

Dott. Giuseppe Pagliara
g.pagliara@pagliara.it

16. VETRO



Pagliara
prodotti chimici spa



PAGLIARA PRODOTTI CHIMICI SPA

Via Don Comotti, 7 - 24050 LURANO (BG) ITALIA

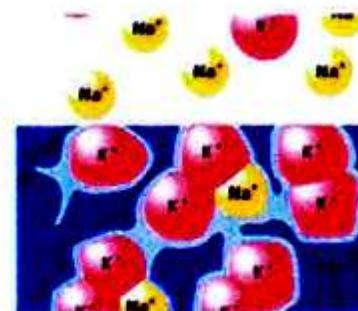
Tel. +39 035 800050 r.a. - Fax. +39 035 800288-800133

Capitale Sociale Deliberato € 2.000.000,00 Versato € 1.600.000,00

C.F. P.IVA IT 01245920168 REA Bg N.185771 Registro Imprese Bg01245920168

www.pagliara.it - pagliara@pagliara.it - pagliaraprodottichimici@registerpec.it

Il vetro



VETRO IN ITALIA 2016

VETRO PIANO	787.125	T
VETRO CAVO	4.061.931	T
CRISTALLI	100.000	T
ALTRI	311.263	T
LANA DI VETRO	86.498	T
	<hr/>	T
PRODUZIONE TOTALE	5.346.817	T
POPOLAZIONE	60.665.551	
PROD. PRO CAPITE	88	Kg.

DA ASSOVETRO

PERCORSO STORICO

3000	A.C.	PRIMO UTILIZZO IN FENICIA
2000	A.C.	PICCOLI VASI IN CINA
1000	A.C.	INIZIA IL SOFFIAGGIO A ROMA
100	A.C.	PRIMO UTILIZZO NELLE FINESTRE A ROMA
10	A.C.	VASI E BOTTIGLIE IN FRANCIA
500	D.C.	MOSAICI IN VETRO ARTE BIZANTINA
1000	D.C.	SOSTITUZIONE DI Na CON K DA CENERE DI LEGNO
1100	D.C.	LASTRE DA SOFFIATURA E TAGLIO CILINDRO
1291	D.C.	VETRAI VENETI TRASFERITI A MURANO
1300	D.C.	LENTI PER OCCHIALI IN VETRO IN SOSTITUZIONE DEL BERILLO $\text{Al}_2\text{Be}_3\text{Si}_6\text{O}_{18}$
1369	D.C.	PRIMI SPECCHI ARGENTATI
1450	D.C.	CRISTALLO AL PIOMBO (+ Na + Mn)
1903	D.C.	PRODUZIONE INDUSTRIALE DI BOTTIGLIE PER SOFFIATURA IN FORMA
1913	D.C.	VETRO PIANO TIRATO
1925	D.C.	VETRO PIANO METODO PITTSBURG
1936	D.C.	FIBRA DI VETRO
1960	D.C.	VETRO PIANO FLOAT SU Sn FUSO (232°C)-METODO PILKINGTON

IL VETRO

Il vetro è un materiale solido con la struttura molecolare disordinata di un liquido. Sono solidi i materiali che hanno forma propria e consistenza rigida perché le singole molecole sono fissi ossia non possono muoversi reciprocamente, a parte la vibrazione termica.

Sono liquidi i materiali che non hanno forma propria ma assumono quella del contenitore e posseggono consistenza fluida perché le singole molecole sono libere di spostarsi reciprocamente, a parte la vibrazione termica.

VETRO

SONO VETROSI I MATERIALI MINERALI OTTENUTI PER SOLIDIFICAZIONE DA RAFFREDDAMENTO DEL FUSO, NON ACCOMPAGNATO DA CRISTALLIZZAZIONE.

I VETRI SONO SOLIDI AMORFI STABILI. IN NATURA LA “OSSIDIANA” È UN VETRO DA MAGMA VULCANICO.

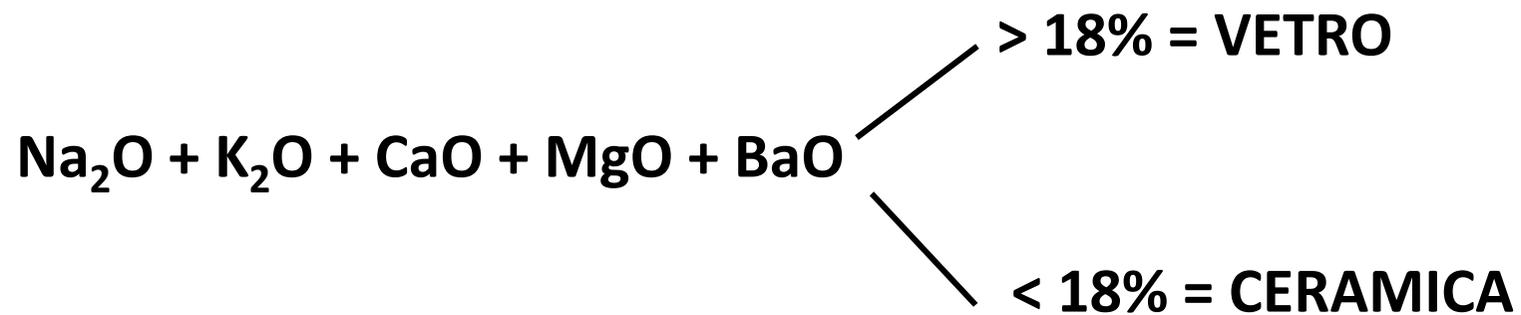
OLTRE ALLA SiO_2 HANNO TENDENZA A SOLIDIFICARE ALLO STATO VETROSO: GeO_2 , B_2O_3 , P_2O_5 , As_2O_5 .

IL VETRO PROPRIAMENTE DETTO SILICEO È COSTITUITO PRINCIPALMENTE DA SILICE (QUARZO = SiO_2) + FONDENTI ALCALINI.

IL VETRO HA CARATTERISTICHE DI TRASPARENZA, INALTERABILITÀ, COLORABILITÀ, DUREZZA, BRILLANTEZZA.

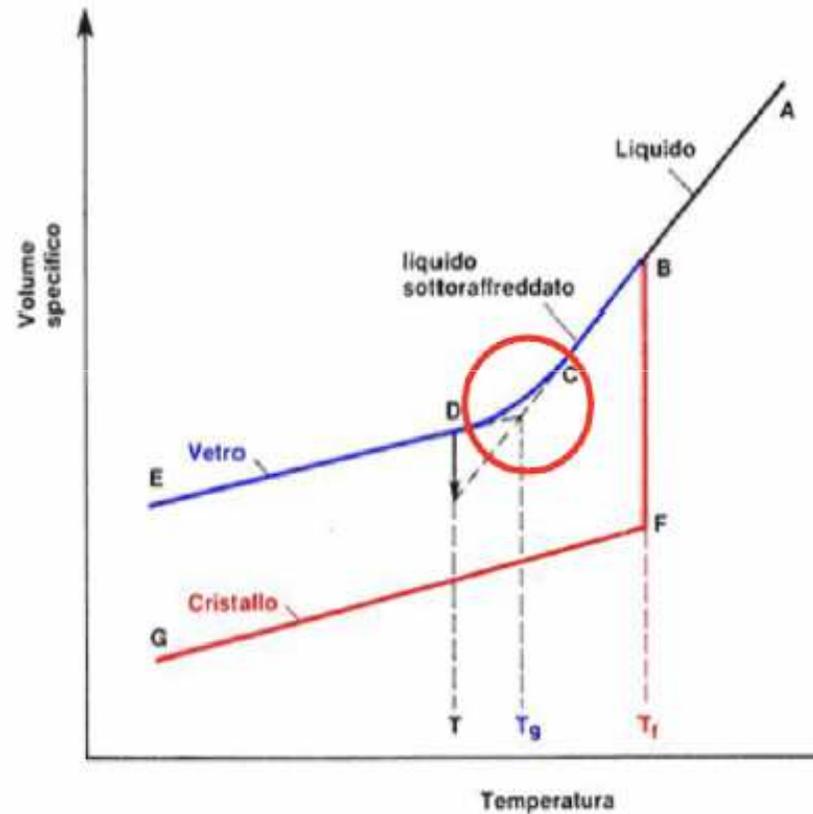
CARATTERISTICA NEGATIVA: ELEVATA FRAGILITÀ, CON TENDENZA A ROMPERSI IN FRAMMENTI MOLTO TAGLIENTI.

Da un punto di vista compositivo, i vetri rispetto alle ceramiche sono più alcalini. È fondamentale un equilibrio tra metalli alcalini e alcalini terrosi. Un eccesso di alcalini diminuisce la stabilità chimica ed alimenta la solubilità.



Espansione termica

- ❑ La variazione dell'espansione lineare consente di definire la temperatura di transizione vetrosa
- ❑ tale temperatura dipende dalla velocità di raffreddamento del vetro dalla sua temperatura di fusione



CURVA RAFFREDDAMENTO / VOLUME SP.

Durante il raffreddamento del fuso, il volume decresce:

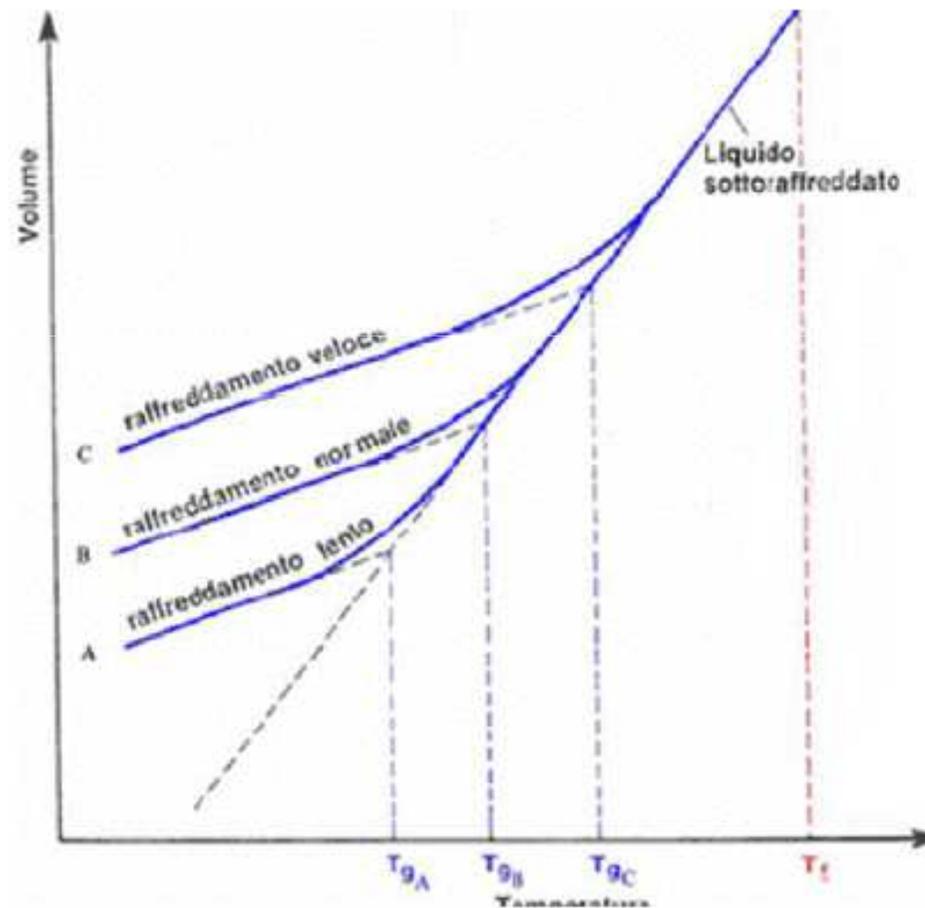
- perché l'ampiezza della vibrazione molecolare diminuisce**
- perché la libertà di movimento reciproco delle molecole diminuisce.**

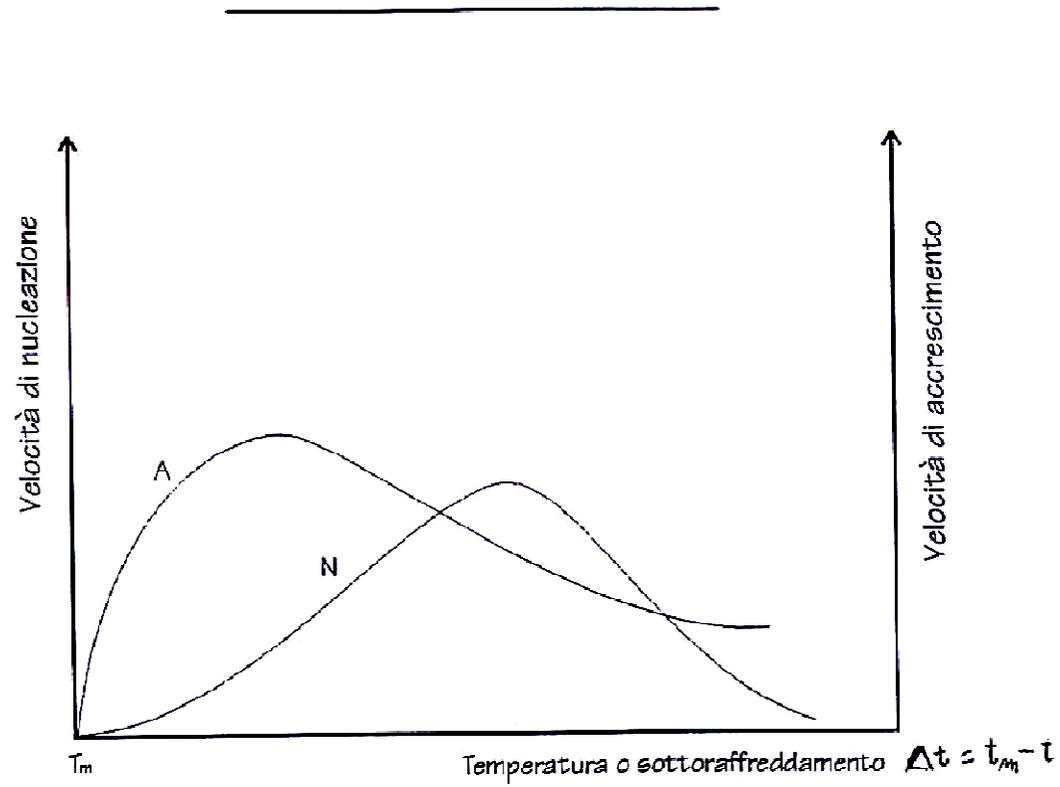
Quando il fuso diventa solido al disotto della temperatura di transizione vetrosa, la discesa del volume rallenta:

- perché le molecole sono rigidamente fissate ed hanno perduto la libertà di movimento reciproco.**

Velocità di raffreddamento e transizione vetrosa

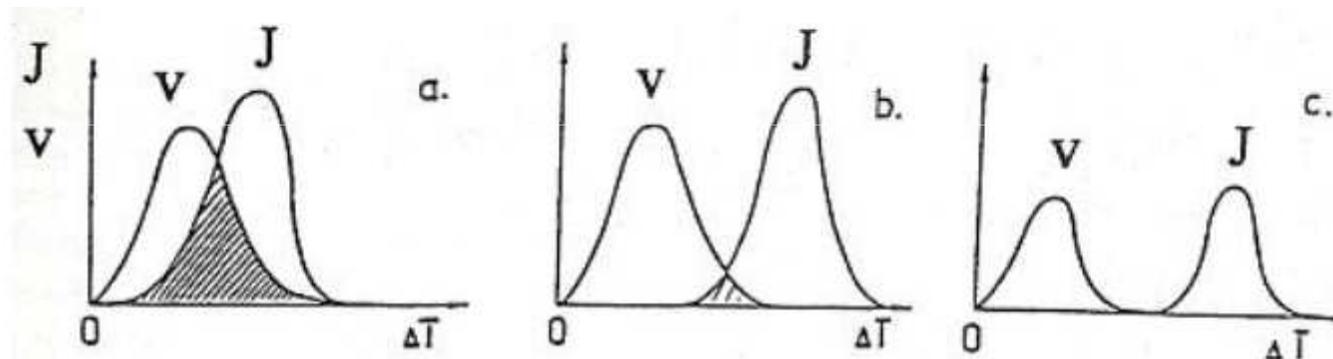
- Il valore della T_g aumenta all'aumentare della velocità di raffreddamento





Velocità di nucleazione N o di accrescimento A
all'interfaccia liquido-solido.

Secondo il criterio di Tamman si ha formazione di un vetro quando le curve temperatura-velocità di nucleazione e temperatura-velocità di cristallizzazione non presentano sovrapposizioni; viceversa è probabile la formazione di una fase cristallina nel fuso in raffreddamento.



