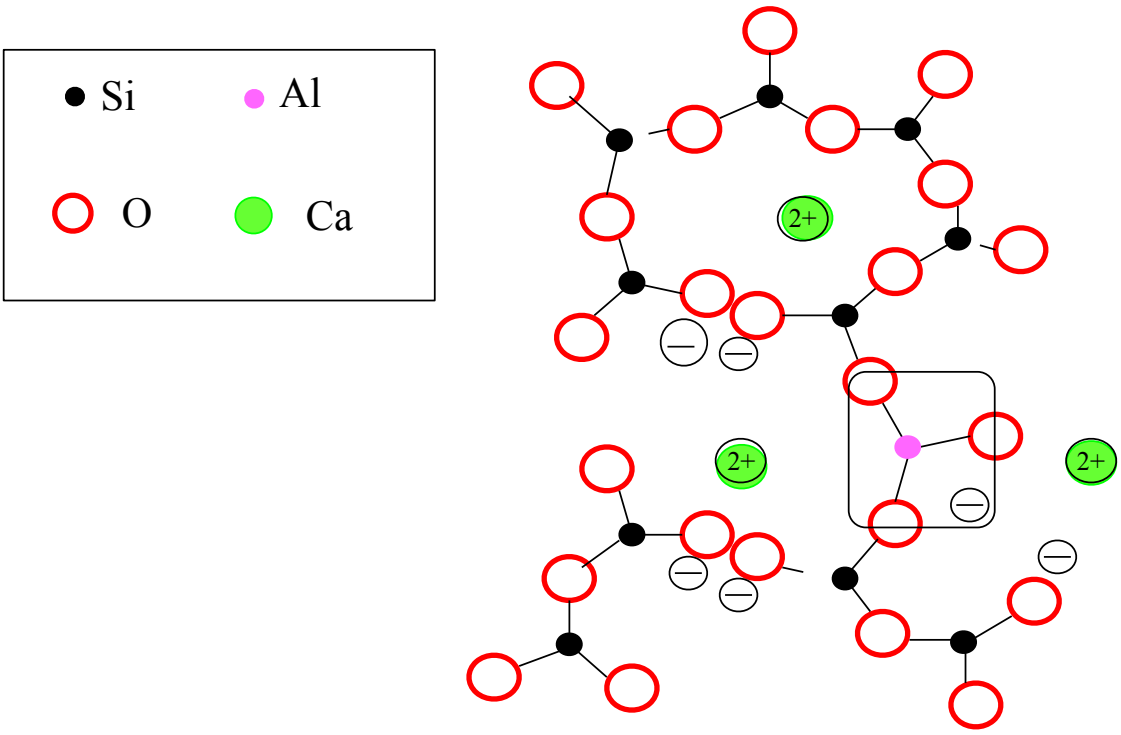
Struttura di un vetro alluminosilicato



Ternary alumino-silicate glass ($6SiO_2$-Al_2O_3-$2Na_2O$)

- La rete è composta da tetraedri di Si e Al
- Parte dei cationi alcalini sono bilanciati dai tetraedri AlO2- e i cationi eccedenti interrompono la catena dei lagami a ponte.

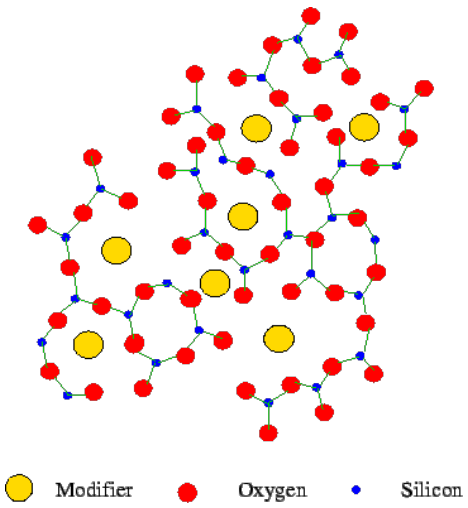
Effetto bridging dei cationi Calcio



Ternary alumino-silicate glass (SiO_2-Al_2O_3-CaO) system

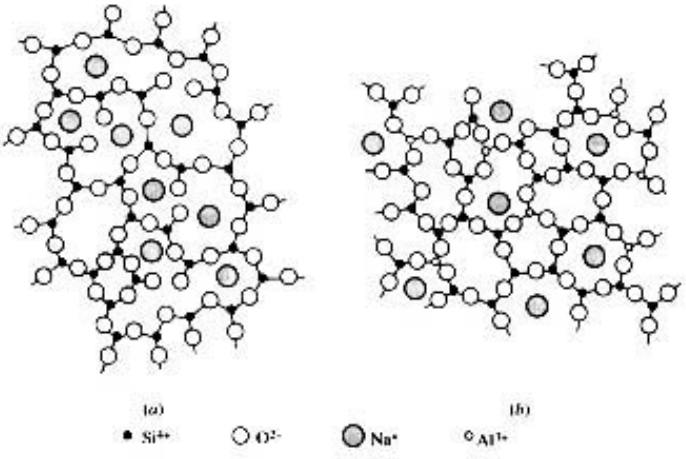
Ossidi modificatori di reticolo

- Alcuni ossidi, come Na_2O, K_2O, CaO, MgO, vengono aggiunti ai vetri di silice per diminuirne la viscosità e permettere la lavorazione a più basse temperature
- Gli atomi di ossigeno si legano ad un solo atomo di silicio, provocando la interruzione della continuità del reticolo
- I cationi invece non entrano nel reticolo della silice



Ossidi intermedi

- Non formano vetri di per se, ma agiscono da formatori di reticolo se aggiunti ad altri ossidi che formano vetri
  - Il catione Al^{3+} soddisfa, nel reticolo di SiO_2 le regole di Zachariasen (CN Al^{3+}=4, CN O^{2-}=2)



Vetro comune o "sodalime"

- La composizione del Vetro Comune o Sodalime (sodico-calcico): 71-73% SiO_2, 12-14% Na_2O, 10-12% CaO
  - Gli ossidi diminuiscono il punto di rammollimento, da 1600°C a 730°C
  - Si aggiunge MgO per prevenire la devetrificazione
  - Si aggiunge Al_2O_3 per migliorare la durabilità

Vetri o "cristalli" al piombo ?

- **Vetri al piombo (comunemente e impropriamente detti cristalli)** sono caratterizzati da
  - brillantezza, elevato indice di rifrazione per la luce
  - bassa temperatura di rammollimento.
  - lavorabilità alle mole (effetto swarowski, intaglio e incisione)

- A questa classe appartengono
  - Cristalli pesanti: con più di 30% di ossido di piombo.
  - Mezzi cristalli: contenenti quantità minori di ossidi di piombo, assieme ad altri ossidi come il bario e lo zinco.
  - Cristalli di Boemia: vetri sodico-calcio-potassici privi di impurità e con buona brillantezza.

Vetri più comuni

vetro	SiO_2	Na_2O	K_2O	CaO	B_2O_3	Al_2O_3	altri	proprietà
1 silicico	99.5+							Difficile da lavorare, ottime resistenza shock termici
2 96% silice	96.3	<0.2	<0.2		2.9	0.4		
3 sodico-calcico	71-73	12-14		10-12		0.5-1.5	MgO, 1-4	Facile da lavorare
4 silicato di piombo	63	7.6	6	0.3	0.2	0.6	PbO, 21 MgO, 0.2	Facile da fondere e fabbricare
5 alto piombo	35		7.2				PbO, 58	
6 borosilicato	80.5	3.8	0.4		12.9	2.2		Bassa espansione e buona resistenza shock termici
7 bassa perdita elettrica	70		0.5		28	1.1	PbO, 1.2	
8 alluminoborosilicato	74.7	6.4	0.5	0.9	9.6	5.6	B_2O, 2.2	Durabilità chimica
9 bassi alcali (vetro E)	54.5	0.5		22	8.5	14.5		Compositi a fibre di vetro
10 alluminosilicato	57	1		5.5	4	20.5	MgO, 12	
11 vetro-ceramica	40-70					10-35	MgO, 10-30 TiO_2, 7-15	

Il vetro borosilicato e il vetro Pyrex

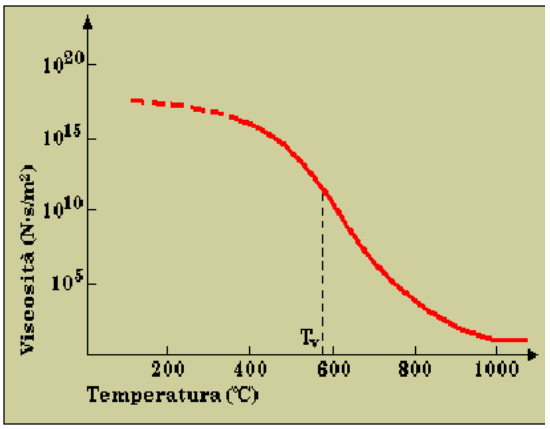
- L'aggiunta di boro (15-30 mol%) riduce la viscosità del fuso ma in maniera meno pronunciata che silicati alcalini.
- L'espansione termica è ridotta ed i vetri possie buona resistenza agli shock termici e agli agen chimici.

- Nel vetro **Pyrex** si parte da Na_2O 4%, B_2O_3 16%, SiO_2 80%, per effetto della immiscibilità si forma una fase "matrice" ricca in e una fase a gocce isolate ricca in e sodio
- Applicazioni
  - Stoviglieria da forno
  - Vetreria da laboratorio
  - Bulbi per lampade
  - Tubature

Deformazione viscosa

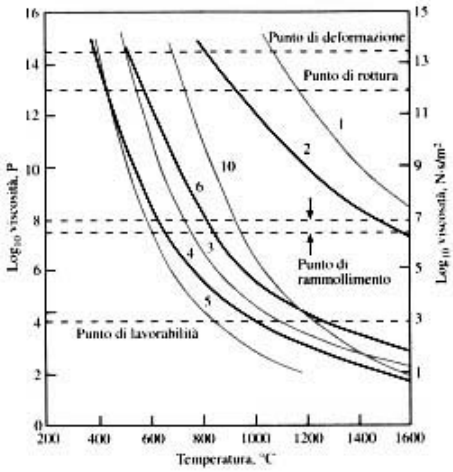
- Il vetro si comporta da liquido viscoso (sottoraffreddato) al di sopra della temperatura di transizione vetrosa
- Se una forza è applicata, si verifica la deformazione permanente del vetro
- Lo scorrimento viscoso aumenta all'aumentare della temperatura al di sopra della transizione vetrosa, seguendo una legge di tipo Arrhenius:

$$\eta = \eta_0 \exp(Q / RT)$$



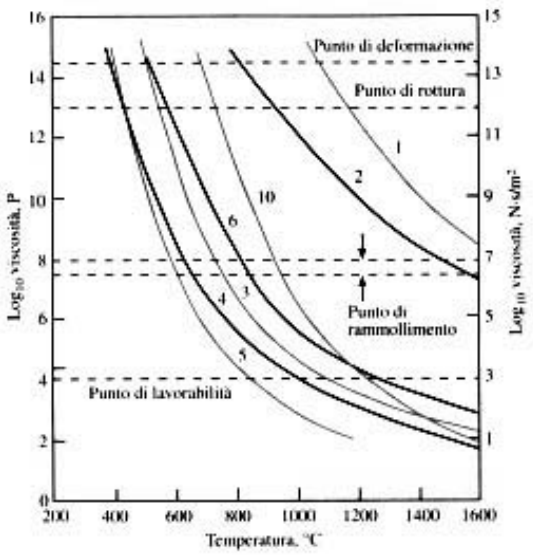
Proprietà reologiche dei vetri

- La viscosità del vetro vs temperatura è la proprietà fondamentale che determina i processi di fusione formatura, tempra etc.
- Si definiscono le seguenti temperature di riferiment (normativa ASTM):
  - **Working point** ⇒ Temperatura in cui la viscosit del vetro è 10^3Pa*s
    - Il vetro è sufficientemente fluido per la maggior parte dei processi di formatura
  - **Upper end** ⇒ Temperatura alla quale il vetro è pronto per essere lavorato
  - **Lower end** ⇒Temperatura alla quale la viscosit è > 10^3Pa*s
    - il vetro è sufficentemente viscoso da conservare la forma
  - **Softening point** (punto di rammollimento)⇒ il vetro scorre con il suo peso. Temperatura corrispondente alla viscosità $10^{6,6}$Pa*s (densità 2,5g/cm, Tensione sup. 0,3N/m)



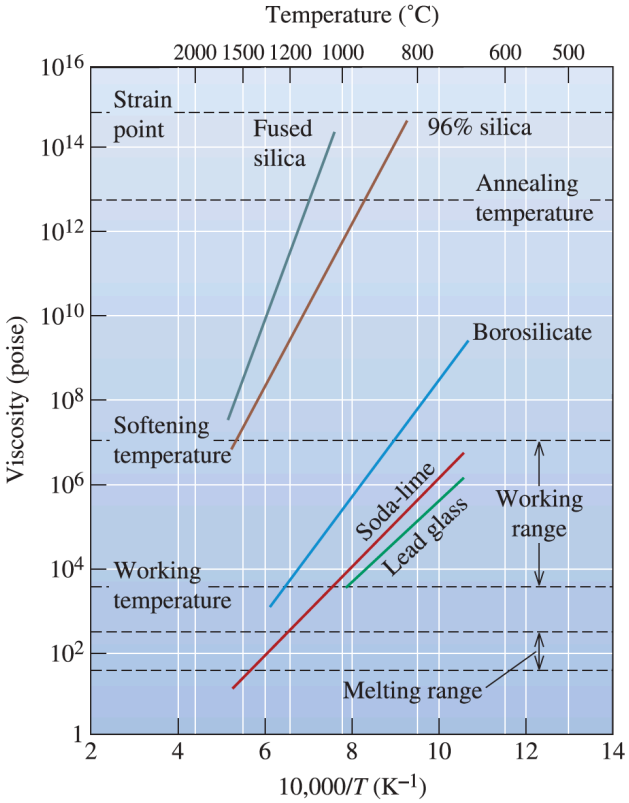
Temperature e reologia

- **Annealing point** ⇒Temperatura alla quale gli stress interni sono ridotti al valore di 1,7MPa in 15 minuti, Punto di ricottura $\eta \approx 10^{12}$ Pa*s caratterizza il punto in cui si eliminano gli sforzi interni
- **Strain point (T_g)** ⇒ Temperatura alla quale gli stress sono rilasciati in 4h
  - Temperatura di transizione da comportamento viscoelastico a comportamento fragile
- **Upper use temperature** ⇒ Coincidente approx. Con lo strain point, Punto di deformazione $\eta \approx 10^{13.5}$ Pa*s caratterizza il punto al di sotto del quale il vetro è rigido



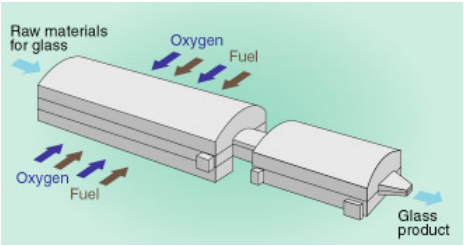
Linearizzazione delle curve reologiche

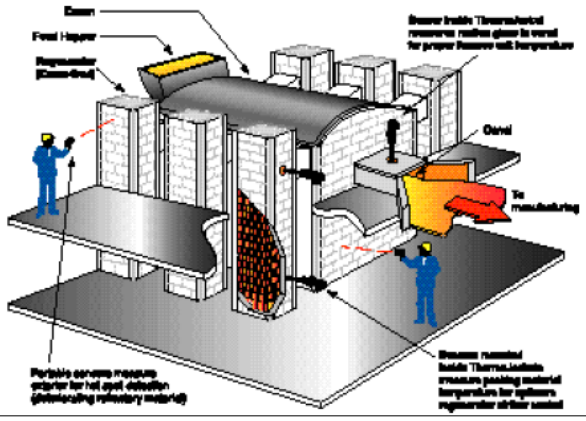
- La dipendenza da Arrhenius si evidenzia ricostruendo il grafico con l'inverso della temperatura ed il logaritmo della viscosità



Materie prime e composizione del batch

- Gli "ingredienti principali per un bagno di fusione sono tre:
  - un **vetrificante** silice introdotta sotto forma di sabbia
  - un **fondente** soda o potassa sotto forma di solfato o carbonato
  - uno **stabilizzante** che conferisce al vetro insolubilità in acqua
- Il vetro riciclato è la materia più costosa, serve per facilitare la fusior degli altri elementi, ridurre la temperatura di fusione, l'energia di fusione (-25%), la polvere