Le condizioni di ottenimento dei vetri e l'interpretazione della loro struttura sono riassunte nella teoria del "random network" (reticolo casuale) (Zachariasen, 1932) e sono riassumibili nei punti seguenti:

- i vetri sono formati da ossidi a composizione A_mO_n con n/m compreso tra 1,5 e 2,5 ($B_2O_3 \rightarrow SiO_2 \rightarrow P_2O_5$) con legami A-O essenzialmente covalenti;
- ogni atomo di O è legato a non più di 2 atomi di A;
- il numero di atomi di O che contornano A deve essere contenuto (3÷4) concentrandosi in coordinazione triangolari e tetraedriche;
- i poliedri di O hanno in comune solo i vertici, non spigoli o facce;
- almeno tre vertici di ogni poliedro devono essere collegati ad altri a formare un reticolo tridimensionale a coordinamento a corto raggio (short-range order).



Silice utilizzata come
materia prima per la
produzione industriale del
vetro.

Aggiunte di elementi chimici nei vetri

Il vetro comune è detto anche “vetro siliceo”, in quanto costituito quasi esclusivamente da biossido di silicio (SiO_2).

Il biossido di silicio ha un punto di fusione di circa 1800°C , ma spesso durante la produzione del vetro vengono aggiunte altre sostanze (dette “fondenti”), che abbassano il punto di fusione anche al disotto dei 1000°C , quali ad esempio:

- la soda (carbonato di sodio Na_2CO_3)
- la potassa (carbonato di potassio K_2CO_3)

Fondenti usati spesso nell’industria vetraria sono i borati, i nitrati e i solfati. Poiché la presenza di soda rende il vetro solubile in acqua (caratteristica non desiderabile), viene aggiunta anche calce (CaO) per ripristinare l’insolubilità.

Altre sostanze possono essere aggiunte per ottenere diverse proprietà. A seconda dell'azione sul reticolo cristallino, gli ossidi aggiunti nei vetri possono essere classificati in:

- ***ossidi formatori di reticolo:*** ossido di silicio, ossido di boro e ossido di fosforo.
- ***ossidi modificatori di reticolo:*** ossidi di metalli monovalenti e bivalenti (tra cui: sodio, potassio, calcio e magnesio)
- ***ossidi intermediari:*** ossido di alluminio e ossido di piombo.

Le sostanze aggiunte al vetro possono inoltre essere classificate in base alla loro funzione:

- **fondenti:** abbassano la temperatura di fusione e migliorano la fluidità del vetro durante la sua produzione (ossidi di sodio, potassio, boro, piombo);
- **stabilizzanti:** migliorano le proprietà chimiche e meccaniche del vetro prodotto (ossidi di calcio, bario, magnesio, zinco, boro, piombo);
- **affinanti:** agevolano l'eliminazione di difetti e di torbidità (triossido d'arsenico, nitrati alcalini e nitrati d'ammonio)
- **coloranti:** modificano l'aspetto cromatico del vetro prodotto (ossidi di ferro - *verde bottiglia*, rame - *rosso*, cromo - *verde giallo* e cobalto - *blu*);
- **decoloranti:** neutralizzano il colore impartito da altre sostanze (biossido di manganese);
- **opacizzanti:** per la produzione del vetro lattimo (fosfati di sodio, cloruri di sodio, fosfati di calcio, cloruri di calcio, ossido di stagno e talco).

LA COMPOSIZIONE DEL VETRO ATTRAVERSO I SECOLI

	silice Si O ₂	calce CaO	potassa K ₂ O	soda Na ₂ O	magnesia MgO	ossido ferro allum.	altri
EGITTO XII dinastia	68,3	4,9	2	20,2	1	3,2	0,4
POMPEI	69,4	7,3	—	17,2	—	3,7	2,4
PERSIA	57,2	5,4	29,7		1,1	5,3	
ARABO VIII secolo	68	2,6	23,4		0,9	4,2	0,9
VENEZIANO	68,6	11	6,9	8,1	2	1,5	1,9
CRISTALLO ST. GOBAIN	72,1	12,2	—	15,7	3,8	—	—
FLOAT GLASS	71,2	9,4	—	14,2	—	1,1*	0,3

* allumina 1; FeO + Fe₂O₃ 0,1.

SAINT-GOBAIN

IL VETRO

MATERIE PRIME

LA SABBIA SILICEA O DI QUARZO

CHE DEVE ESSERE

UNA PUREZZA PARTICOLARE A SECONDA DEL VETRO CHE SI DEVE PRODURRE

SABBIA MOLTO PURA

VETRO PER OCCHIALI (CANOCCHIALI, TELESCOPI, ECC...)

SABBIA MENO PURA

PER NORMALI VETRI COLORATI

LE SOSTANZE FONDENTI

SONO

SALI DI SODIO O DI POTASSIO CHE SI COMBINANO CON LA SILICE MIGLIORANDONE LA FUSIBILITÀ

GLI STABILIZZANTI

SONO

OSSIDI DI CALCIO (CALCE) BARIO, MAGNESIO, ZINCO CHE IMPEDISCONO LA PERDITA DELLA TRASPARENZA

GLI AFFINANTI

COME

ANIDRIDE ARSENIOSA O SOLFATO DI SODIO I QUALI FACILITANO L'ELIMINAZIONE DEI DIFETTI COME LE BOLLE D'ARIA E LA TRASFORMAZIONE DEL VETRO IN UN FLUIDO CHIARO, TRASPARENTE E OMOGENEO

A TALI SOSTANZE SI AGGIUNGONO

I COLORANTI

SONO DA OSSIDI METALLICI CHE DANNO AL VETRO IL COLORE ES. L'OSSIDO FERRICO PER IL VERDE BOTTIGLIA

SE VUOLE IL VETRO BIANCO SI USANO DECOLORANTI

GLI ADDITIVI

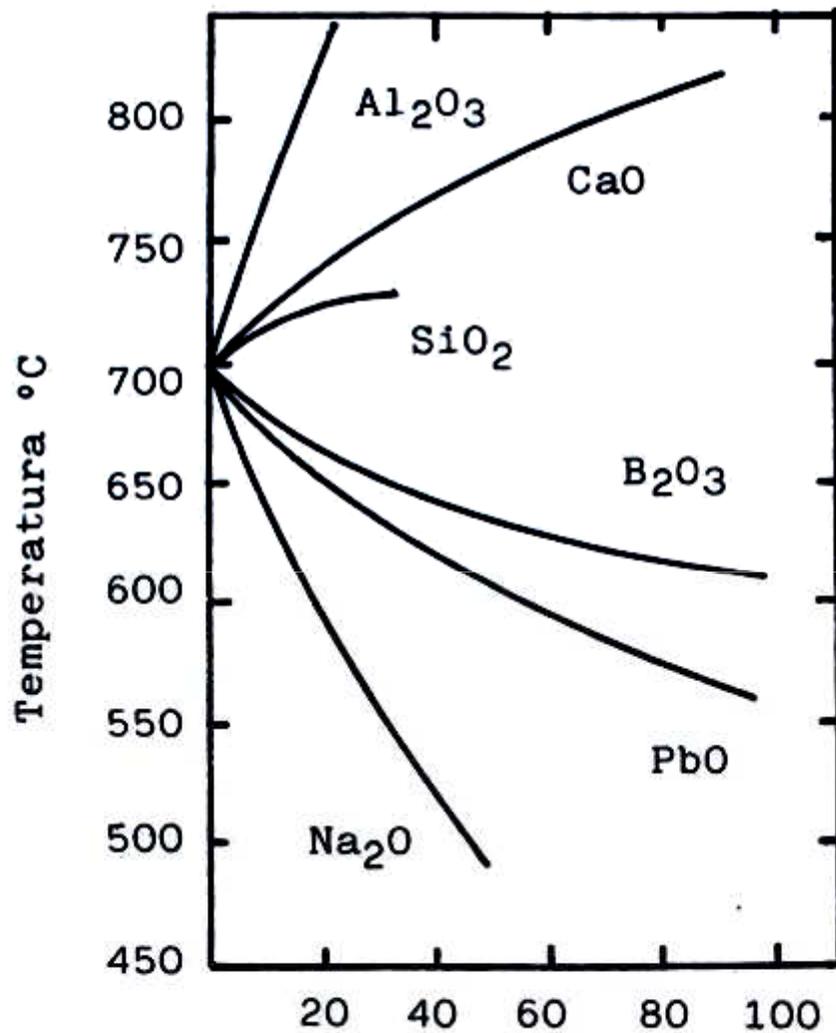
DANNO AL VETRO DELLE CARATTERISTICHE PARTICOLARI

GLI OPACIZZANTI

DIMINUISCONO LA TRASPARENZA

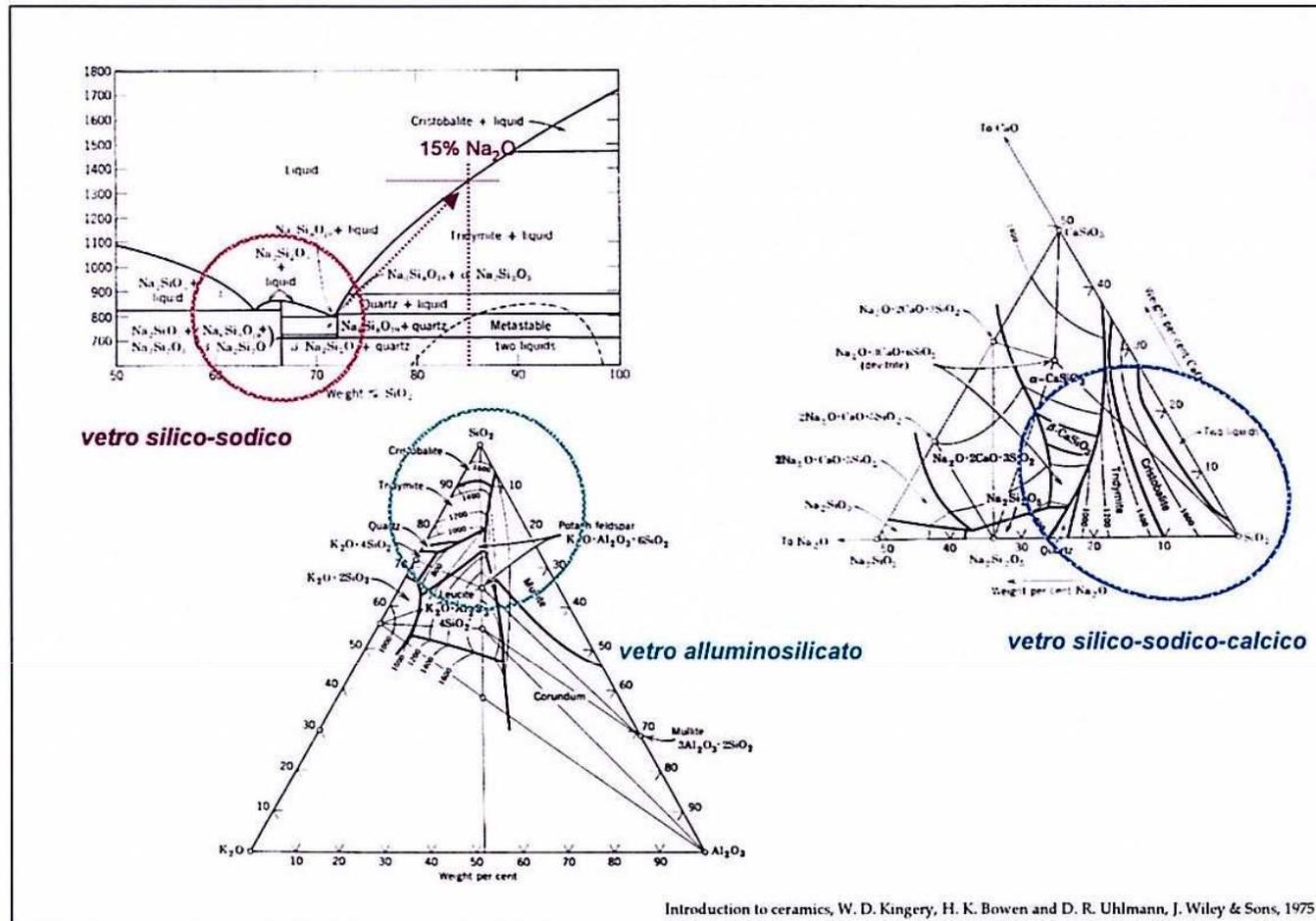
I ROTTAMI VETROSI

NELLA QUANTITÀ NECESSARIA, PER FACILITARE LA FUSIONE DEI VARI COMPONENTI NATURALI



COMPOSIZIONE %	
Na ₂ O	6
CaO	14
PbO	28
Al ₂ O ₃	2
SiO ₂	50

Influenza di vari ossidi sul punto di fusione di un vetro fondente a 700°C (composizione a lato)



Nei diagrammi di stato è evidenziata la diminuzione della temperatura in presenza di ossidi modificatori.

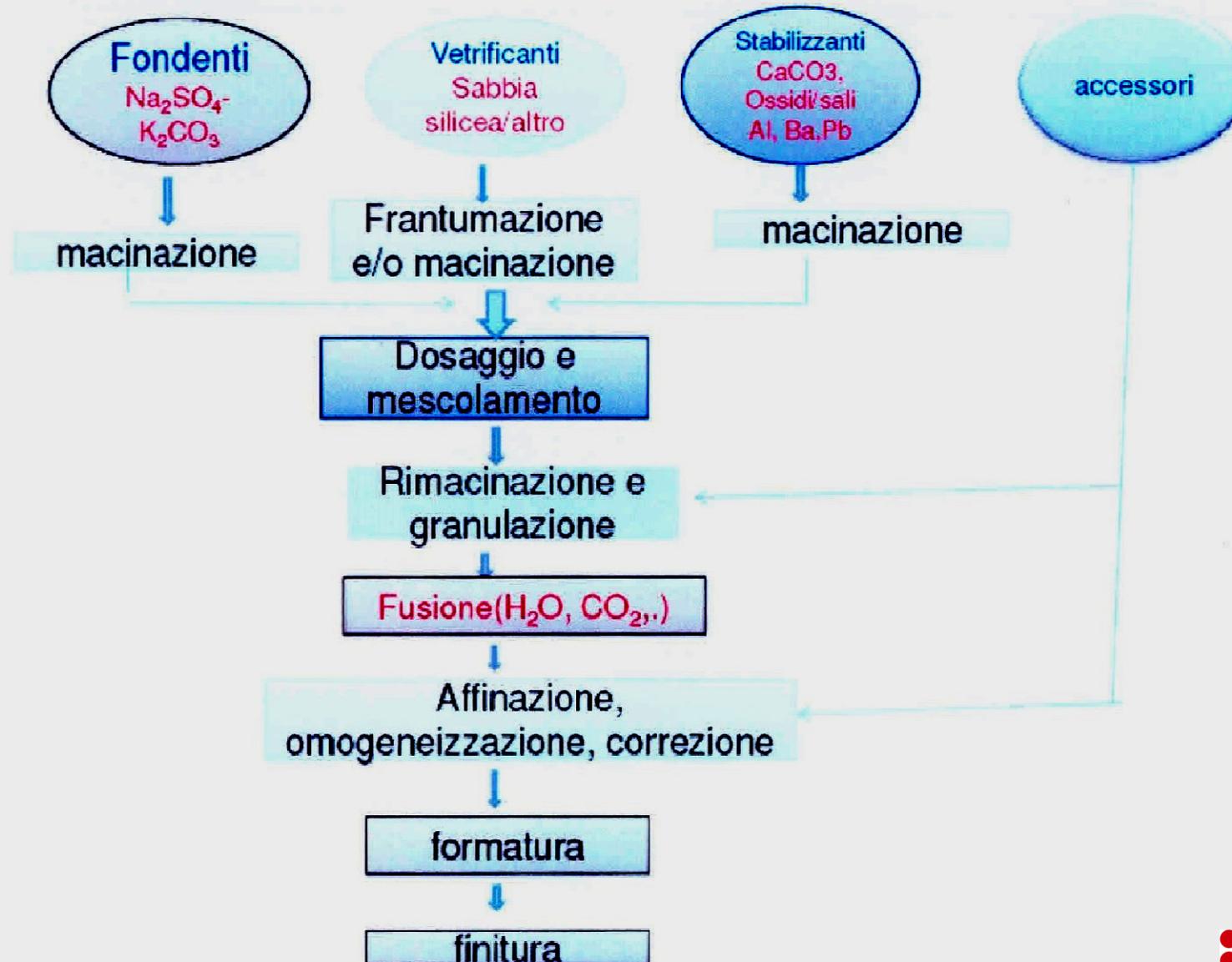
In genere si fa riferimento agli eutettici per definire la “prima” fase liquida ma, una volta iniziata la solubilizzazione delle altre materie prime, la temperatura di esercizio dipenderà strettamente dalla composizione globale.

DUREZZA E RESISTENZA CHIMICA

I vetri hanno già discreta durezza e buona resistenza chimica. In genere i componenti che aumentano la durezza sono gli stessi che migliorano ulteriormente la resistenza chimica e cioè: SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 .

Componenti negativi sono gli ossidi dei metalli alcalini. Un forte attacco chimico è subito solo da acido fluoridrico, fosforico e alcali concentrati caldissimi. Migliorano le caratteristiche meccaniche e termiche B_2O_3 e Pb_3O_4 .

Processo produttivo del vetro



- Principali materie prime dell'industria del vetro

Principal Raw Materials Used in Glass Making

Material	Alternative Name	Theoretical Formula	Oxides Supplied	Fraction	Reciprocal*
Alumina	Calcined Alumina	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	1.000	1.000
Aluminium Hyd.	Hydrated Alumina	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	Al ₂ O ₃	0.664	1.531
Apilite (typical composition)	.....	.....	Al ₂ O ₃	0.240	4.167
.....	.....	.....	Na ₂ (K ₂)O	0.100	.....
.....	.....	.....	SiO ₂	0.600	.....
.....	.....	.....	CaO	0.060	.....
Feldspar	Microcline (Composition in of typical commercial spar)	K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	Al ₂ O ₃ K ₂ (Na ₂)O SiO ₂	0.100 0.130 0.680	5.556
Nepheline Syenite (typical composition)	.....	.....	Al ₂ O ₃ Na ₂ (K ₂)O SiO ₂	0.250 0.150 0.600	4.000
Calcumite	Calcium-Aluminum Silicate	2CaO·MgO·2SiO ₂ 2CaO·Al ₂ O ₃ ·SiO ₂ 3(CaO·SiO ₂)	Al ₂ O ₃ CaO MgO	0.380 0.117 0.400 0.080	....................
Kyanite (90% concentrate)	.....	Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	Al ₂ O ₃ SiO ₂	0.367 0.433	1.763
Kaolin	China Clay	Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂ ·2H ₂ O	Al ₂ O ₃ SiO ₂	0.395 0.445	2.57
Cryolite	Kryolith	Na ₃ AlF ₆	SiO ₂	1.000	1.000
Antimony Oxide	.....	Sb ₂ O ₃	Sb ₂ O ₃	1.000	1.000
Arsenious Oxide	White Arsenic	As ₂ O ₃	As ₂ O ₃	1.160	0.860
Barium	.....	BaCO ₃	BaO	0.777	1.288
Barium Oxide	Baryta	BaO	BaO	1.000	1.000
Barium Sulfate	Barytes	BaSO ₄	BaO	0.657	1.523
Boric Acid	Boracic Acid	B ₂ O ₃ ·3H ₂ O	B ₂ O ₃	0.565	1.776
Borax	.....	Na ₂ O·2B ₂ O ₃ ·10H ₂ O	B ₂ O ₃ Na ₂ O	0.365 0.163	2.738 6.135
Anhydrous Borax	("Pyrobor")	Na ₂ O·2B ₂ O ₃	B ₂ O ₃ Na ₂ O	0.682 0.308	1.445 3.245
Lime, Burnt	Quick Lime	CaO	CaO	1.000	1.000
Lime, Hydrated	Calcium Hydrate	CaO·H ₂ O	CaO	0.757	1.322
Limstene	Calcium Carb.	CaCO ₃	CaO	0.560	1.786
Calcium Carb.	Whiting	CaCO ₃	CaO	0.560	1.786
Lime, Dolomitic	Burnt Dolomite	CaO·MgO	CaO MgO	0.582 0.418	1.739 2.390
Dolomite	Raw Limestone (Dolomitic)	CaO·MgO·2CO ₂	CaO MgO	0.304 0.218	3.290 4.580
Lime, Hydrated, Dol.	Finishing Lime	CaO·MgO·2H ₂ O	CaO MgO	0.423 0.304	2.363 3.290
Litharge	Lead Oxide, Yellow	PbO	PbO	1.000	1.000
Red Lead	Minium	Pb ₃ O ₄	PbO	0.977	1.024
Bone Ash	Calcium Phosphate	3CaO·2P ₂ O ₅ + n CaCO ₃	CaO P ₂ O ₅	0.572 0.438	2.700 1.592
Iron Oxide, Red	Rouge	Fe ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	1.000	1.000
Potassium Hyd.	Caustic Potash	KOH	K ₂ O	0.838	1.194
Pot. Nitrate	Saltpeter	KNO ₃	K ₂ O	0.465	2.151
Potassium Carb.	Calcined Carbonate of Potash	K ₂ CO ₃	K ₂ O	0.681	1.469
Glassmaker's Potash	Potassium Carbonate, Hyd.	K ₂ CO ₃ ·H ₂ O	K ₂ O	0.570	1.754
Sand	Glass Sand, Quartz	SiO ₂	SiO ₂	1.000	1.000
Soda Ash	Sod. Carb. Comd.	Na ₂ CO ₃	Na ₂ O	0.585	1.709
Sodium Nitrate	Saltpeter, Chili	NaNO ₃	Na ₂ O	0.365	2.741
Salt Cake	Sodium Sulfate	Na ₂ SO ₄	Na ₂ O	0.437	2.290
Sodium	Sodium	Na ₂ SIF ₆	.....	.....	.....
Silicofluoride	Fluorsilicates	.....	.....	.....	.....
Zinc Oxide	.....	ZnO	ZnO	1.000	1.000

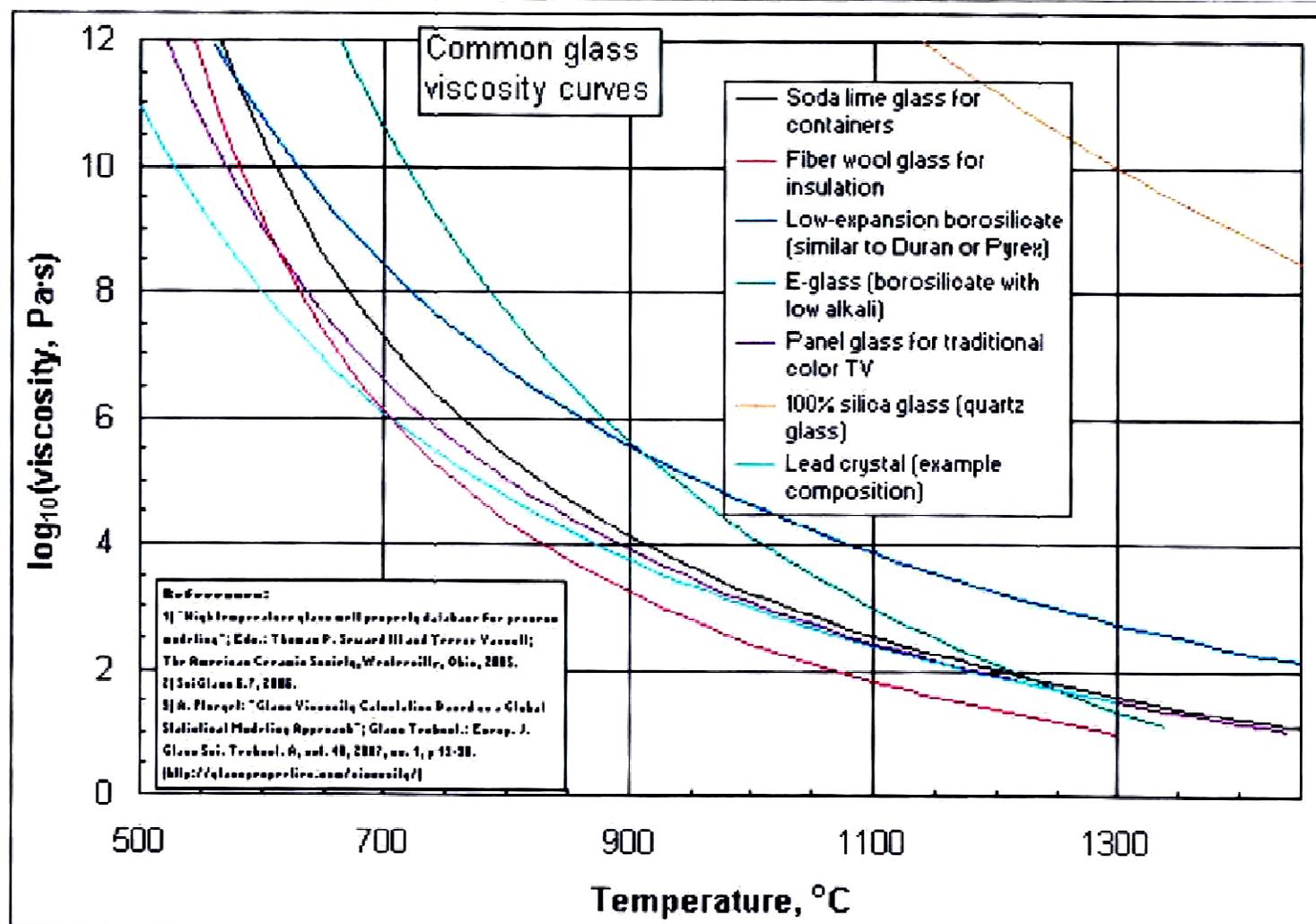
* This column gives pounds of material required to supply one pound of oxide.

Table 3.1 Raw Materials for Glassmaking

Common Name	Normal Composition	Common Factor*
White feldspar	Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	Na ₂ O = 8.66 Al ₂ O ₃ = 5.14 SiO ₂ = 1.85
Alumina	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ = 1.00
Alumina hydrate	Al ₂ O ₃ ·3H ₂ O	Al ₂ O ₃ = 1.53
Anorthite feldspar	CaO·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	CaO = 4.96 Al ₂ O ₃ = 2.73 SiO ₂ = 2.52
Apilite	Alkali lime feldspar	Varies with exact composition
Argonite	CaCO ₃	CaO = 1.78
Bone ash	3CaO·P ₂ O ₅ or Ca ₃ (PO ₄) ₂	CaO = 1.84 P ₂ O ₅ = 2.19
Barite (barrot)	BaSO ₄	BaO = 1.52
Borax (heavy spar)	Na ₂ O·B ₂ O ₃ ·10H ₂ O	Na ₂ O = 6.14 B ₂ O ₃ = 2.76 Na ₂ O = 3.25
Anhydrous borax	Na ₂ O·B ₂ O ₃	B ₂ O ₃ = 1.45 Na ₂ O = 1.78
Boric acid	B ₂ O ₃ ·3H ₂ O	B ₂ O ₃ = 1.77
Born dolomite	CaO·MgO	MgO = 2.39
Caustic potash	KOH	K ₂ O = 1.19
Caustic soda	NaOH	Na ₂ O = 1.29
Cryolite	3NaF·AlF ₃	NaF = 1.67 AlF ₃ = 2.50
Culite	Barium glass	Varies with exact composition
Eckmanite	CaCO ₃ ·MgCO ₃	CaO = 3.29 MgO = 4.38
Fluorapatite	Ca ₅ F ₂ (PO ₄) ₃	CaO = 1.00
Cyanuric	CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaO = 3.07
Kyanite	Al ₂ O ₃ ·SiO ₂	Varies with exact composition
Lime (quick lime)	CaO	CaO = 1.00
(Burnt lime)	CaO	CaO = 1.78
Limestone (calcit)	CaCO ₃	PbO = 1.00
Litharge (yellow lead)	PbO	K ₂ O = 5.91
Microcline	K ₂ O·Al ₂ O ₃ ·6SiO ₂	Al ₂ O ₃ = 5.96 SiO ₂ = 1.54
Nepheline	Na ₂ O·Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂	Na ₂ O = 2.84 Al ₂ O ₃ = 1.73 SiO ₂ = 1.47
Nepheline syenite	Mixture of nepheline and feldspar	Varies with exact composition
Niter (saltpeter)	KNO ₃	K ₂ O = 2.15
Pods	K ₂ O or K ₂ CO ₃	K ₂ O = 1.00 K ₂ O = 1.47
Red lead	Pb ₃ O ₄	PbO = 1.00
Salt cake	Na ₂ SO ₄	Na ₂ O = 2.29
Sand	SiO ₂	SiO ₂ = 1.00
(Glassmaker's sand)	.....	.....
(Peter's fine)	.....	.....
Slag	Blow furnace waste glass	Varies with exact composition
Slaked lime	(CaO·H ₂ O) or Ca(OH) ₂	CaO = 1.32
Soda ash	Na ₂ CO ₃	Na ₂ O = 2.71
Soda niter	NaNO ₃	Na ₂ O = 2.74
(China saltpeter)	.....	.....
Spodumene	Li ₂ O·Al ₂ O ₃ ·4SiO ₂	Li ₂ O = 12.46 Al ₂ O ₃ = 3.55 SiO ₂ = 1.55
Whiting	CaCO ₃	CaO = 1.79

* Quantity required to yield one weight unit of the glass component.

Viscosità nei tipi di vetro comune



Important in glass forming operations are the viscosity-temperature characteristics of glass.

Temperatures:

Melting Point:

viscosity = 10 Pa-s; glass is fluid enough to be considered **liquid**.

Working Point:

viscosity = 10^3 Pa-s; glass is **easily deformed**.

Softening Point:

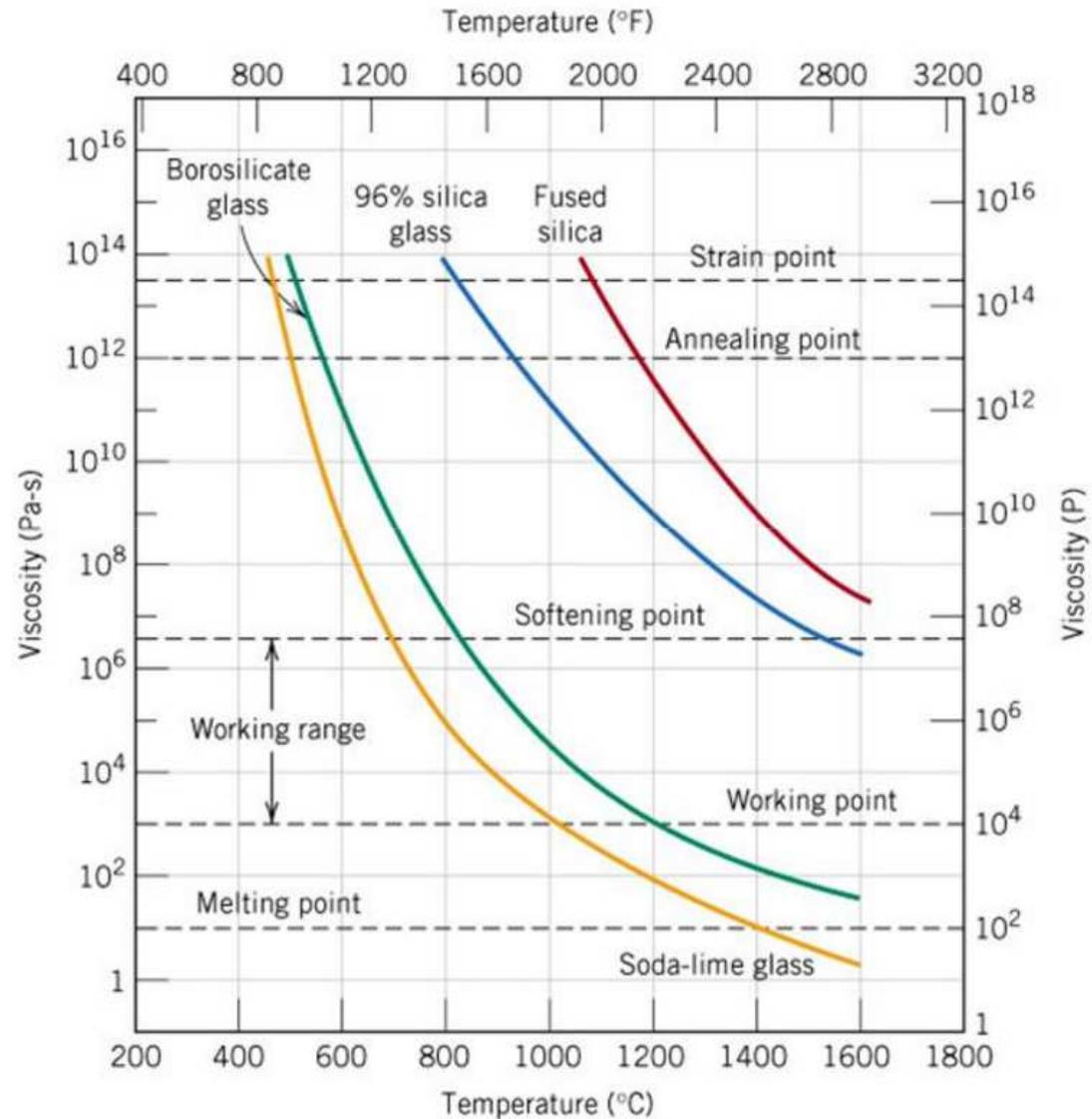
viscosity = 4×10^6 Pa-s; max temp. glass can be handled without altering dimensions.