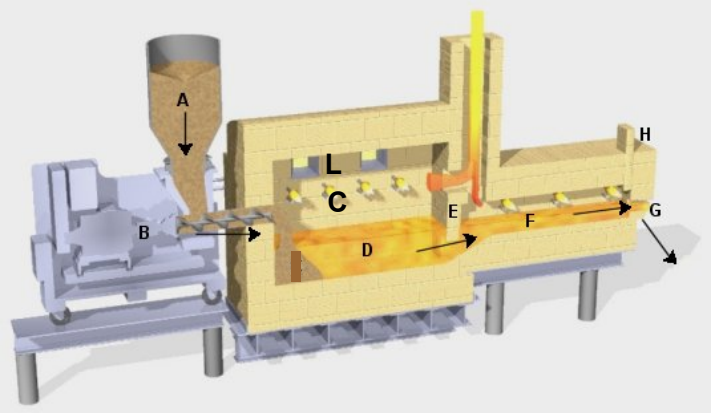




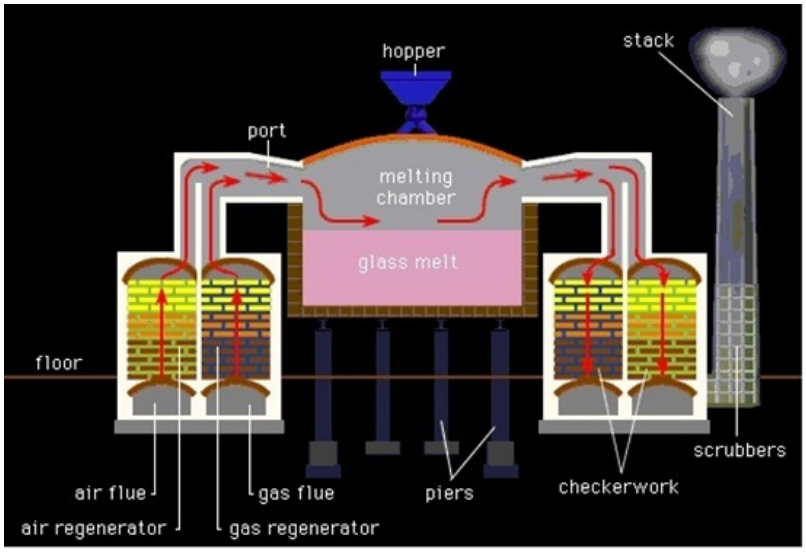
I forni a rigenerazione (Martin-Siemens)

- Questi forni sono in grado di recuperare in circolo il calore prodotto.
- L'efficienza di produzione è pari a 2t/m^2 e un consumo pari a 10.000KJ/Kg, efficienza 30%, produzioni giornaliere fino 700t/giorno, temperatura di fusione di 1400°C.

- A e B: Feeder e tramoggia per l'immissione delle polveri dei precusori
- **C**: bruciatori
- **D**: fuso
- **E**: setto di separazione
- **F**: fuso separato
- **L**: uscita gas esausti ai recuperatori



Schema di funzionamento del forno martin siemens

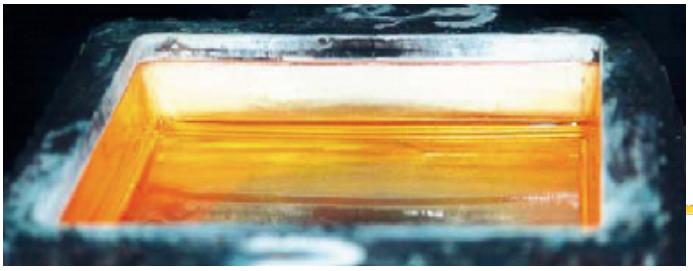


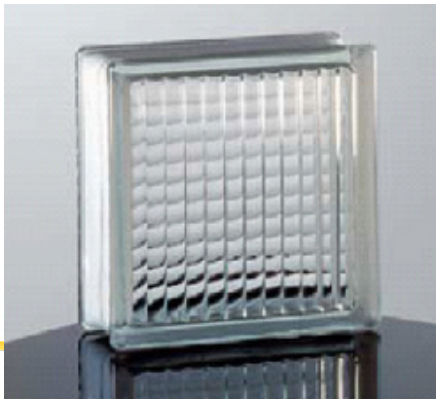
Raw Ingredients of Glass:
1. Calcium Carbonate
2. Waste Glass
3. Sand
4. Sodium Carbonate

Vetro soffiato

Il vetromattone

- Costituito da due sezioni di vetro pressato incollate e sigillate ad alta temperature.
- Si crea in questo modo una camera depressurizzata che impedisce la condensa e migliora l'isolamento termico.



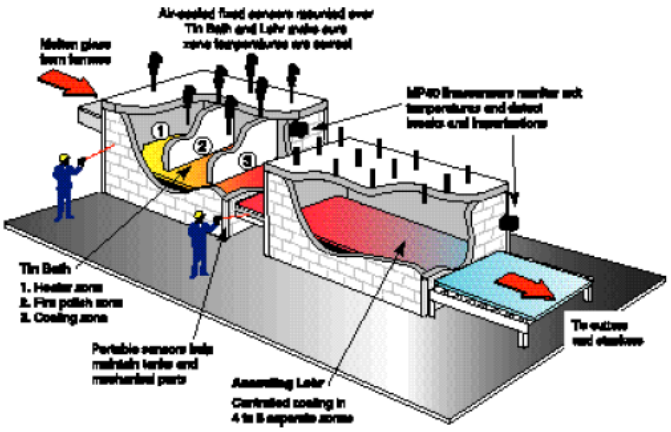


Vetro piano per soffiatura

- Lavorazione a cilindro tipica della Lorena
- Una quantità di pasta tra 9Kg e 19 Kg viene soffiata e fatta roteare a formare un cilindro di 50cm di diametro e 1,25-2m di lunghezza
- Le estremità vengono tagliate e il cilindro viene inciso nella sua lunghezza con una punta di diamante
- Il cilindro viene posto nel forno di annealing e aperto a formare una lastra

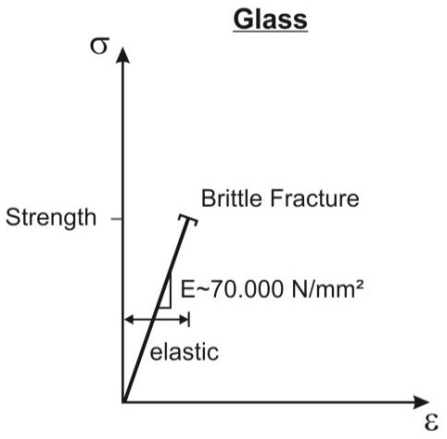
Il processo Pilkington Float

- Introdotto nel 1959 ha soppiantato tutti gli altri metodi di formatura di vetro piano.
- Il forno di fusione misura 9m di larghezza x 45m di lunghezza contiene oltre 1200t di vetro.
- Il vetro fuso viene fatto scorrere su un bagno di stagno fuso ampio 3-4m e lungo 50m, spess 6cm.
- Si usa lo stagno per la sua tensione superficiale la sua densità e il suo basso punto di fusione.
- Un impianto float può produrre 400t / giorno con una forza lavoro di 4 persone per turno



Proprietà dei vetri

- A temperatura ambiente il vetro ha un comportamento fortemente fragile
- E=70 GPa
- $\sigma_{R,C}$=1 GPa
- $\sigma_{R,T}$=100 MPa (essendo molto sensibili alla presen di difetti, dipende molto dalla finitura superficiale)
- Durezza Vickers 550-600
- Tenacità a frattura (Mpa*$m^{1/2}$)=0.75
- CTE (K^{-1})=5*10^{-7}(vetri alla silice)- 9*10^{-6}(vetri sodico-calcici)



Vetri stratificati

- Vetri costituiti da due o più lastre unite all'interfaccia attraverso uno strato polimerico trasparente
- Buona aderenza dello strato polimerico, stesso indice di diffrazione del vetro, elevato allungamento a rottura (polivinilbutirrale (PVB))
- Quando il vetro si rompe, i frammenti restano attaccati alla superficie del film plastico
- Maggiori resistenze si ottengono aumentando gli spessori, ed utilizzando più lastre di vetro alternate a strati di film polimerico

Proprietà Meccaniche a confronto

ANNEALED GLASS
Uniform Tension/Compression

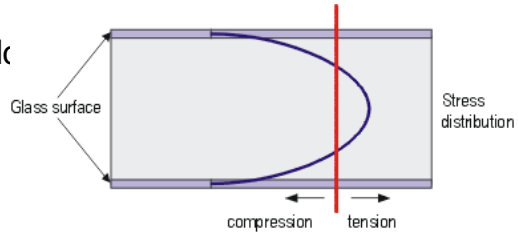
HEAT-STRENGTHENED GLASS
Moderate Tension/Compression
EC 5500 psi SC 3500-7500 psi

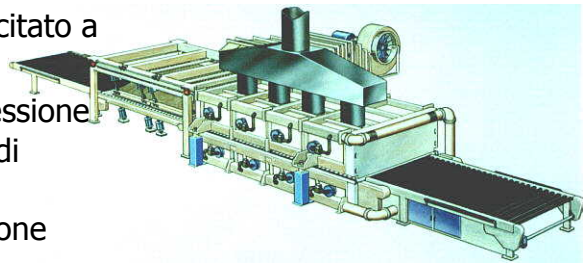
TEMPERED GLASS
Extreme Tension/Compression
EC 9700 psi SC 10000 psi

Glass / Feature	Tempered glass	Heat-strengthened glass	Annealed glass
Safety	good	common	No
Mechanical strength	120Mpa	70Mpa	45Mpa
Thermal shocking	200℃	100℃	40℃
Surface compression	≥90Mpa	24-69Mpa	------
Fragmentation	Obtuse-angle grain	Radial crack	sharp
Spontaneous breakage	Yes	No	No
Thermal stress breakage	No	No	Yes

Tempra termica

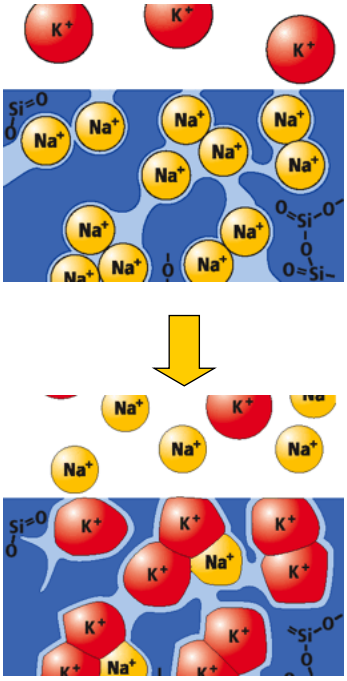
- Il vetro temprato viene ottenuto raffreddando molto rapidamente il vetro dopo che è stato scaldato al di sopra della T_g
- La superficie si raffredda per prima e solidifica
- Il cuore si raffredda dopo, e la sua contrazione è ostacolata dallo scheletro già formatosi (superficie rigida)
- L'interno dello strato resta quindi sollecitato a trazione
- Poichè il vetro resiste meglio a compressione che a trazione se si applica uno sforzo di trazione, esso deve superare la precompressione e la resistenza a trazione prima che la lastra si rompa



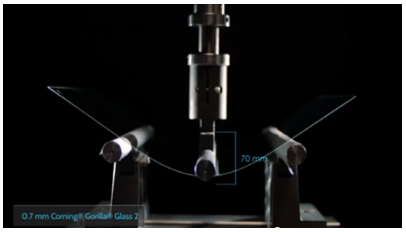


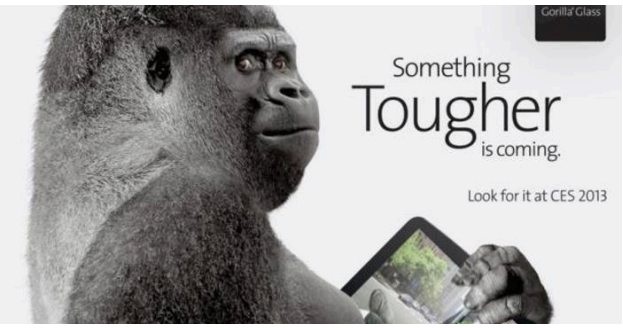
Tempra chimica

- E' un processo di scambio ionico che aumenta la resistenza del vetro.
- Tipiche condizioni di lavoro: bagno di nitrato di potassio fuso ad una temperatura inferiore di 50°C rispetto allo strain point (ca 500°C), durata del processo 6-10h.
- Lo ione Na^+ si scambia con il più ingombrante ione K inducendo nei primi 10μm di spessore uno stress compressivo di 450MPa
- La tempra chimica è più efficace ad aumentare la resistenza in lastre sottili rispetto alla tempra termica,
- Lo spessore sottile interessato determina un notevole infragilimento per abrasione
- Si applica alle lenti da vista, ai finestrini degli aerei ….



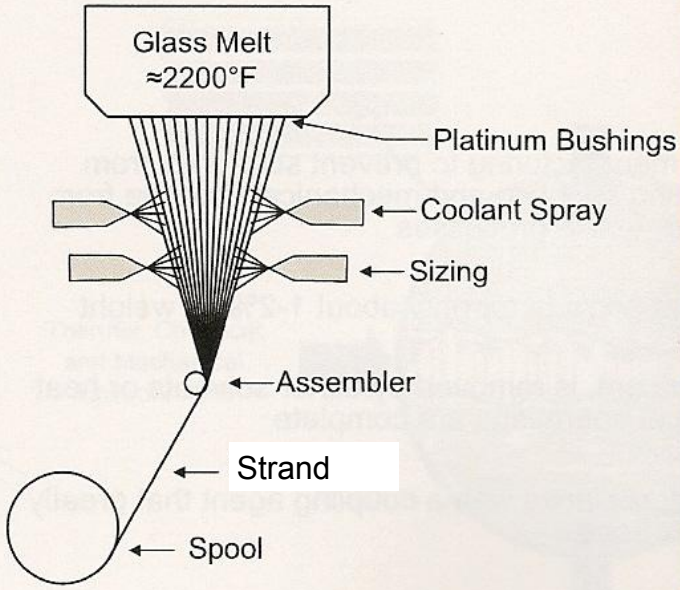
Tempra chimica del Gorilla glass (Corning)

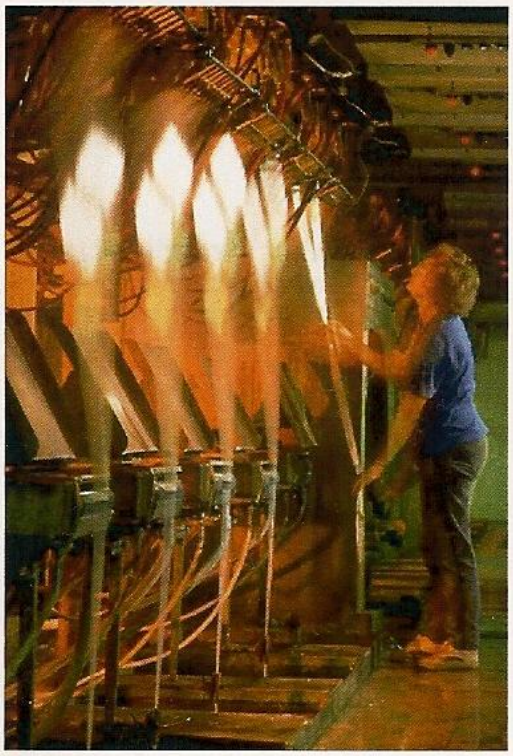




Gorilla Glass Bath in Sodium Ions

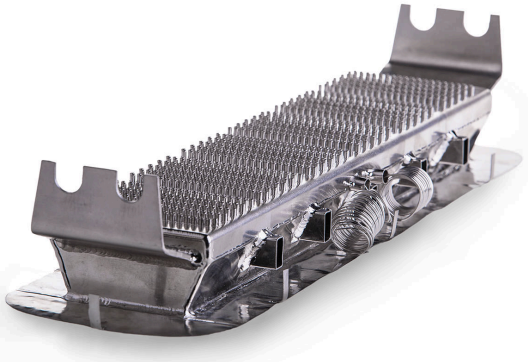
Glass Fiber Manufacturing



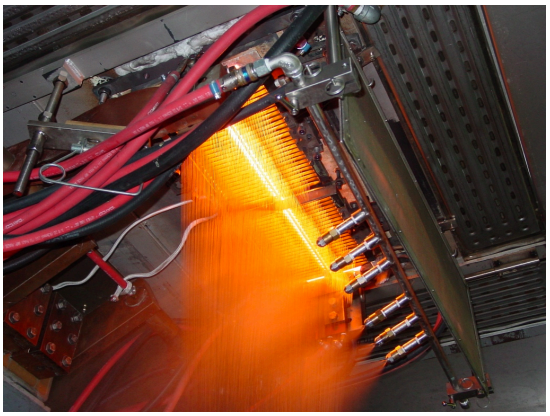


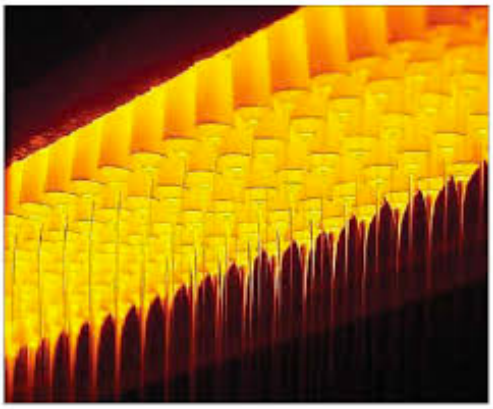
Estrusore in platino per fibre di vetro e basalto

- The bushing is rectangular shaped platinum alloy box with a large top opening and a multiplicity of orifices or tips in the base.
- The bushing is electrically heated and the bushing acts as a "thermal valve" and accurately controls the flow of glass through it over a long period of time.
- Thermocouples attached to the bushing send a control signal to a PID controller, which then controls a SCR Power Pack used to regulate the supply voltage to a highly turned down special water cooled transformer.
- Large copper buss bars and clamps complete the circuit between the transformer and bushing.