Annealing Point:

viscosity = 10^{12} Pa-s; good atomic diffusion; **stress relief**.

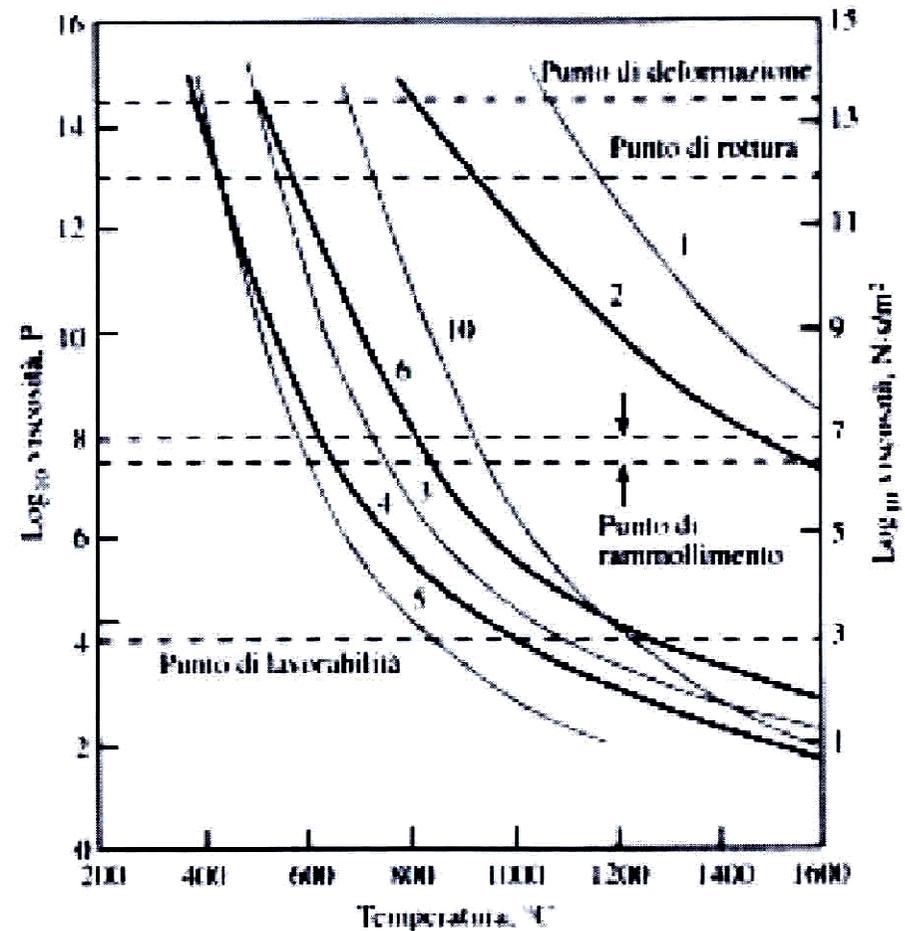
Strain Point:

viscosity = 3×10^{13} Pa-s; below strain point, **fracture** will occur **before** the onset of **plastic deformation**.



Punti caratteristici

- Punto di lavorabilità $\eta \approx 10^3$ Pa*s caratterizza il punto in cui si può lavorare il vetro
- Punto di rammollimento $\eta \approx 10^7$ Pa*s caratterizza il punto in cui il vetro scorre per effetto del suo peso
- Punto di ricottura $\eta \approx 10^{12}$ Pa*s caratterizza il punto in cui si eliminano gli sforzi interni
- Punto di deformazione $\eta \approx 10^{13.5}$ Pa*s caratterizza il punto al di sotto del quale il vetro è rigido



Vetri più comuni

vetro	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	altri	proprietà
1 silicico	99.5+							Difficile da lavorare, ottime resistenza shock termici. trasparenza
2 96% silice	96.3	<0.2	<0.2		2.9	0.4		
3 sodico-calcico (vetro FG)	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, molare, alta riflessione
5 alto piombo	58		7.2				PbO, 35	
6 borosilicato	80.5	3.8	0.4		12.9	2.2		Bassa espansione e buona resistenza shock termici
7 alto boro a bassa perdita elettrica	70		0.5		28	1.1	PbO, 1.2	
8 alluminoborosilicato (C)	74.7	6.4	0.5	0.9	9.6	5.6	B ₂ O ₃ , 2.2	Durabilità chimica
9 bassi alcali (vetro E)	54.5	0.5		22	8.5	14.5		Usi elettrici Compositi a fibre di vetro
10 alluminosilicato (vetro S)	57	1		5.5	4	20.5	MgO, 12	Resistenza termica
11 vetro-ceramica	40-70					10-35	MgO, 10-30 TiO ₂ , 7-15	

E = Usi Elettrici

C = Resistenza alla Corrosione

S = Silico Alluminosi e Resistenza Termica

FG = Float Glass

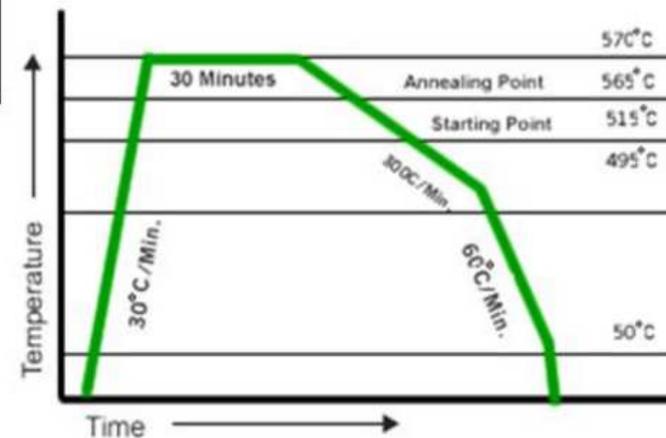
RICOTTURA (ANNEALING)

Trattamento termico eseguito per eliminare le tensioni che si originano nel vetro durante la solidificazione del fuso.

Si riscalda nuovamente il vetro alla temperatura corrispondente alla viscosità di ricottura (per es. 570°C), lo si mantiene a tale temperatura per un tempo sufficiente ad assicurare l'uniformità di tale temperatura e poi lo si raffredda lentamente in modo che tale raffreddamento sia regolare e contemporaneo a tutto il pezzo trattato.

Annealed Glass

- **Float** glass (also called “**flat**” glass) has not yet been heat-strengthened or tempered.



- ❑ **Annealing** float glass is the process of controlled cooling to **prevent residual stress** in the glass. It is part of the float glass manufacturing process.
- ❑ **Annealed glass can be cut, machined, drilled, edged and polished.**
- ❑ To anneal glass, the glass is heated and kept for a defined period of time to **relieve internal stresses**.
- ❑ Carefully cooled under controlled conditions to ensure that **no stresses** are reintroduced by chilling/cooling.

	SiO ₂ [%]	B ₂ O ₃ [%]	P ₂ O ₅ [%]	Na ₂ O [%]	K ₂ O [%]	CaO [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	PbO [%]	BaO [%]	ZnO [%]	MgO [%]
Vetro da bottiglie	60÷70	—	—	7÷15	—	13÷20	2÷4	2÷7	—	—	—	0÷4
Vetro per oggetti comuni	72÷74	—	—	12÷18	—	10÷12	0,15	1÷2	—	—	—	—
Vetro da finestre	71÷74	—	—	13÷17	—	10÷15	0,15	0,5	—	—	—	—
Cristallo di Boemia	72÷76	—	—	0÷3	12÷15	8÷10	—	1	—	—	—	—
Cristalli al piombo	50÷56	—	—	—	12÷14	—	—	—	30÷33	—	—	—
Vetro da laboratorio (Jena)	70÷72	5	—	7÷10	—	1÷2	—	5÷6	—	4	—	—
Vetro ad alta resistenza chimica	64	13	—	7	—	—	—	6	—	—	10	—
Pyrex	80,5	12	—	4,5	0,2	0,3	—	2,3	—	—	0,8	—
Flint	60	—	—	—	14	—	—	—	23	3	—	—
Crown	70	—	—	—	19	11	—	—	—	—	—	—
Vetro speciale per ottica	—	3	70	—	12	—	—	10	—	—	—	4

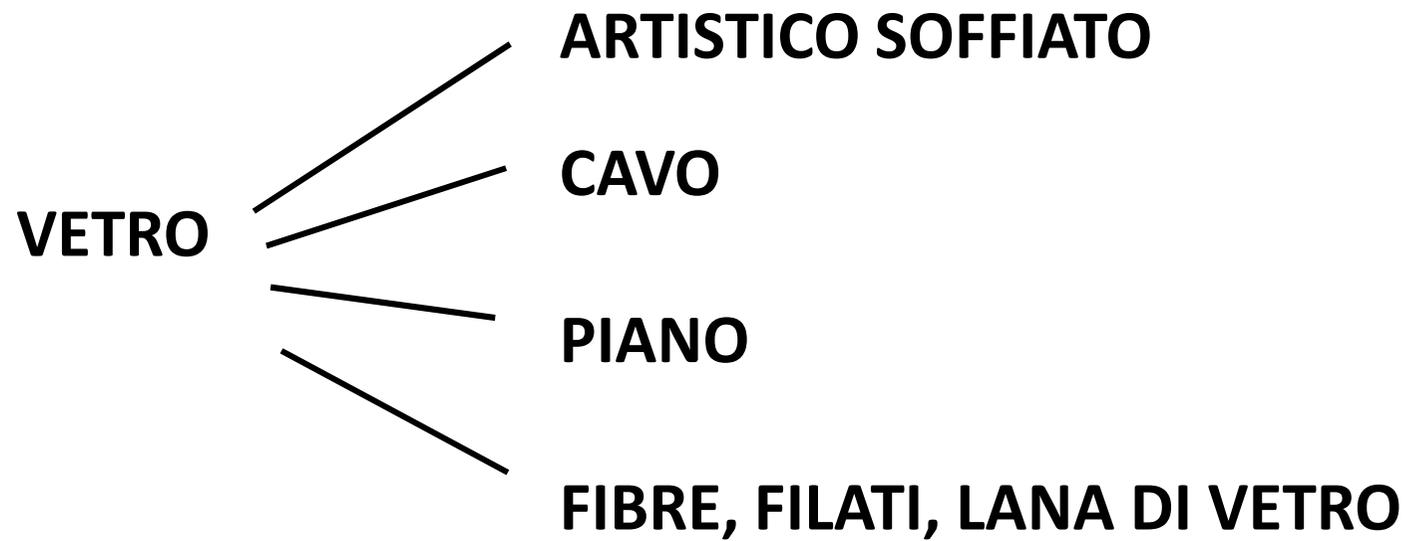
Composizioni percentuali di alcuni vetri.

La tabella seguente mostra le percentuali in peso tipiche di alcuni ossidi nei vetri:

Intervalli di composizione tipici dei vetri comuni

Componente	% minima	% massima	% standard
SiO₂	68,0	74,5	70,2
Al₂O₃	0,0	4,0	0,7
Fe₂O₃	0,0	0,45	0,1
CaO	9,0	14,0	11,0
MgO	0,0	4,0	2,4
Na₂O	10,0	16,0	13,4
K₂O	0,0	4,0	2,0
SO₃	0,0	0,3	0,2

TIPOLOGIA



LAVORAZIONE ARTISTICA

Si tratta della soffiatura e lavorazione manuale del vetro alla fiamma libera, i cui maestri più famosi sono a Murano. Si producono ciotole, bicchieri, sculture, mosaici, vetrate, etc.



Vetrata colorata della
cattedrale di Les
Andelys in Normandia



Scultura di vetro

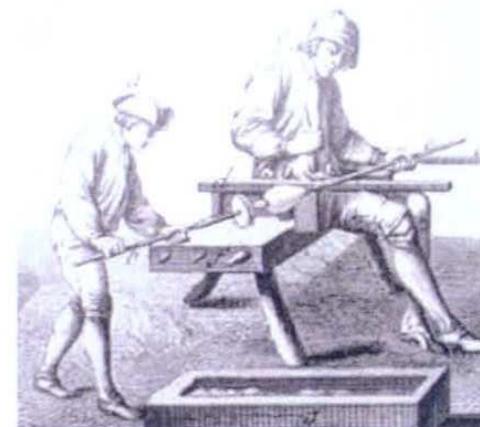


Mosaico realizzato con
tessere in vetro



Tecnica Tiffany

Vetro soffiato





Lavorazione del vetro soffiato





Utensili del vetraio

-a:

Canna. Tubo di metallo con una estremità svasata con cui si preleva la pasta vitrea dal crogiolo.

-d:

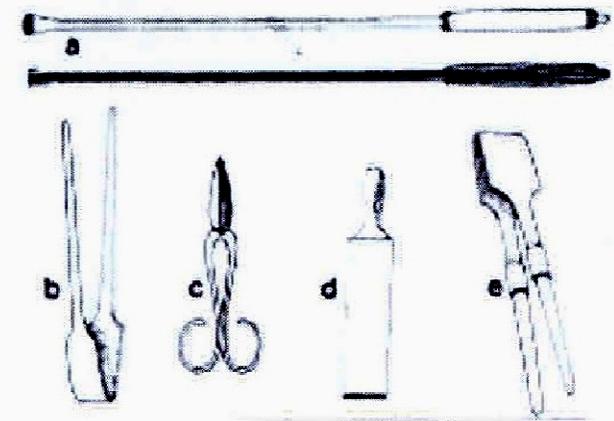
Ferrabate. Strumento con il quale il maestro vetraio tocca il vetro incandescente per facilitarne l'arrotondamento, mentre con la canna la gira sul marmo.

-c:

Forbici. Con le forbici il soffiatore taglia per esempio a giusta misura il piede dei calici, che realizza unendo due parti (coppa e piede).

-b:

Pinze in metallo e con il manico in legno. Usi di vario tipo.



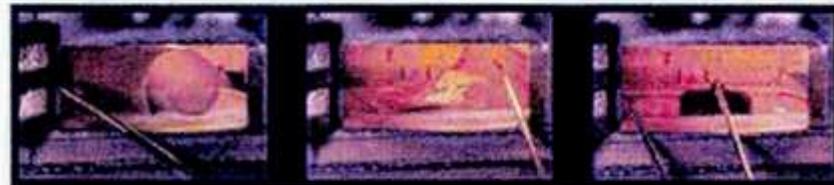
VETRO PIANO

VETRO CILINDRICO

Il vetro viene soffiato all'interno di stampi metallici cilindrici, quindi dalla forma ottenuta vengono asportati gli estremi e praticato un taglio lungo una generatrice del cilindro. È quindi posto in un forno, dove, rammollendosi, si apre e si stende in lastra. Prima dell'introduzione del metodo Pilkington a galleggiamento, questa tecnica era molto diffusa per la produzione del vetro comune.

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



VETRO PIANO

VETRO TIRATO (LUCIDO)

Per la produzione del vetro tirato (o vetro segato) la massa di vetro fusa viene meccanicamente tirata da due forze di uguale direzione ma di verso opposto. Questo vetro presenta caratteristiche ondulazioni della superficie. Il vetro tirato e quello *float* hanno la stessa composizione chimica e la stesse proprietà fisiche. Viene anche commercialmente denominato semi-doppio, doppio, mezzocristallo. Il vetro tirato viene impiegato nella creazione delle vetrate artistiche.

VETRO PIANO

- **Vetro colato (laminato):** prima dell'invenzione di Alastair Pilkington, il vetro a lastra era in parte realizzato per colata, estrusione o laminazione e le superfici non avevano le facce otticamente parallele, dando origine a caratteristiche aberrazioni visive. Il parallelismo poteva essere ottenuto con la lucidatura meccanica, ma con elevati costi. Per questo motivo oggi questa tecnica viene usata solo per produrre vetri particolari o decorativi, quali:
- **Vetro stampato:** su una superficie del vetro viene stampato un disegno in rilievo. Lo "stampato C" è quello più famoso, utilizzato su porte e frigoriferi e non è di conseguenza lucido trasparente. Può essere anche ricavato da lastra atermica colorata nelle tonalità verde-marrone-grigio.
- **Vetro retinato:** il vetro retinato viene prodotto incorporando una rete metallica al suo interno e viene impiegato per sicurezza nelle zone sottoluca di parapetto delle vetrate. Può essere anche di aspetto colorato. Per il vetro retinato non è applicabile il processo di tempra, a causa della presenza della rete metallica.
- **Vetro ornamentale:** sabbiato, lavorato all'acido, colorato.