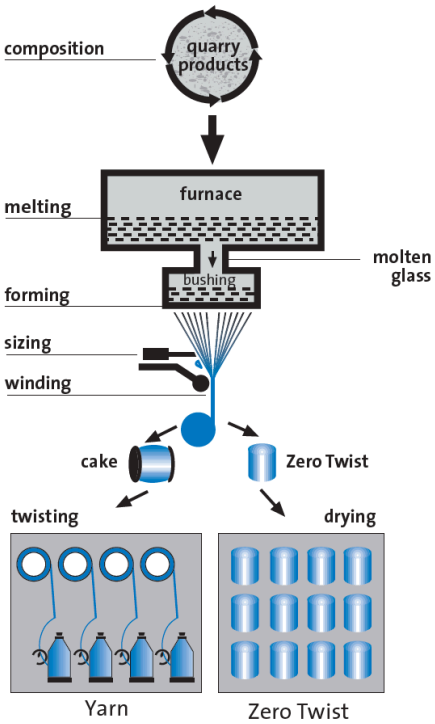
Glass and Basalt fibre from bushings

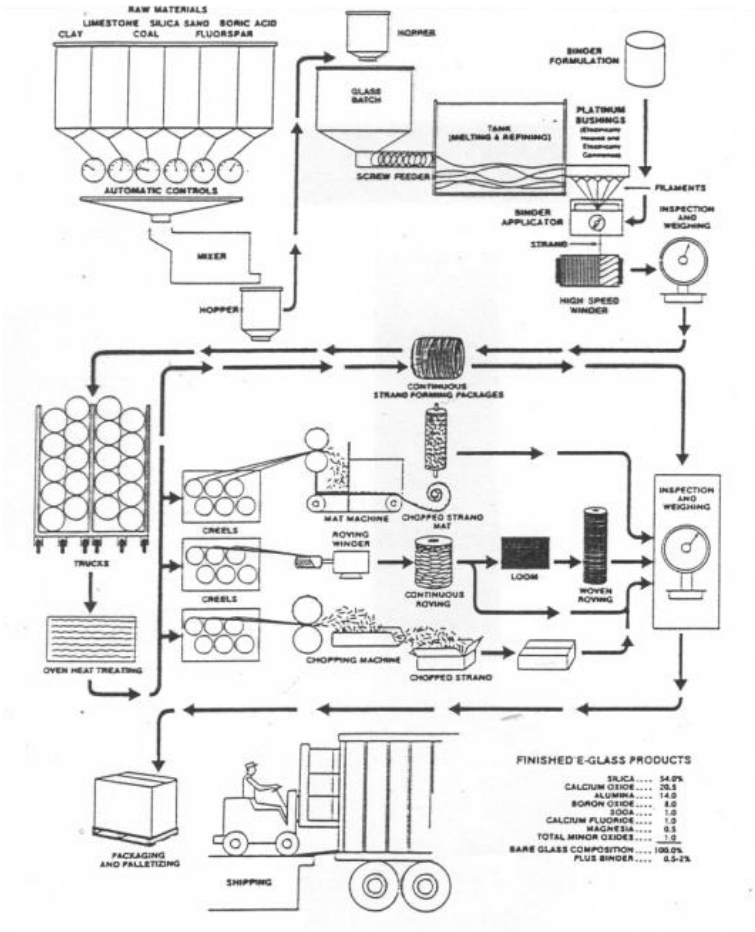




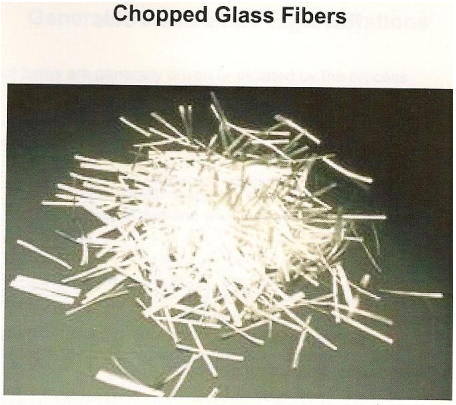
Parametri di processo

- The molten glass flows to platinum/ rhodium alloy bushings and then through individual bushing tips and orifices ranging from 0.76 to 2.03 mm (0.030 to 0.080 in) and is rapidly quenched and attenuated in air (to prevent crystallization) into fine fibers ranging from 3 to 35 µm.
- Mechanical winders pull the fibers at lineal velocities up to 61m/s over an applicator which coats the fibers with an appropriate chemical sizing to aid further processing and performance of the end products.





Glass fibres



Confronto tra le tipologie di fibre

Fibra	Densità (g/cm^3)	Modulo a trazione (GPa)	Resistenza a trazione (MPa)	Modulo a trazione specifico (MN*m/kg)	Resistenza a trazione specifico (MN*m/kg)	Coefficiente di espansione termica (10^{-6} m/m°C)	Diam (μm)
E-glass	2.54	72	2400	29	0.95	2.8	10-20
S-glass	2.49	86	4300	34	1.7	5	10-20
Carbon HS (PAN)	1.76	228	3500	129	2	-0.1 ÷ -0.5	7
Carbon HM (PAN)	1.77	390	3100	220	1.7	0.5 ÷ -1.2	
Carbon UHM (PAN)	1.85	440	2000	237	1.08	-0.1 ÷ -0.5	
Kevlar 29	1.44	70	3600	49	2.5		12
Kevlar 49	1.45	140	3600	97	2.48	-2	
Kevlar 149	1.47	160	3200	109	2.18		

IL SOLE

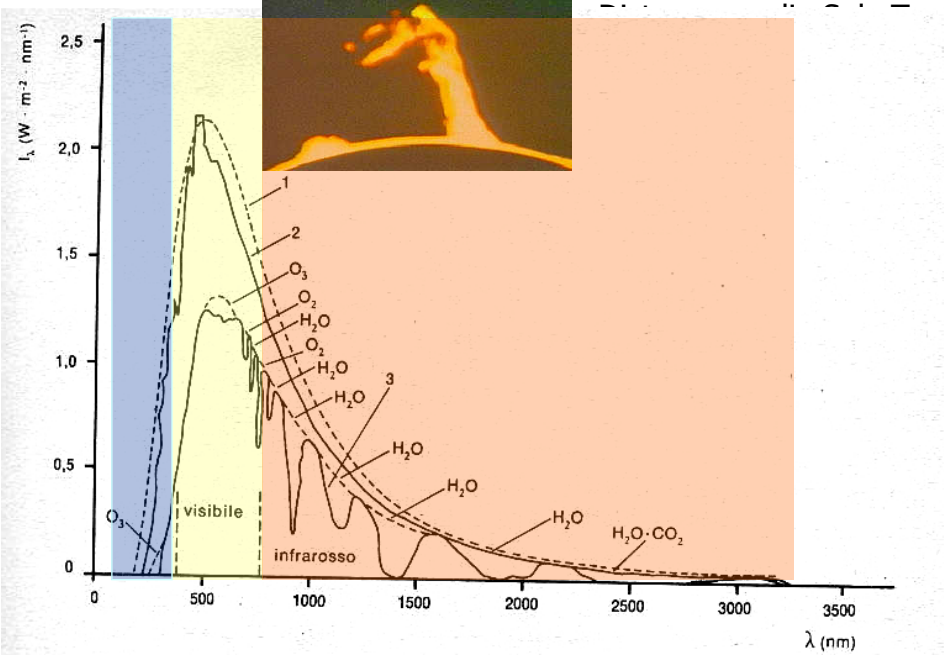
Diametro del sole: 1.39×10^6km

a: 1.49×10^8km

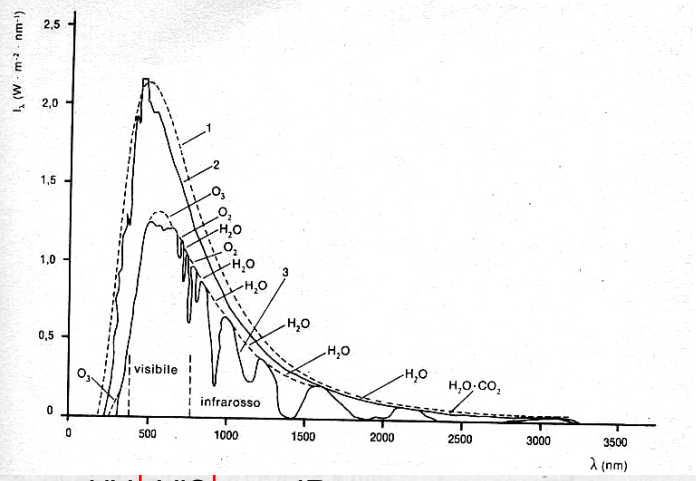
apparente:

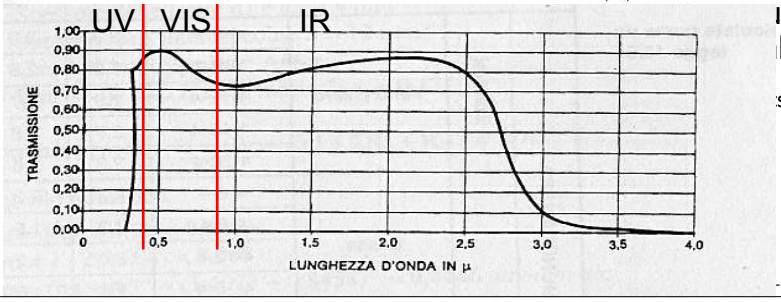
IAZIONE

che incide su
itaria disposta
terrestre
ggi solari
pari al suo



IL SOLE, la trasmissione del vetro e l'effetto serra





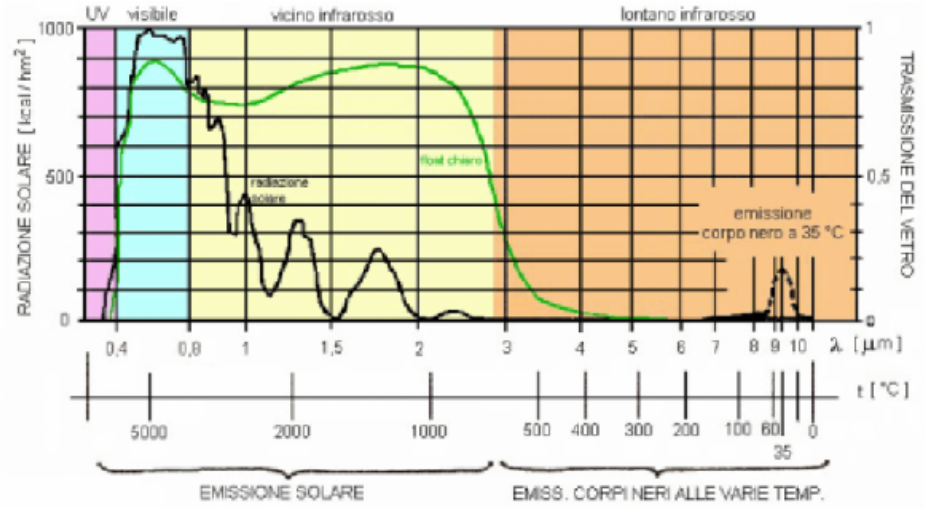
Diametro del sole: 1.39×10^6km
Distanza media Sole-Terra: 1.49×10^8km
Temperatura superficiale apparente: 5762 K

Dal Sole riceviamo: **RADIAZIONE**

Potenza raggiante solare che incide su una superficie di area unitaria disposta al di fuori dell'atmosfera terrestre perpendicolarmente ai raggi solari ıando la distanza T-S è pari al suo ılore medio.

$_s$=1353W/m^2

Proprietà di trasmissione a confronto con l'emissione solare



L' effetto serra

- La radiazione solare termica (lunghezza d'onda compresa nel vicino infrarosso) viene trasmessa quasi completamente nell'ambiente interno,investendo le superfici presenti ed aumentandone la temperatura.

- Queste a loro volta riemettono energia termica sottoforma di radiazioni infrarosse di lunghezza d'onda superiore ai 3 μm per le quali il vetro risulta opaco.

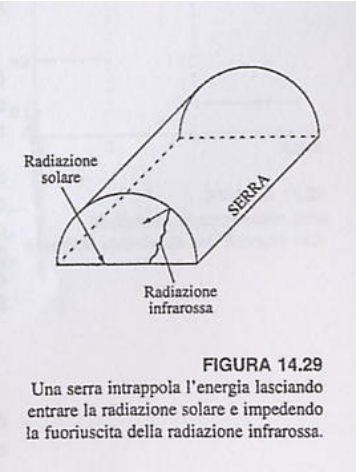
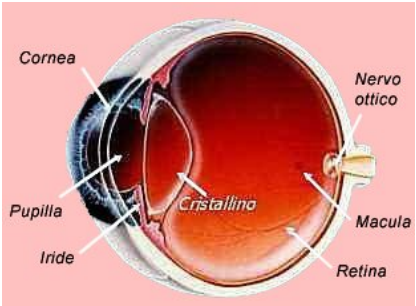


FIGURA 14.29
Una serra intrappola l'energia lasciando entrare la radiazione solare e impedendo la fuoriuscita della radiazione infrarossa.

Il sistema visivo animale

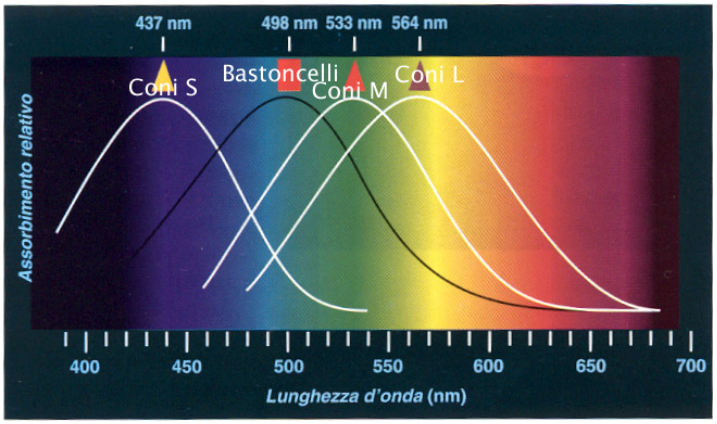
il nostro sistema visivo è composto da:

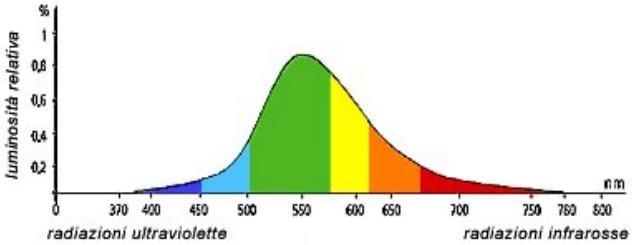
- **Un insieme di muscoli e tendini**
  - in grado di ruotare gli obiettivi in tutte le direzioni per alcune decine di gradi, mantenendo l'allineamento ottimale tra i due obiettivi per consentire la visione stereoscopica
- **I bulbi oculari,**
  - Due obiettivi uguali ciascuno dei quali ha: Un sistema idromeccanico automatico per la pulizia dell'elemento frontale (palpebra, ciglia, sistema lacrimale)
  - Uno schema ottico di due lenti in due gruppi con diaframma automatico posto tra i due elementi (cornea, cristallino, con l'iride che fa da diaframma);
  - Due camere piene di due diversi fluidi di trasmissione e compensazione in grado di mantenere caratteristiche molto stabili al variare della pressione e della temperatura (umor vitreo, umor acqueo)
- **Retina**
  - Un sensore elettromagnetico multistrato con la stessa curvatura dell'immagine e quindi a planeità di campo (), dove ogni strato svolge una funzione specifica: filtro (rete sanguigna superficiale), sensori per basse intensità di luce (bastoncelli), sensori per alte intensità di luce (coni);
- **Nervi ottici**
  - Un insieme di cavi per la trasmissione dei segnali rilevati
- **Il cervello**
  - Un sistema di elaborazione dati euristico



Bande di assorbimento di coni e bastoncelli

- **coni S** (S da short, corto) presentano il massimo assorbimento alle lunghezze d'onda comprese fra 400 e 500 nm,
- coni **M** (M da medium), sensibili alle lunghezze d'onda intermedie,
- coni **L** (L da long, lungo), sensibili alle lunghezze d'onda maggiori;
- **bastoncelli** raccolgono la luce a bassa intensità, presentano il massimo assorbimento a 498 nm





Curva di sensibilità dell'occhio ai vari colori

Proprietà ottiche dei vetri

- Il flusso incidente totale Φ_λ ad una data lunghezza d'onda è ripartito in tre contributi:

$$\Phi_\lambda = \Phi_\rho + \Phi_d + \Phi_a$$

  - luce trasmessa Φ_d
  - luce assorbita Φa_λ
  - luce riflessa Φ_ρ

- Le proprietà ottiche dei vetri possono essere determinate in maniera semplice ed inequivocabile dalla trasmittanza spettrale τ_λ in funzione della lunghezza d'onda λ definita come il rapporto tra la luce trasmessa Φ_d e la luce incidente Φ_λ ad una determinata lunghezza d'onda:

$$\tau_\lambda = \Phi_d/\Phi_\lambda$$

- La frazione di luce riflessa $R = \Phi_\rho/\Phi_\lambda$ dipende dall'indice di rifrazione secondo la relazione (luce incidente normalmente):

$$R = [(n-1)/(n+1)]^2$$

  - Nei vetri sodalime R = 4% per faccia

PROPRIETA' OTTICHE DEI VETRI

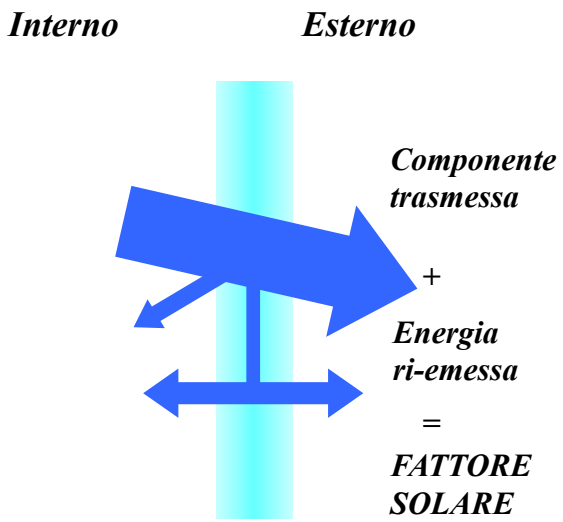
$$\Phi_{inc} = \Phi_t + \Phi_r + \Phi_a$$