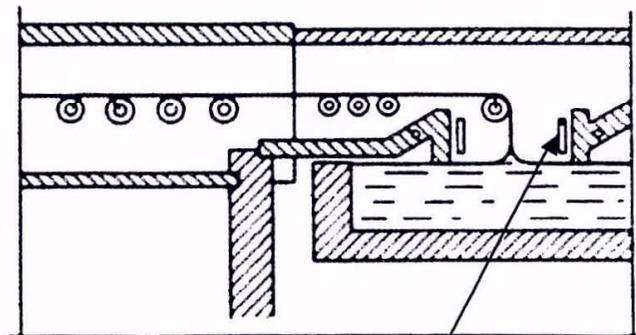
VETRO PIANO

VETRO FLOAT (GALLEGGIANTE)

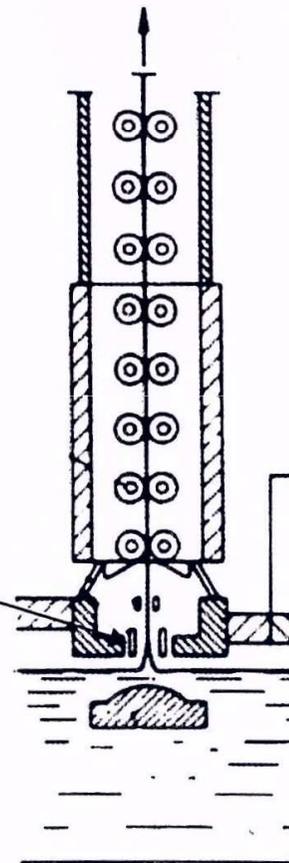
Il 90% del vetro piatto prodotto nel mondo, detto *vetro float*, è fabbricato con il sistema “a galleggiamento” inventato da ALASTAIR PILKINGTON, dove il vetro fuso è versato ad un'estremità di un bagno di stagno p fuso. Oggi quest'operazione è effettuata in atmosfera controllata. Il vetro galleggia sullo stagno e si spande lungo la superficie del bagno, formando una superficie liscia su entrambi i lati. Il vetro si raffredda e solidifica mentre scorre lungo il bagno, formando un nastro continuo. Il prodotto è poi “lucidato a fuoco”, riscaldandolo nuovamente su entrambi i lati, e presenta così due superfici perfettamente parallele. Le lastre sono realizzate con spessori standard di 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 19, 22 e 25 mm. Questo tipo di vetro è considerato pericoloso per l'uso in applicazioni architettoniche, poiché tende a rompersi in grossi pezzi taglienti, che possono causare gravi incidenti. Per ovviare a questo problema nel caso di applicazioni soggette ad urti o sollecitazioni statiche, la singola lastra può essere temprata come descritto nel relativo capitolo. Le normative edilizie pongono in genere delle limitazioni all'uso di questo vetro in situazioni rischiose, quali: bagni, pannelli di porte, uscite antincendio, nella scuole, ospedali ed in sottoluci dei parapetti.

PRODUZIONE DEL VETRO PIANO

Processo Libbey-Owens



Processo Pittsburgh



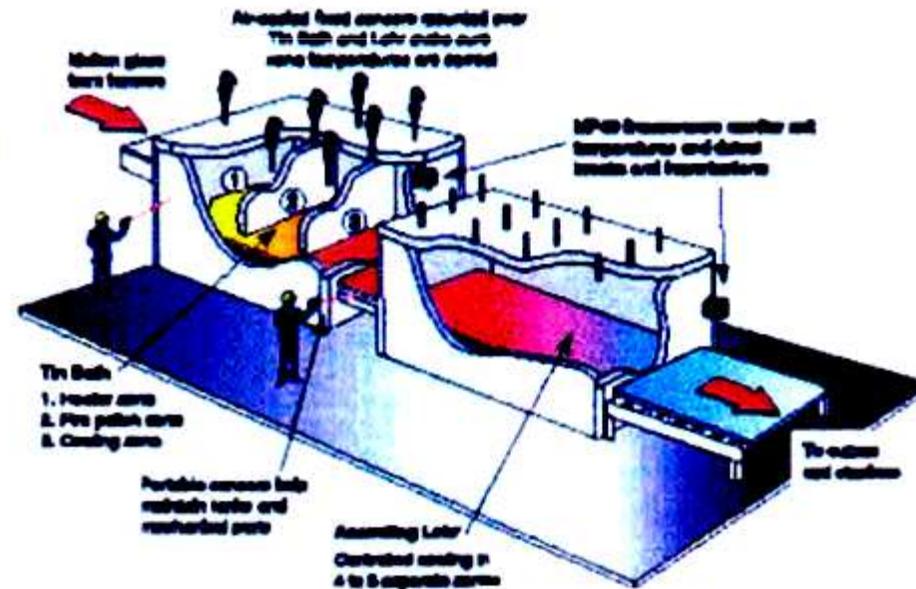
raffreddamento

- ↓ planarità
- ↓ spessore (< 6 mm)
- ↑ simmetria

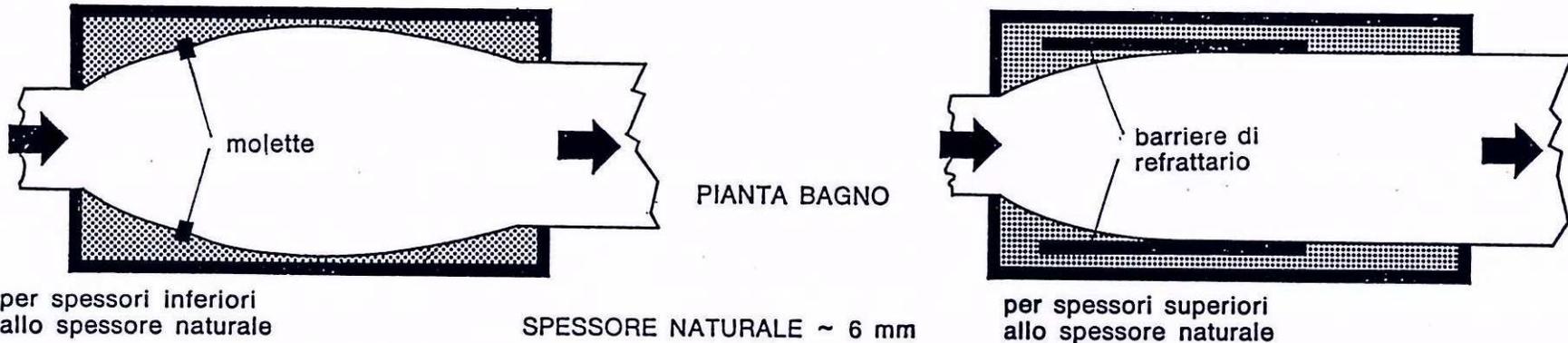
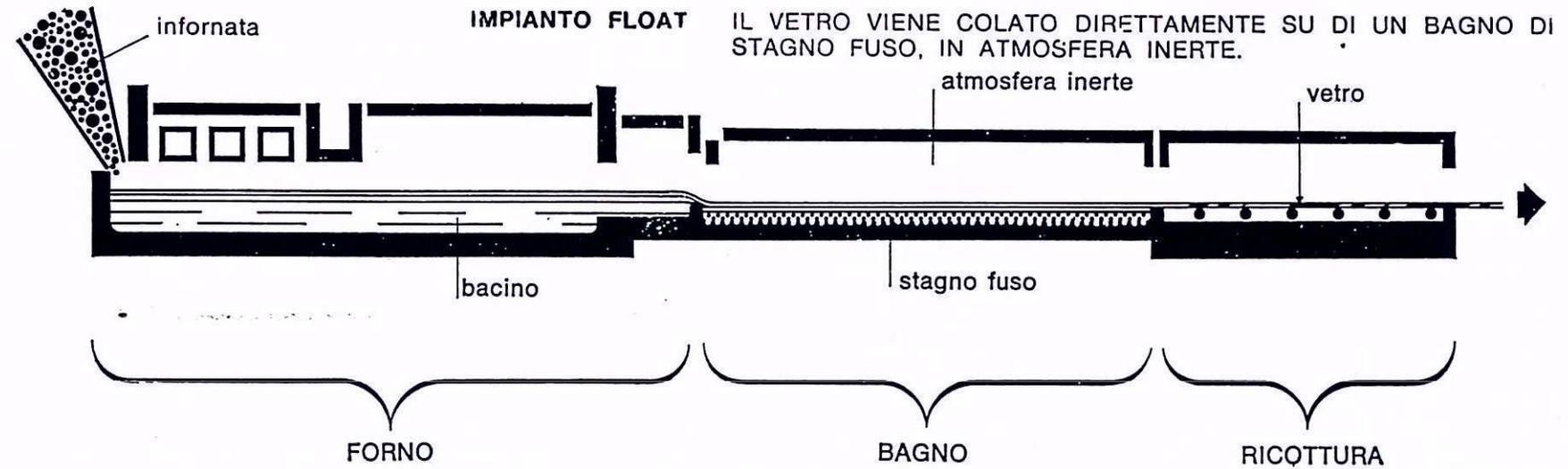
Il processo Pilkington Float

- Introdotta 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, spesso 6cm.

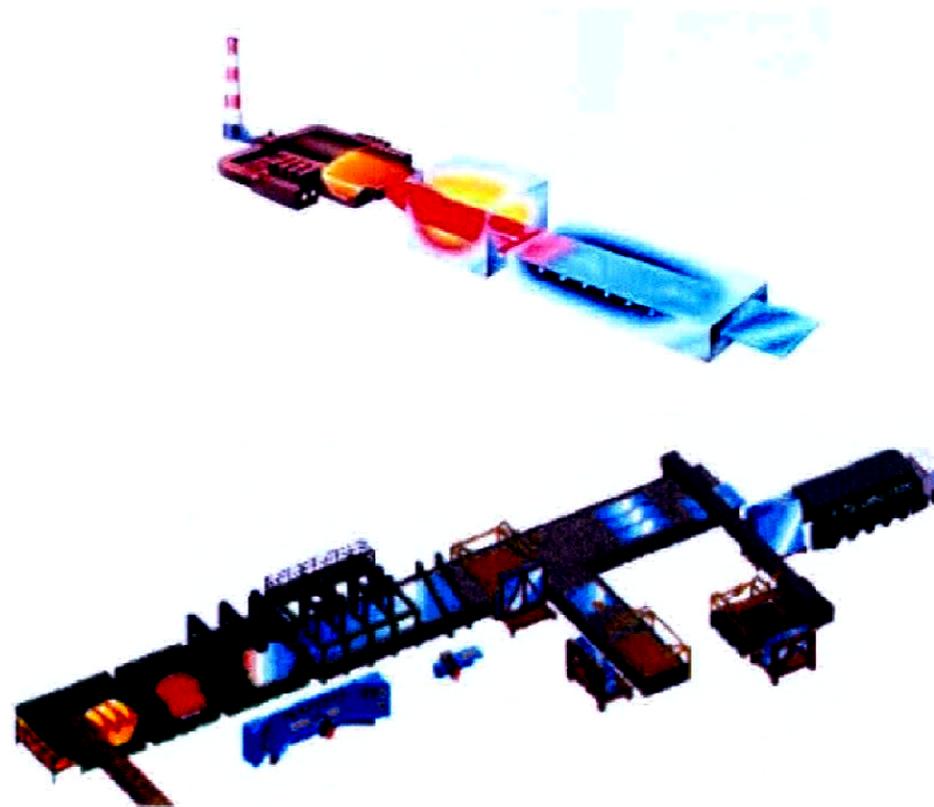
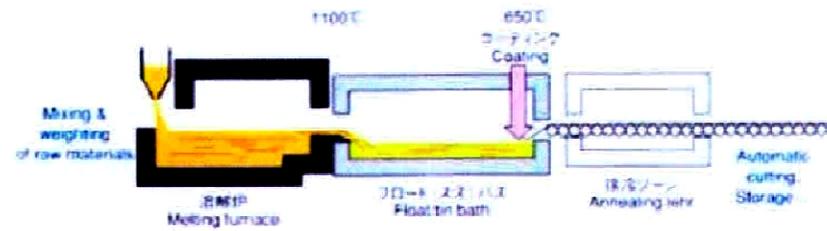
- Si usa lo stagno per la sua tensione superficiale la sua densità e il suo basso punto di fusione.
- Un impianto float può produrre 400t /giorno con una forza lavoro di 4 persone per turno



Schema Saint-Gobain di produzione del VETRO FLOAT



Il processo Pilkington Float



VETRO PIANO FLOAT

Protezione del bagno di stagno

La maggior parte del vetro piano nel mondo è prodotto con il processo “Float”, sviluppato dalla Pilkington nei primi anni '60; una linea di produzione tipicamente produce tra 350 e 750 t/g di vetro. Il cuore del processo è il bagno di stagno sul quale il vetro fuso in uscita dal forno si adagia, formando una superficie orizzontale uniforme e liscia. Il vetro si raffredda poi lentamente fino a raggiungere la temperatura di indurimento, per passare poi al forno di ricottura ed alle operazioni successive.

Lo stagno liquido, che è a temperatura compresa tra quella del vetro all'ingresso (più di 1000°C) e circa 500°C, tende ad ossidarsi, creando particelle di ossido di stagno, che galleggiano e provocano difetti sulla superficie del vetro.

Per ovviare questo inconveniente, il bagno di stagno è realizzato in un ambiente chiuso, nel quale si mantiene un'atmosfera riducente, ottenuta da una miscela di azoto e di idrogeno.

Stagno (elemento chimico)

Stagno



$_{50}\text{Sn}$

indio ← stagno → antimonio

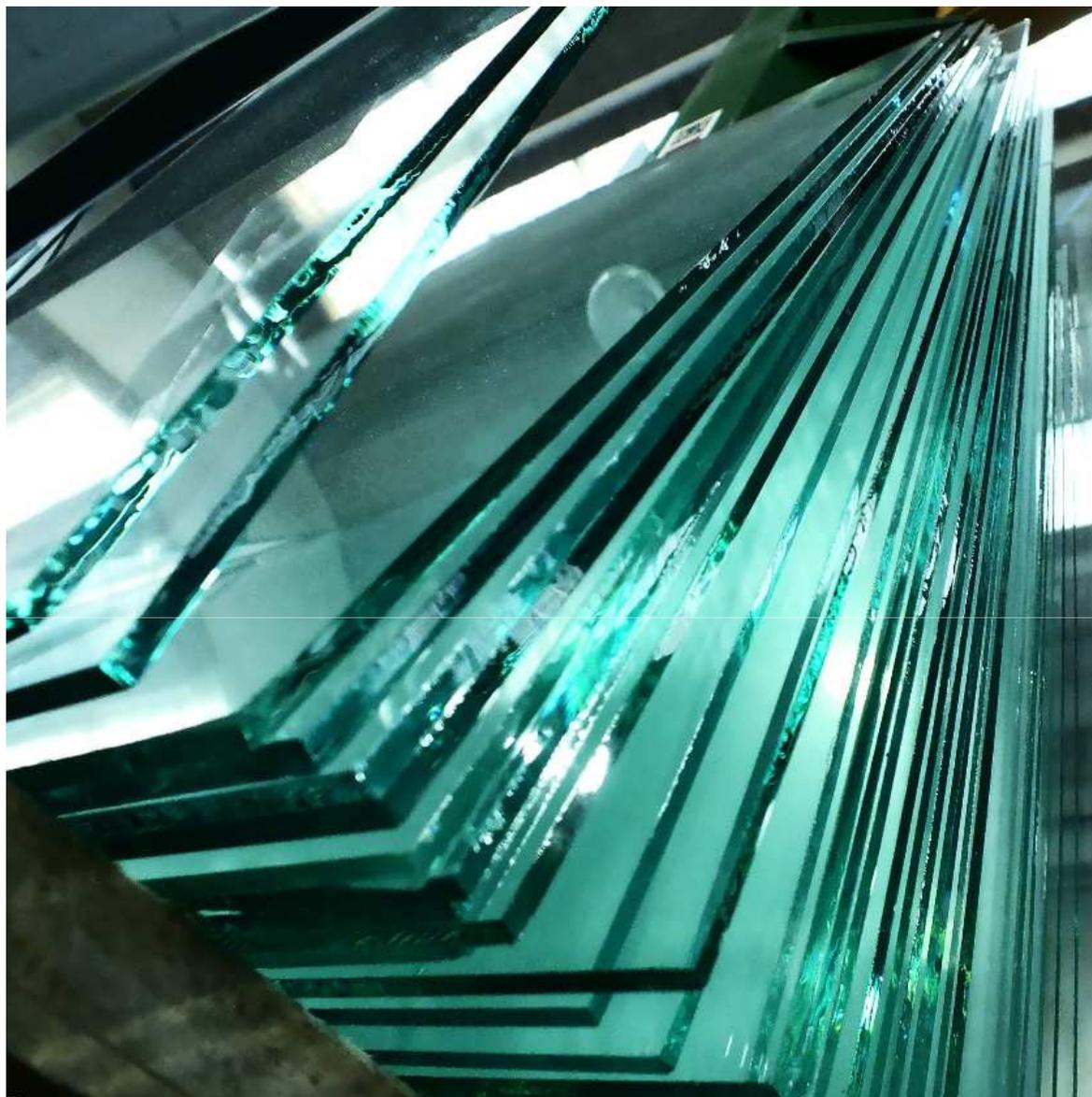
Aspetto



grigio argenteo, lucido

Generalità

Nome, simbolo, numero atomico	stagno, Sn, 50
Serie	metalli del blocco p
Gruppo, periodo, blocco	14 (IVA), 5, p
Densità	7310 kg/m ³
Durezza	1,5
Proprietà fisiche	
Stato della materia	solido
Punto di fusione	505,08 K (231,93 °C)
Punto di ebollizione	2875 K (2602 °C)
vaporizzazione	
Calore di fusione	7,029 kJ/mol
Tensione di vapore	$5,78 \times 10^{-21}$ Pa a 505 K
Calore specifico	228 J/(kg*K)
Conducibilità elettrica	$9,17 \times 10^6$ /(m·Ω)
Conducibilità termica	66,6 W/(m*K)



Lastre di vetro

Nella tabella di seguito vengono presentate alcune caratteristiche del vetro *float*:

Densità	2,5 kg/dm ³
Durezza	6,5 (scala Mohs)
Modulo elastico	750000 kgf/cm ²
Coefficiente di Poisson	0,23
Carico di rottura a compressione	10000 kgf/cm ²
Carico di rottura a trazione	400 kgf/cm ²
Carico di rottura a flessione	400 kgf/cm ²
Coefficiente di dilatazione termica	9x10 ⁻⁶
Conducibilità termica	1 kcal/h·m °C

TEMPRA TERMICA

Il vetro temprato viene ottenuto per indurimento tramite trattamento termico o chimico. Il pezzo deve essere tagliato alle dimensioni richieste e ogni lavorazione (come levigatura degli spigoli o foratura e svasatura) deve essere effettuata prima della tempra.