Φ_{inc} flusso incidente

Φ_t flusso trasmesso

Φ_r flusso riflesso

Φ_a flusso assorbito



Trasparenza e trasmittanza

$$I = I_0 e^{-\beta s}$$ legge di Lambert

$$T = I_t / I_i = (1 - R)\, e^{-\beta s}$$

I = intensità della radiazione alla distanza d

I_0 = intensità della radiazione alla distanza d = 0

β = coefficiente di assorbimento

T = trasmittanza

s = spessore del materiale

R = frazione riflessa ad ogni interfaccia

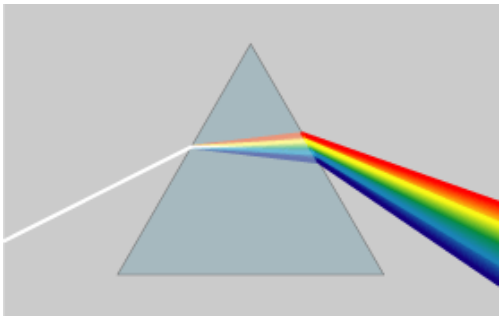
n = rapporto tra l'indice di rifrazione del materiale e quello del mezzo circostante

Indice di rifrazione e dispersione

- L'indice di rifrazione di un materiale (indicato col simbolo n), è il rapporto tra la velocità di propagazione di una radiazione elettromagnetica nella materia (v), rispetto alla sua velocità nel vuoto (c) :

  $$n=c/v$$

- L'indice di rifrazione cresce con la densità e la polarizzabilità
- L'indice di rifrazione non è costante ma varia con la lunghezza d'onda causando la dispersione della luce fenomeno fisico che causa la separazione di un'onda in componenti spettrali con diverse lunghezze d'onda



Il fattore solare FS

$$\Phi_{inc} = \Phi_t + \Phi_r + \Phi_a$$

Φ_{inc} flusso incidente

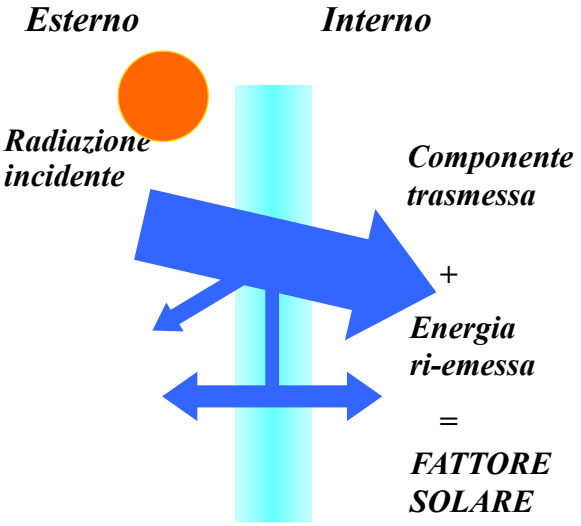
Φ_t flusso trasmesso

Φ_r flusso riflesso

Φ_a flusso assorbito

$$FS = (\Phi_t + 0{,}33\Phi_a)/\Phi_{inc}$$

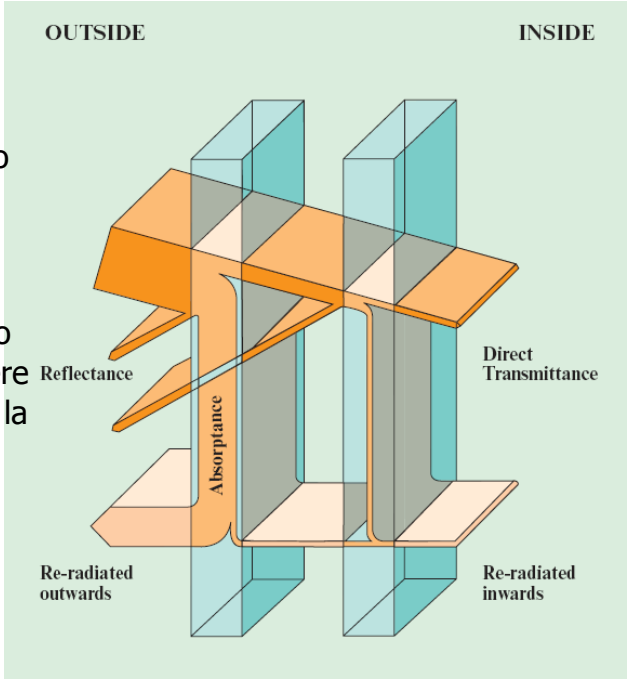
$$FS = \tau + 0{,}33\alpha$$



Controllo solare e controllo termico

- **Controllo solare**
  Abilità del vetro di opporsi al flusso di calore della radiazione solare diretta nello spettro visibile.

- **Controllo termico**
  Capacità di isolamento termico del vetro: è l'abilità di resistere al trasferimento di calore tra la faccia più calda a quella più fredda.

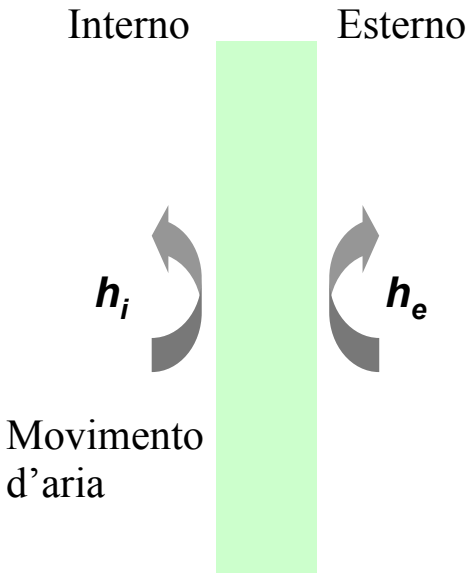


CONVEZIONE

- E' il trasferimento di calore tra la superficie di un solido e un liquido o un gas. Questo tipo di meccanismo è legato al movimento del fluido.
- I coefficienti di scambio termico dipendono dalla velocità del vento, dalla temperatura e dall'emissività. Indichiamo
- h_e e h_i i coefficienti di scambio termico esterno ed interno.
- Valori standard sono

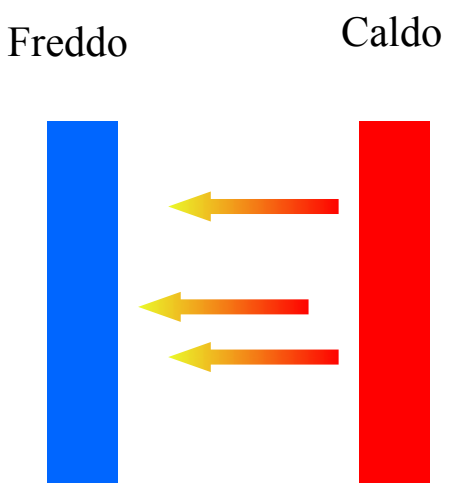
h_e= 23 W/(m^{2}K)

h_i= 8 W/(m^{2}K)



PER IRRAGGIAMENTO

- Calore trasferito per irraggiamento tra due corpi a temperatura differente.
- A temperatura ambiente questa radiazione ha lunghezze d'onda nell'infrarosso intorno ai 5μm. Essa è proporzionale all'emissività dei corpi.
- L'emissività normale del vetro è pari a 0.89 ma l'uso di coating a bassa emissività può ridurre l'emissività normale fino a 0.1.