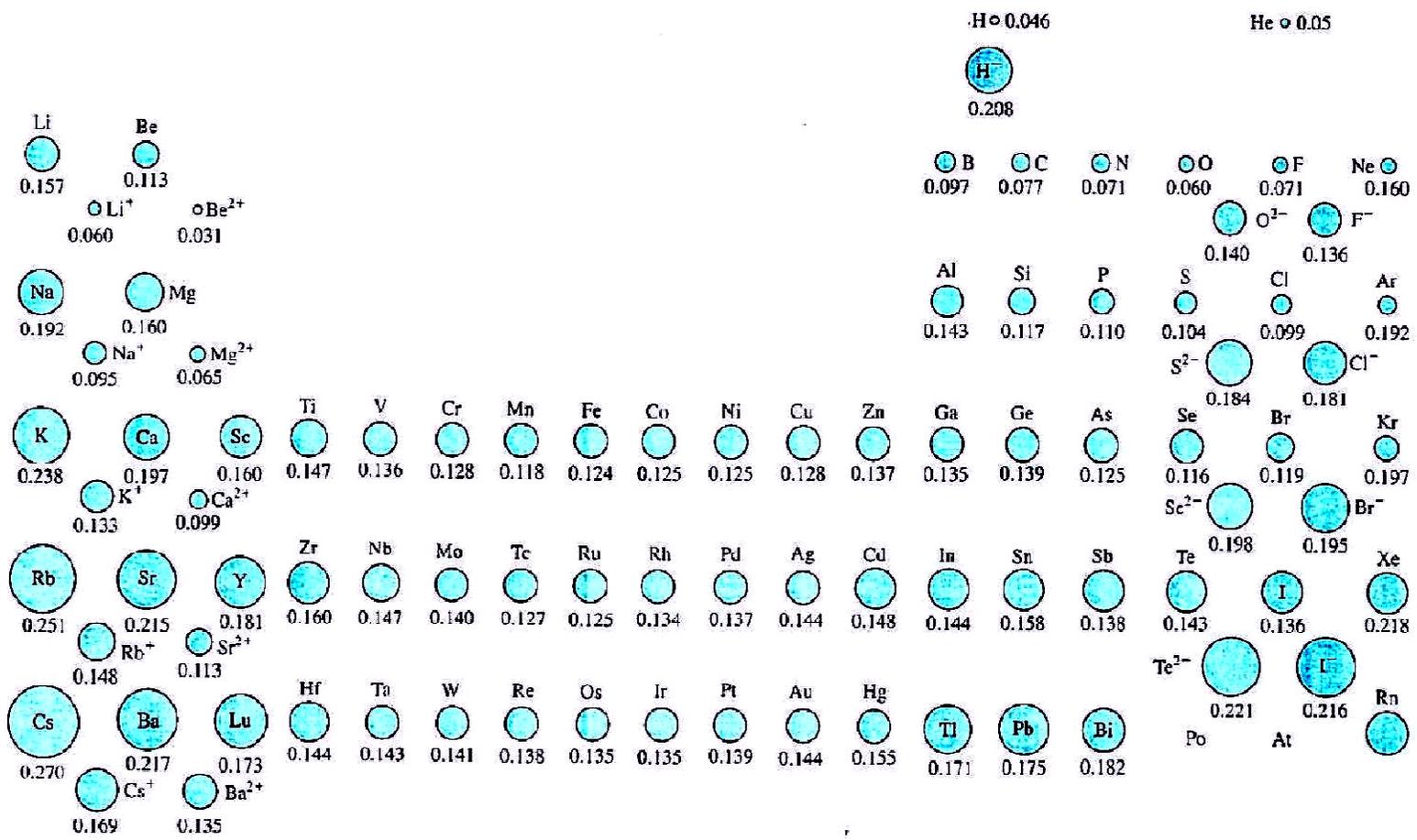
Il vetro è posto su un tavolo a rulli su cui scorre all'interno di un forno, che lo riscalda alla temperatura di tempra di 640°C. Quindi viene rapidamente raffreddato da getti di aria. Questo processo raffredda gli strati superficiali, causandone l'indurimento, mentre la parte interna rimane calda più a lungo. Il successivo raffreddamento della parte centrale produce uno sforzo di compressione sulla superficie, bilanciato da tensioni distensive nella parte interna. Gli stati di tensione possono essere visti osservando il vetro in luce polarizzata.

Il vetro temprato è circa sei volte più resistente del vetro *float*, questo perché i difetti superficiali vengono mantenuti "chiusi" dalle tensioni meccaniche compressive, mentre la parte interna rimane più libera da difetti che possono dare inizio alle crepe.

TEMPRA CHIMICA

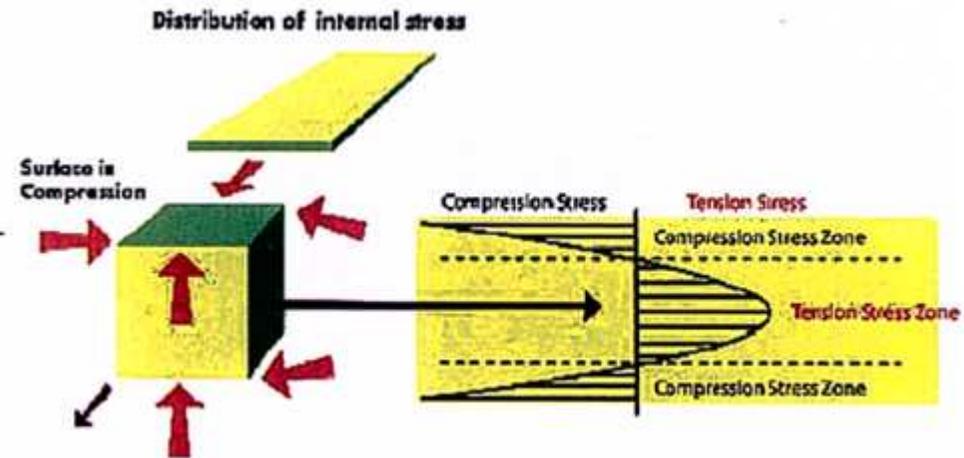
La tempra chimica si produce in un bagno di K_2NO_3 fuso a $380^\circ C$ con cui si sostituiscono nel vetro superficiale gli atomi di Na con quelli di K che sono a volume maggiore. Ciò causa una situazione di compressione superficiale tipica della tempra.

Dimensioni relative di alcuni atomi e ioni (in nanometri, nm). Per i metalli sono indicati i raggi degli atomi.



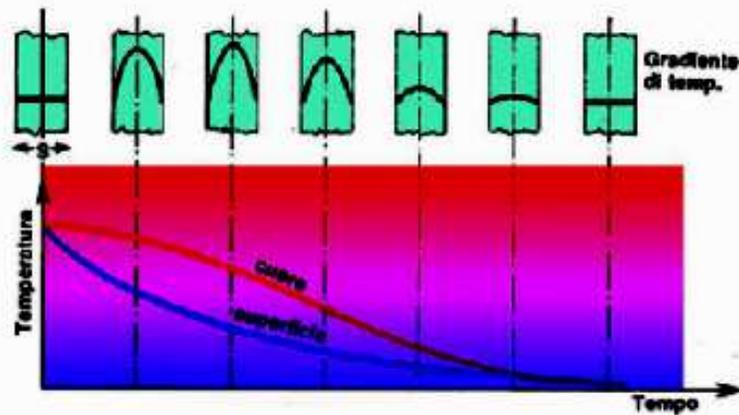
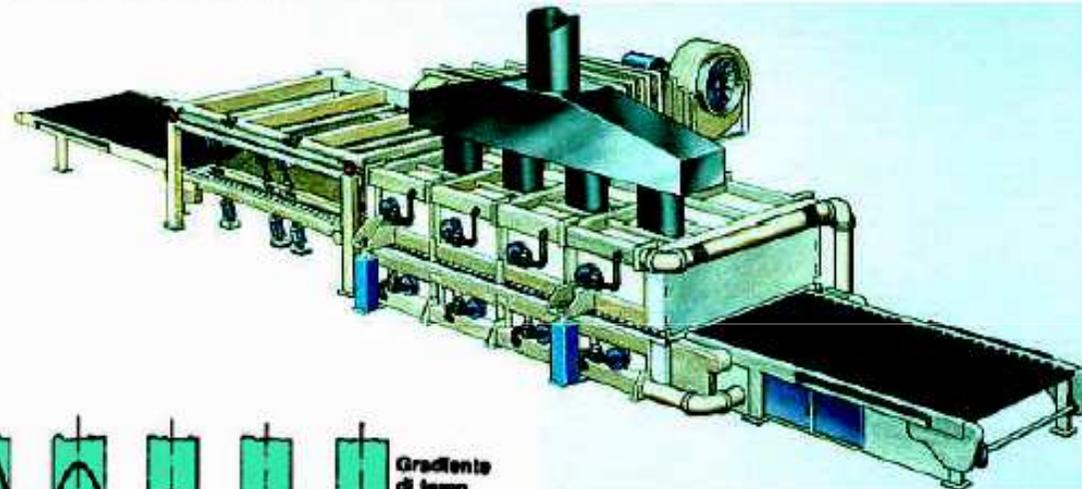
Tempra termica

- ❑ 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 e la superficie in compressione
- ❑ Il processo funziona perché 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



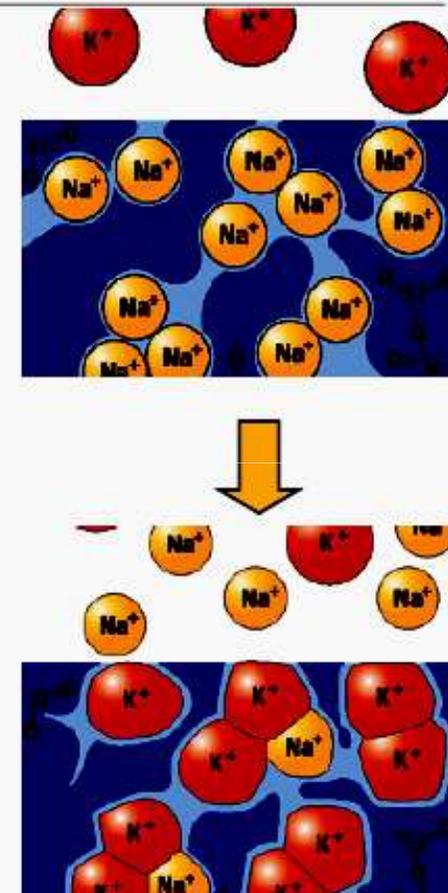
Forno per tempra termica

□ Schema costruttivo di un forno per tempra termica



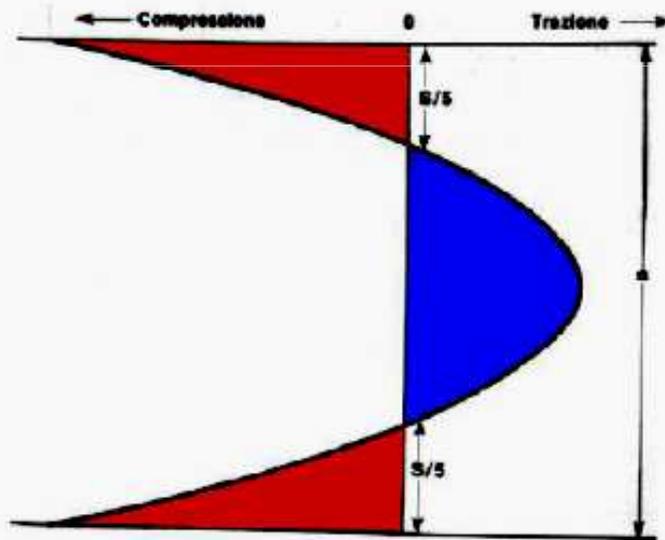
Tempra chimica

- ❑ 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 $10\mu\text{m}$ 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

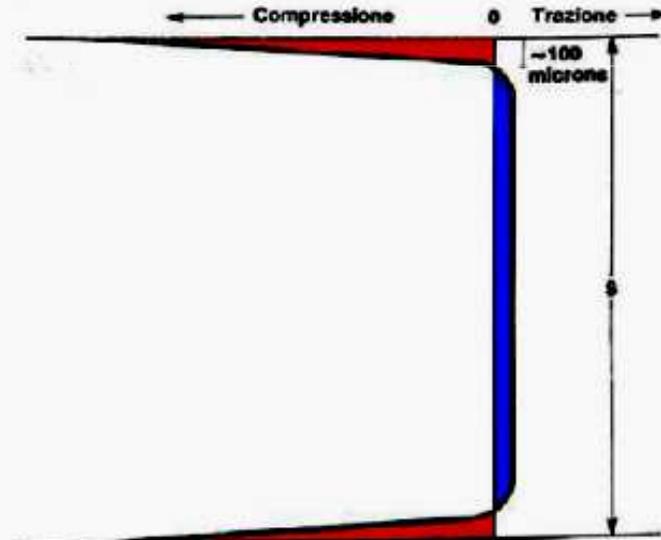


Confronto tra tempra termica a chimica

- Profilo degli stress lungo lo spessore in un vetro temprato termicamente



- Profilo degli stress lungo lo spessore in un vetro temprato chimicamente



VETRO RICOTTO, IN ASSENZA DI SOLLECITAZIONI

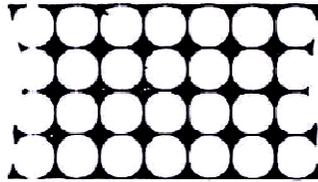
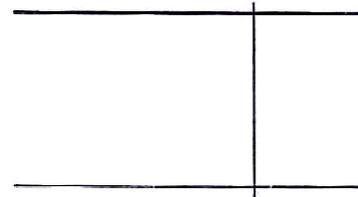


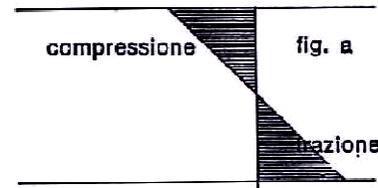
DIAGRAMMA DELLE TENSIONI



VETRO RICOTTO, SOTTOPOSTO A FLESSIONE



DIAGRAMMA DELLE TENSIONI



VETRO TEMPRATO, IN ASSENZA DI SOLLECITAZIONI



DIAGRAMMA DELLE TENSIONI



VETRO TEMPRATO, SOTTOPOSTO A FLESSIONE

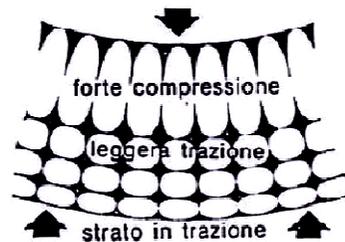


DIAGRAMMA DELLE TENSIONI



SAINT-GOBAIN

VETRO INDURITO

Il vetro indurito termicamente è sottoposto ad un trattamento che ne aumenta la resistenza alle sollecitazioni meccaniche e termiche, senza perdere la sua perfetta planarità per la formazione di ondulazioni “roller wave”.

L'indurimento avviene portandolo a una temperatura superiore ai 600°C seguita da raffreddamento graduale senza distorsioni superficiali.

Il vetro indurito è quindi una via di mezzo tra vetro ricotto e vetro temprato.

Tabella delle resistenze

Una tabella comparativa sui diversi requisiti della resistenza del vetro trasformato può dare al progettista qualche elemento utile per la scelta della tipologia di vetro più appropriata in rapporto ad una specifica applicazione.

Tipo di Vetro	Ricotto	Indurito	Temprato termico	Temprato chimico
Spessore (mm)	da 2.3 a 19	da 2.3 a 8	da 3.2 a 19	da 0.7 a 19
Compressione superficiale [N/mq]	0	30/70	30/70	300/400
Spessore zona compressa	0	20% spessore del vetro	20% spessore del vetro	Fino a 100/120 micron
Resistenza alla flessione [N/mq]	30/40	50/100	120/200	250/600
Resistenza [°C]	30	40/100	110/180	Over 200
Frammentazione	Pezzi grandi taglienti	Pezzi medi in Parte taglienti	Pezzi piccoli Non taglienti *	Pezzi grandi taglienti

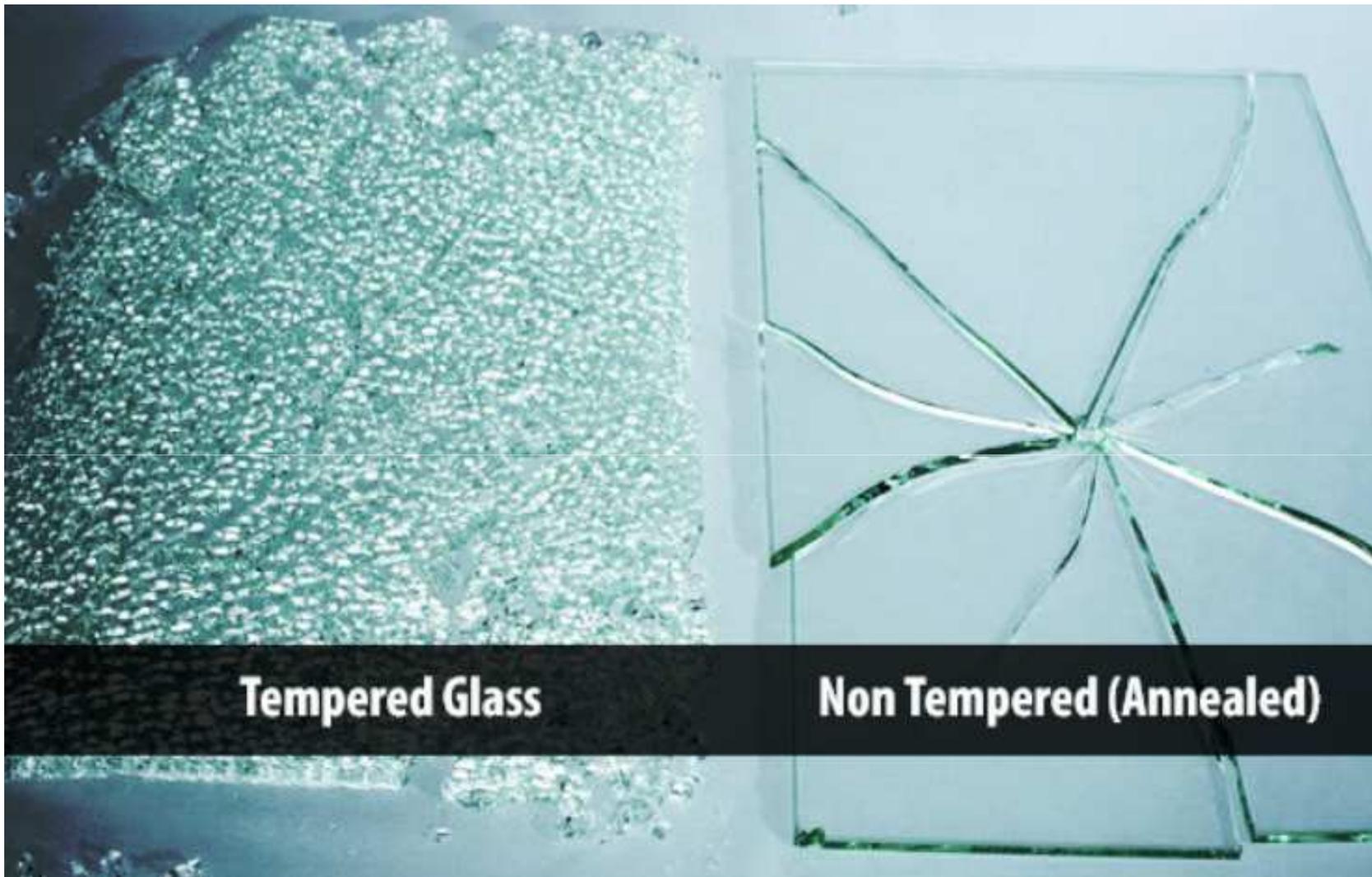
* Il vetro temperato termico è l'unico prodotto monolitico che può essere considerato "Vetro di Sicurezza". Tutti gli altri vetri, per essere ritenuti tali, devono essere stratificati.

APPLICAZIONI DEL VETRO TEMPRATO

Per la sua maggiore robustezza, il vetro temprato termicamente è spesso impiegato per la realizzazione di elementi senza struttura portante (tutto vetro), come porte in vetro e applicazioni strutturali e nelle zone parapetto.

È anche considerato un “vetro di sicurezza” in quanto, oltre ad essere più robusto, ha la tendenza a rompersi in piccoli pezzi smussati poco pericolosi. Questa caratteristica è sfruttata nell’industria automobilistica, dove viene impiegato per realizzare i finestrini laterali delle automobili, e in generale in tutte quelle applicazioni dove i frammenti del vetro infranto potrebbero colpire delle persone.

In alcune situazioni però si possono avere problemi di sicurezza a causa delle tendenze del vetro temprato a frantumarsi completamente in seguito ad un urto sul bordo. Da un punto di vista ottico la lastra di vetro può presentare delle distorsioni determinate dal processo di tempra rispetto ad un vetro non temprato. Perciò per lenti si utilizza solo la tempra chimica.

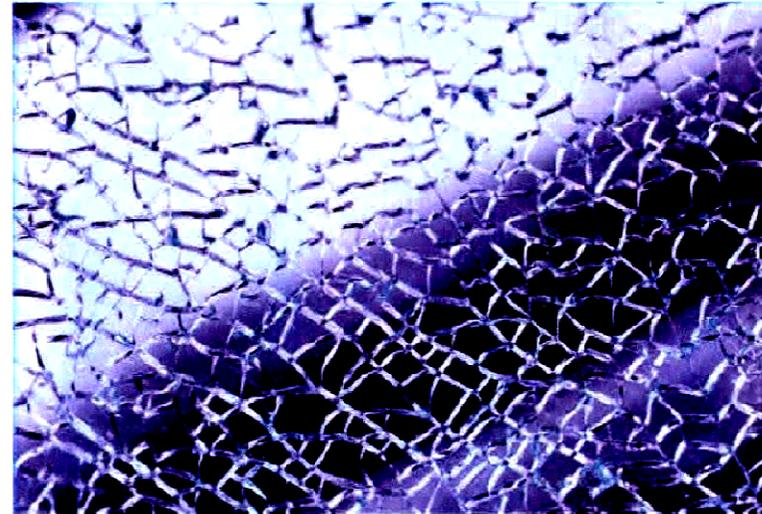


Tempered Glass

Non Tempered (Annealed)

Rottura del vetro temprato

□ A causa del rilascio istantaneo e distruttivo delle tensioni immagazzinate il vetro temprato si riduce in centinaia di frammenti dopo un urto distruttivo



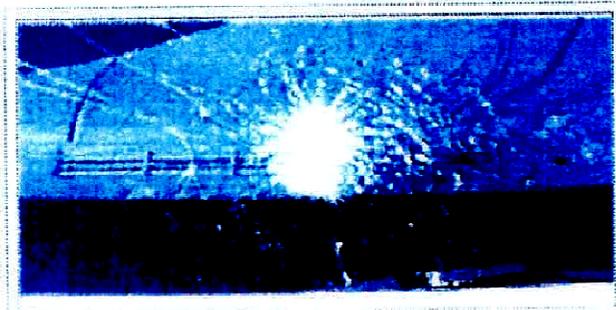
□ Il vetro temprato e laminato assorbe in maniera tenace gli urti grazie ad uno strato di un tecnopolimero polivinilbutirale



Vetro stratificato

Il vetro stratificato è realizzato unendo due o più strati di vetro ordinario alternato a un foglio plastico di colore simil-latteo, solitamente polivinilbutirale (PVB).

Il vetro stratificato è normalmente impiegato dove ci può essere il rischio di impatti con il corpo umano, oppure dove il pericolo possa derivare dalla caduta della lastra se frantumata. Le vetrine dei negozi, i parabrezza-lunotti delle auto sono tipicamente realizzati in vetro laminato come pure le zone parapetto delle vetrate interne ed esterne. È considerato un vetro di sicurezza grazie alla capacità di mantenersi compatto se fratturato.



Il parabrezza di un'auto in vetro stratificato con la rottura a "ragnatela"



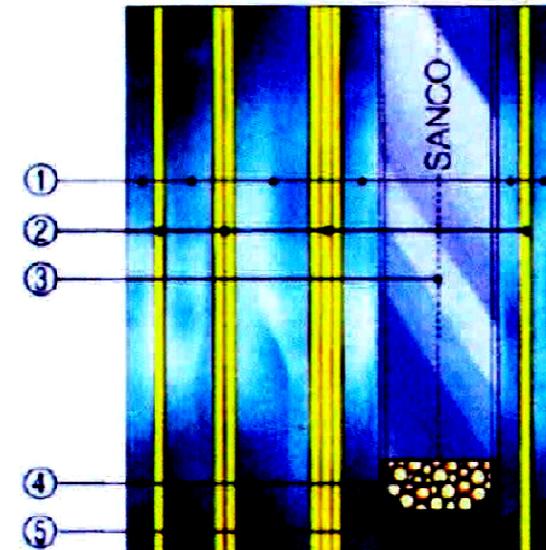
Vetro stratificato rotto: si può notare il film polimerico al quale sono rimasti attaccati i frammenti di vetro.



Tentativo di effrazione su vetro di sicurezza

I vetri di sicurezza

- ❑ I vetri di sicurezza si suddividono in:
 - ❑ **sicurezza per la protezione delle persone**, adatti ad evitare qualsiasi rischio di ferite gravi in caso di impatto o di caduta accidentali,
 - ❑ **sicurezza per la protezione dei beni**, che riducono gli effetti dei tentativi di effrazione o di vandalismo.
- ❑ La normativa UNI 7697 oltre a fornire la lista delle applicazioni, indica anche il livello prestazionale minimo imposto dei vetri stratificati di sicurezza.



- ① Float di spessori diversi
- ② PVB in diversi strati
- ③ Distanziatore in alluminio
- ④ Sali disidratanti
- ⑤ Sigillante plastico

I vetri di sicurezza per la protezione delle persone

□ In ambienti aperti al pubblico e/o adibiti ad attività sportive e/o frequentati da giovani, indipendentemente dall'altezza del suolo” si possono impiegare solo vetri di sicurezza e/o stratificati

□ Decreto Ministeriale n. 115 del 17/3/95 recepisce la direttiva 92/59 CEE punto 7.2.1



LE QUATTRO PRESTAZIONI PRINCIPALI DEL VETRO STRATIFICATO

1

VETRO DI SICUREZZA SEMPLICE

È la funzione per la quale è nato il vetro stratificato: in caso di rottura i frammenti rimangono tenacemente aderenti al plastico e pertanto dalla lastra non possono staccarsi pezzi di vetro di dimensioni pericolose per l'incolumità delle persone.

Tale caratteristica, unita alla permanenza in opera del pannello, fanno del cristallo stratificato il miglior prodotto vetrario di sicurezza a livello antiinfortunistico.

2

VETRO ANTIVANDALISMO

In opportune composizioni di vetro stratificato è in grado di resistere a violenti e ripetuti colpi di mattoni, martelli, ecc. Pur rompendosi, lo stratificato rimane in opera, e continua a proteggere persone e beni in occasione di atti vandalici occasionali.

3

VETRO ANTICRIMINE

È un vetro stratificato in grado di resistere a diversi livelli prestazionali all'attacco intenzionale portato contro il vetro allo scopo di superarlo per motivi criminali.

È necessario comunque tener presente che, in ogni caso, un prodotto stratificato, per quanto ben realizzato, costituisce per sempre un ostacolo passivo, tale cioè da poter essere superato se a questo scopo di dedica sufficiente tempo ed applicazione.

Un ostacolo di questo tipo deve quindi essere considerato unicamente in termini di ritardo che esso apporta all'azione avversaria e non in termini di assoluta, invalicabile barriera.

4

VETRO ANTIPROIETTILE

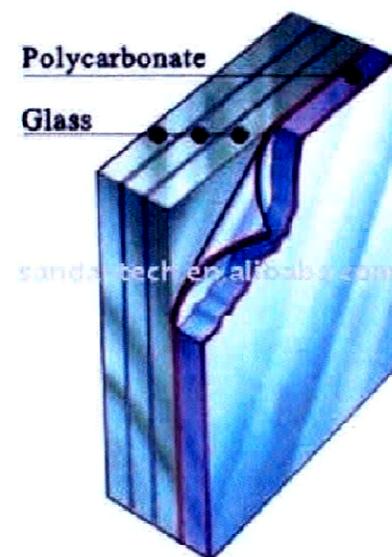
Nelle composizioni di tre o più lastre lo stratificato è in grado di resistere all'urto dei proiettili.

Aumentando lo spessore ed il numero degli strati si possono ottenere prodotti in grado di resistere ai proiettili sparati da armi civili e militari ad alta energia.



Vetri antiproiettile

- Il vetro antiproiettile si ottiene accoppiando fra di loro due o più lastre di vetro di spessore variabile da 6 a 10 millimetri, tra le quali viene interposto e incollato uno strato di elastomeri, come poliuretano o polivinilbutirrale, sostanze che hanno una grande elasticità e una grande resistenza alla trazione, ma sono perfettamente trasparenti.
- Criterio di classificazione: Un vetro della misura di 50x50 cm viene colpito più volte da differenti proiettili d'arma da fuoco con differenti velocità d'impatto. Il vetro, dopo i colpi sparati dall'arma e con il munizionamento previsto dalla classe di resistenza, non deve essere trapassato da nessun proiettile.



LE PRESTAZIONI COMPLEMENTARI

VETRO PER PROTEZIONE ACUSTICA

Il cristallo stratificato costituisce il miglior prodotto vetrario al fine dell'isolamento acustico.

A parità di spessore, di vetro, il Potere Fonoisolante di un cristallo stratificato è superiore a quello di un cristallo monolitico in virtù dell'effetto smorzante del film plastico e della combinazione di strati di vetro plastico.

VETRO STRATIFICATO PER LA PROTEZIONE SOLARE

La possibilità di utilizzare per la composizione dello stratificato il plastico colorato, i cristalli colorati, permette di ottenere una grande varietà di pannelli adatti ad applicazioni di notevole pregio estetico ed efficaci nel campo del controllo solare.

VETRO STRATIFICATO PER LA PROTEZIONE CONTRO I RAGGI ULTRAVIOLETTI

Tutto lo spettro della radiazione solare può produrre, per reazioni fotochimiche, una alterazione del colore di oggetti esposti nelle vetrine.

I più sensibili a questo tipo di radiazioni sono i tessuti, gli articoli di cuoio, i mobili, ecc.

Particolarmente responsabile di questo fenomeno è la componente ultravioletta della radiazione, dalla quale i processi fotochimici sono più energicamente attivati. Più lenta invece è l'azione della componente visibile dello spettro solare.

L'utilizzo di un plastico speciale quale componente dello stratificato, consente di ridurre questo fenomeno, garantendo una trasmissione della luce senza la componente U.V., allungando di molto i tempi della reazione.

SAINT-GOBAIN

LAVORAZIONI DEL VETRO PIANO

- TAGLIO
CON TAGLIAVETRO MUNITO DI ROTELLA IN CARBURO DI SILICIO O WIDIA O DIAMANTE SINTETICO.
- MOLATURA E LUCIDATURA
PER ELIMINARE SPIGOLI TAGLIENTI
- INCISIONI E DECORAZIONI
A MOLA, A GETTO DI SABBIA, CON ACIDO FLUORIDRICO
- FORATURA
CON TRAPANI PROVVISI DI PUNTE DIAMANTE SOTTO GETTO CONTINUO DI ACQUA
- ARGENTATURA
CHE TRASFORMA IL VETRO O IL CRISTALLO IN SPECCHIO
- CURVATURA
A CALDO (500-750°C) CON APPOSITI STAMPI (Vedi PUNTO DI RAMMOLLIMENTO)
- SATINATURA
PER RENDERE LA SUPERFICIE DEL VETRO OPACA. SI FA SMERIGLIANDO O TRATTANDO CON ACIDO FLUORIDRICO
- SMALTATURA
CON SMALTI PORCELLANATI



Molatura del vetro

VETRO CURVO

Il vetro curvo è un vetro sottoposto ad un procedimento di riscaldamento graduale ad alte temperature (tra i 500 e i 750°C circa), fino a diventare abbastanza plastico da aderire (per gravità o costretto in una qualche maniera) ad uno stampo concavo o convesso, disposto orizzontalmente o verticalmente all'interno del forno di curvatura.