U-VALUE

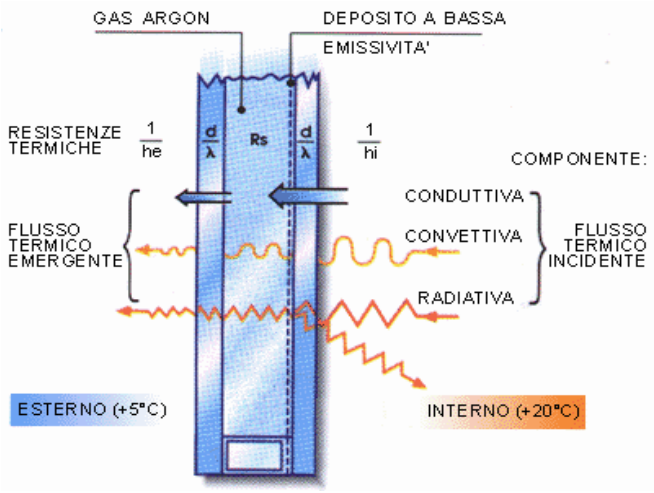
- **U = trasmittanza termica** da perdita di calore attraverso una superficie per conduzione, convezione e irraggiamento, per metro quadrato e per una differenza di temperatura di 1 K, tra l'interno e l'esterno.

- La quantità di calore scambiata è data dalla relazione:

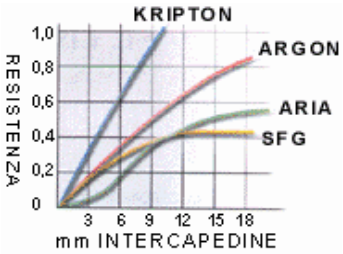
$$Q = U\,\Delta T = \frac{1}{R}\Delta T$$

R è nota come resistenza termica

TRASMITTANZA TERMICA



$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{d_1}{\lambda} + R_s + \frac{d_2}{\lambda} + \frac{1}{h_e}}$$



Il bilancio termico/energetico delle superfici vetrate

- è la somma algebrica tra i disperdenti di calore (di segno negativo) e gli apporti termici solari (segno positivo) calcolati per il periodo preso in esame (giornaliero, mensile, stagionale, annuale).

ΔQ=(It*FS – U*Gh)*S

Gh = prodotto base regionale

It = irraggiamento solare medio per esposizione data

- Gh si calcola moltiplicando i gradi giorno GG per le ore di riscaldamento in genere 24h
- GG della località sono definiti come

GG=∑(19 – TGM)

- TGM è la temperatura media giornaliera del sito (°C) ed essendo la sommatoria estesa a tutti i giorni in cui TGM≤12°C.

INSOLAZIONE SU LECCE

Temperatura media **giornaliera** dell'aria esterna per tutti i mesi dell'anno:

LECCE °C

Altitudine	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
49 m	9,0	9,3	11,4	14,7	18,9	23,4	26,1	25,9	23,0	18,5	14,3	10,7

Tali valori sono importanti nella valutazione delle perdite per dispersioni termiche dei collettori, ben lo sanno i costruttori.

Valori di Irradiazione solare giornaliera media mensile diffusa H_{dh} e diretta H_{bh}, sul piano orizzontale

LECCE MJ/mq

Gennaio H_{dh}-H_{bh}	Febbraio H_{dh}-H_{bh}	Marzo H_{dh}-H_{bh}	Aprile H_{dh}-H_{bh}	Maggio H_{dh}-H_{bh}	Giugno H_{dh}-H_{bh}	Luglio H_{dh}-H_{bh}	Agosto H_{dh}-H_{bh}	Settembr H_{dh}-H_{bh}	Ottobre H_{dh}-H_{bh}	Novembre H_{dh}-H_{bh}	Dicembre H_{dh}-H_{bh}
3,0 – 3,8	4,0 – 5,8	5,5 – 8,1	6,8-12,1	7,3-16,3	7,4-18,7	6,5-20,7	6,0-18,0	5,4-12,5	4,2-8,1	3,3-4,1	2,7-3,2

RISCALDAMENTO SOLARE PASSIVO

- Sono considerati sistemi solari passivi, i sistemi nei quali non ci sono sistemi meccanici in movimento per l'utilizzazione dell'energia solare

Due richieste fondamentali:

- vetrate esposte ad est
- una massa termica in grado di assorbire, immagazzinare e ridistribuire il calore

Tre possibili soluzioni

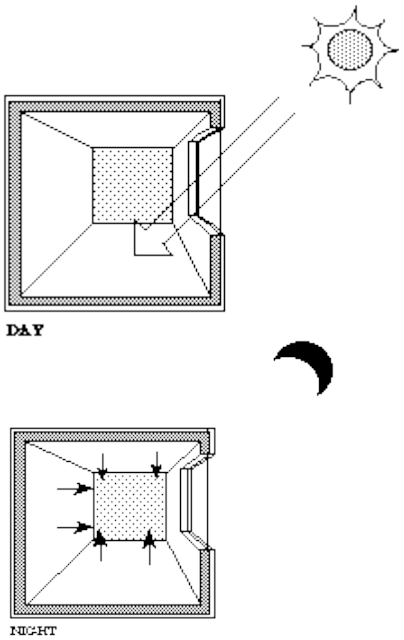
- a guadagno diretto
- a guadagno indiretto
- a guadagno isolato

Orientamento di un edificio

- L'edificio deve essere disposto nella direzione E-O
- Il lato a sud dell'edificio è esposto alla luce del sole dalle 9:00 del mattino alle 3:00 del pomeriggio durante la stagione in cui si utilizza il riscaldamento
- Gli spazi interni che richiedono più luce, riscaldamento e raffreddamento devono essere rivolti a sud, gli spazi della casa meno utilizzati possono essere disposti a nord.
- Usare l'ombreggiamento per evitare che il sole estivo riscaldi l'interno dell'edificio.

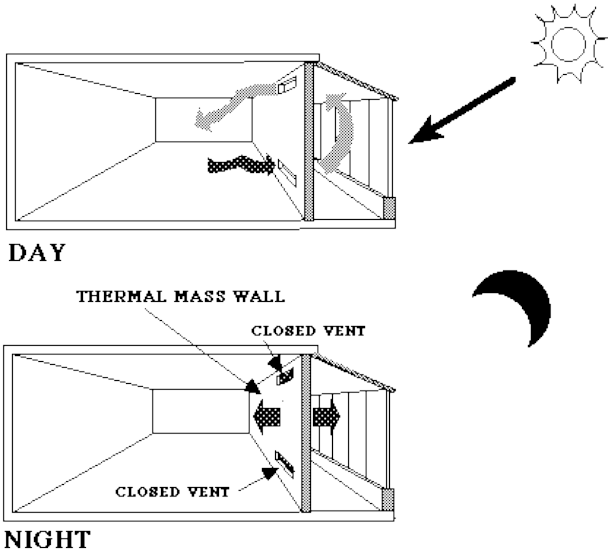
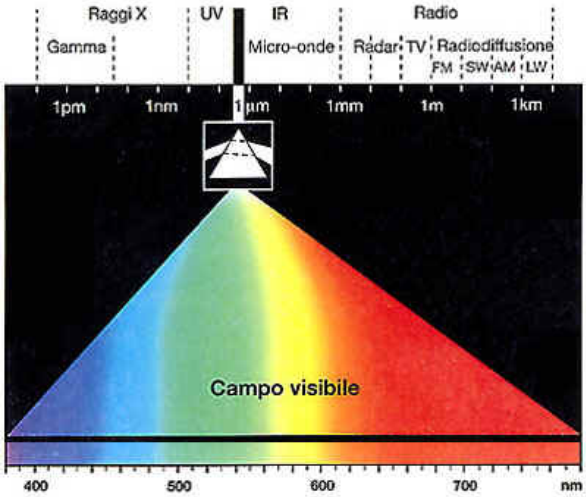
A GUADAGNO DIRETTO

- L'esposizione a SUD consente all'energia solare di entrare nell'edificio dove incide direttamente o indirettamente sui materiali che costituiscono la massa termica come le pareti e il pavimento.
- I sistemi a guadagno diretto utilizzano fino al 60-75% dell'energia solare incidente sulle finestre.
- Durante il giorno la massa termica riduce il riscaldamento degli ambienti assorbendo il calore. Durante la notte essa poi re-irradia il calore negli ambienti.
- E' possibile utilizzare come massa termica dei serbatoi d'acqua ma essi sono più difficili da integrare nella struttura dell'edificio.



A GUADAGNO ISOLATO

- Il sistema a guadagno isolato è saparato dall'area abitativa. Questi sistemi trasmettono all'ambiente fino al 15 - 30% della radiazione incidente.
- Una parte della radiazione può anche essere immagazzinata nell'ambiente che fa da collettore, che chiameremo serra solare.
- Sfruttano sia i sistemi a guadagno diretto che inverso, l'energia solare viene immagazzinata sia nelle pareti che nell'aria della stanza e poi distribuita sia per conduzione attraverso le pareti che per convezione attraverso delle apposite aperture.
- Si possono anche pensare sistemi più complessi in grado di trasferire in calore immagazzinato in altre parti della casa.



Colori e campo visibile