Dopo questa fase, il vetro viene raffreddato molto lentamente ("detensionamento" o "ricottura" del vetro), per evitare di indurre tensioni che ne precluderebbero un'eventuale successiva lavorazione o che potrebbero innescare fenomeni di rottura spontanea del materiale. Il processo di detensionamento viene normalmente adottato per i parabrezza delle automobili, per i quali è prevista la messa in sicurezza mediante stratifica e non mediante tempra. Viceversa, molto più frequentemente per il vetro impiegato nel settore dell'arredamento, il processo di curvatura si conclude con un raffreddamento istantaneo, al fine di ottenere un vetro curvo temprato.

Per vetro curvo si intende comunemente il vetro sottoposto alla curvatura lungo un solo asse della lastra (si pensi ad esempio alla curvatura che subisce un foglio di carta quando si tendono ad avvicinare due lati opposti).

VETRO CAVO

Per vetro cavo si intende un vetro sottoposto ad un processo di riscaldamento graduale tale da far raggiungere alla massa in lavorazione una viscosità di scorrimento sufficiente a permetterne la deformazione spontanea, ovvero ad indurre la deformazione in maniera relativamente facile: tramite insufflaggio in stampi, vuoto pneumatico, gravità, manipolazione mediante attrezzature specifiche, eccetera.

Il vetro cavo, può subire alcune lavorazioni prima e dopo il processo di formatura. Ad esempio, un vetro cavo può essere temprato.

Successivamente alla tempra, il vetro cavo potrà essere sabbiato, satinato, colorato con vetrine e smalti a caldo e/o a freddo.

OGGETTI DI VETRO CAVO

Esempi di vetro cavo possono essere oggetti d'arte come bicchieri e vasellame in genere ottenuti con il metodo della soffiatura a bocca (famosissima la lavorazione artigianale delle isole della laguna veneta), ma anche oggetti comuni o di arredo ottenuti in maniera industriale o semi-industriale, come porta-sapone, plafoniere, bicchieri da tavola, boccette, caraffe, lavabi o addirittura piani con vasche integrate ricavate dalla lastra industriale tramite termoformatura.

Trasformazioni del vetro cavo

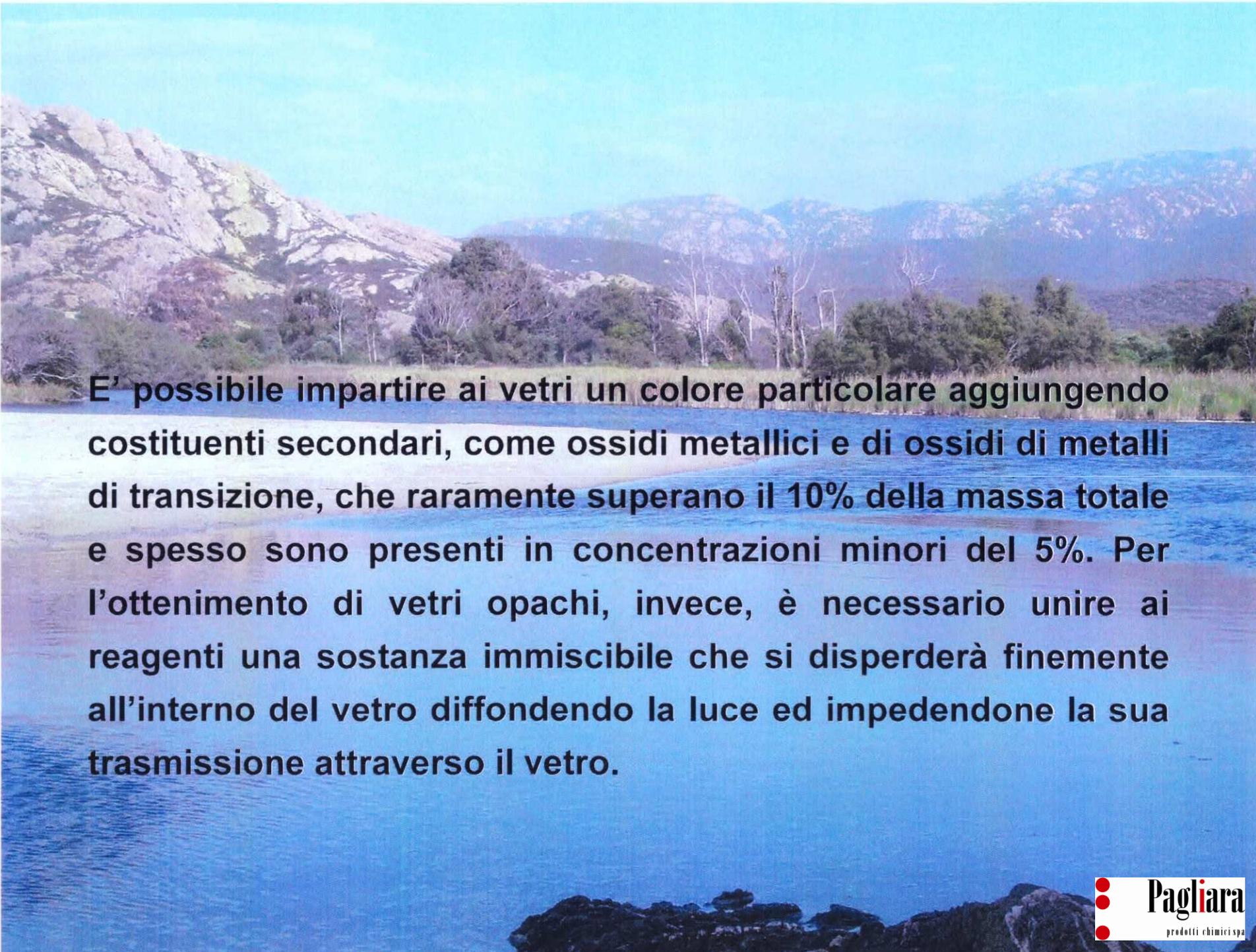
Le trasformazioni a cui può essere sottoposto il vetro cavo sono:

- Decorazione
- Tampografia
- Incisione
- Verniciatura
- Sabbiatura
- Satinatura

COLORAZIONE DEL VETRO

Metalli e ossidi metallici vengono aggiunti nella produzione del vetro per dare o alterare il colore. Il manganese in piccole quantità neutralizza il verde causato dalla presenza di ferro, mentre in quantità elevate dà il colore ametista. Similmente il selenio in piccole dosi è usato per decolorare, mentre in quantità elevate dona colore rosso. Piccole concentrazioni di cobalto (0,025-0,1%) danno colore blu. Ossido di stagno con ossidi di arsenico e antimonio danno un vetro bianco opaco, usato nei laboratori di Venezia per imitare la porcellana (vetro lattimo).

Aggiunte dal 2% al 3% di ossido di rame producono un colore turchese, mentre il rame metallico dà un rosso opaco, e viene impiegato come surrogato del rubino rosso. Il nichel, dipendentemente dalla concentrazione, induce blu, violetto o anche nero. L'aggiunta di titanio dà un vetro giallo-marrone. L'oro colloidale in concentrazioni minime (0,001%) produce un vivace colore rosso rubino, mentre una quantità ancora minore dà sfumature meno intense di rosso, commercializzate con il nome di "vetro cranberry" (lampone).



E' possibile impartire ai vetri un colore particolare aggiungendo costituenti secondari, come ossidi metallici e di ossidi di metalli di transizione, che raramente superano il 10% della massa totale e spesso sono presenti in concentrazioni minori del 5%. Per l'ottenimento di vetri opachi, invece, è necessario unire ai reagenti una sostanza immiscibile che si disperderà finemente all'interno del vetro diffondendo la luce ed impedendone la sua trasmissione attraverso il vetro.

Il ferro, ad esempio, impartisce una colorazione verde al vetro in quanto è presente solitamente come miscela di ioni ferrosi (Fe^{2+}), che colorano di blu il vetro e di ioni ferrici (Fe^{3+}), che lo colorano di giallo; l'effetto combinato dei due ioni è il familiare colore verde delle bottiglie. 

Gli ioni rameici (Cu^{2+}) → blu luminoso 

Gli ioni rameosi (Cu^+) → rosso 

Il Co^{3+} → blu o rosa a seconda della matrice vetrosa da cui è circondato (tipico dei vetri per saldatori o delle bottiglie blu) 

Gli ossidi delle terre rare impartiscono al vetro un'intensa colorazione:

Ce^{2+} → gialla e il Nd^{3+} → violetto.



colore

il colore è legato ad un meccanismo di assorbimento. in particolare, la colorazione è dovuta ad un assorbimento selettivo della luce visibile su certe determinate lunghezze d'onda. è dovuta a transizioni elettroniche degli elettroni appartenenti a ioni di metalli di transizione

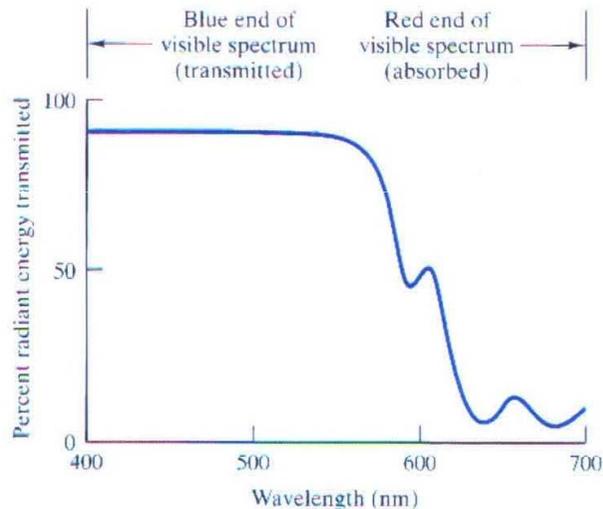


Figure 16.10 Absorption curve for a silicate glass containing about 1% cobalt oxide. The characteristic blue color of this material is due to the absorption of much of the red end of the visible-light spectrum.

Ion	In glass network		In modifier position	
	Coordination number	Color	Coordination number	Color
Cr ²⁺				Blue
Cr ³⁺			6	Green
Cr ⁶⁺	4	Yellow		
Cu ²⁺	4		6	Blue-green
Cu ⁺			8	Colorless
Co ²⁺	4	Blue-purple	6-8	Pink
Ni ²⁺		Purple	6-8	Yellow-green
Mn ²⁺		Colorless	8	Weak orange
Mn ³⁺		Purple	6	
Fe ²⁺			6-8	Blue-green
Fe ³⁺		Deep brown	6	Weak yellow
U ⁶⁺		Orange	6-10	Weak yellow
V ³⁺			6	Green
V ⁴⁺			6	Blue
V ⁵⁺	4	Colorless		

Source: F. H. Norton, *Elements of Ceramics*, 2nd ed., Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, MA, 1974.

I più comuni coloranti

<i>Coloranti</i>	<i>Formule</i>	<i>Colori originali</i>	<i>Principi attivi</i>	<i>Colorazioni date</i>
Composti di manganese	Mn ₂ O ₃ MnO ₂ KMnO ₄	Bruno in polvere Grigio nero Viola	Mn ₂ O ₃ per tutti	Viola di variata tonalità in funzione della temperatura e della durata della fusione
Ossidi di ferro	FeO Fe ₂ O ₃	Nero in polvere Rosso bruno in polvere	FeO Fe ₂ O ₃	Verde semplice, oppure verde bottiglia o, infine, verde giallastro
Composti del cromo	Cr ₂ O ₃ K ₂ CrO ₄ K ₂ Cr ₂ O ₇	Polvere verde Polvere gialla Cristalli arancione	Cr ₂ O ₃ Peraltro, di solito invece di questo composto si usano i più fusibili cromati e bicromati	Verde tendente al giallo
Ossidi di cobalto	Co ₃ O ₄ Co ₂ O ₃	Polvere grigia Polvere nerastra	CoO	Blu
Solfuro di cadmio	CdS	Polvere giallo-arancio	CdS	Giallo
Ossidi di rame	Cu ₂ O CuO	Polvere bruno-rossa Polvere nera	Cu ₂ O CuO	Rosso di vario tono Celeste-blu
Oro metallico	Au	Polvere giallo-oro	Au colloidale	Rubino di varia tonalità

COLORI IN FORMA COLLOIDALE

Sono costituiti da oro, argento, rame dispersi allo stato metallico come particelle colloidali nello smalto.

Il colore risultante è determinato dalla dimensione delle particelle.

Per esempio per l'oro si ha:

Colore	Particelle nm
pink	7
rubino	50
blu	90
rosso bruno	150
incolore	500

Gli ioni argento Ag^+ sono più stabili dell'oro, e danno colorazione gialla. Gli ioni rame Cu^+ si comportano in modo simile all'oro e danno i colori sangue di bue e fiore di pesco.

Il vetro Lattimo

- Il vetro lattimo fu sviluppato dai veneziani come imitazione delle porcellane cinesi



- Boccale in vetro lattimo con decorazione dipinta. XVIII secolo.

Vetro veneziano nel 500

- ❑ In questo secolo i vetrai muranesi prediligono il vetro puro e trasparente sul quale intervengono con differenti tecniche decorative.
- ❑ Il ritorno alla decorazione pittorica è connotato dalla stesura, a freddo, del colore applicato sul rovescio degli oggetti in modo da sfruttare la trasparenza del vetro.



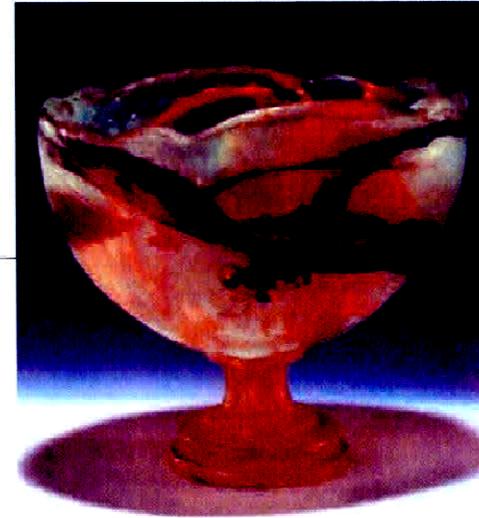
- ❑ Brocca in filigrana "a reticello"(secolo XVI)
Murano, Museo del Vetro

Art nouveau

□ I vetri di Gallè 1846 - 1904

□ Vetro decorato a intaglio

□ Vetro tiffany



LAVORAZIONE DEL VETRO

Il vetro si lavora allo stato plastico (semisolido) che è a temperatura di poco inferiore alla temperatura di fusione.

Il soffiaggio artigianale è per la lavorazione artistica.

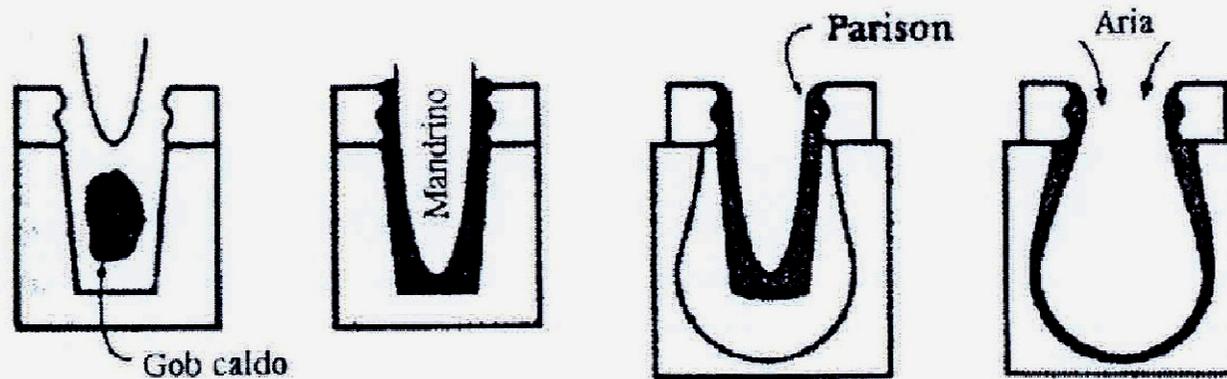
Il soffiaggio industriale, per la grande produzione di vetro cavo, con uso di stampi automatici.

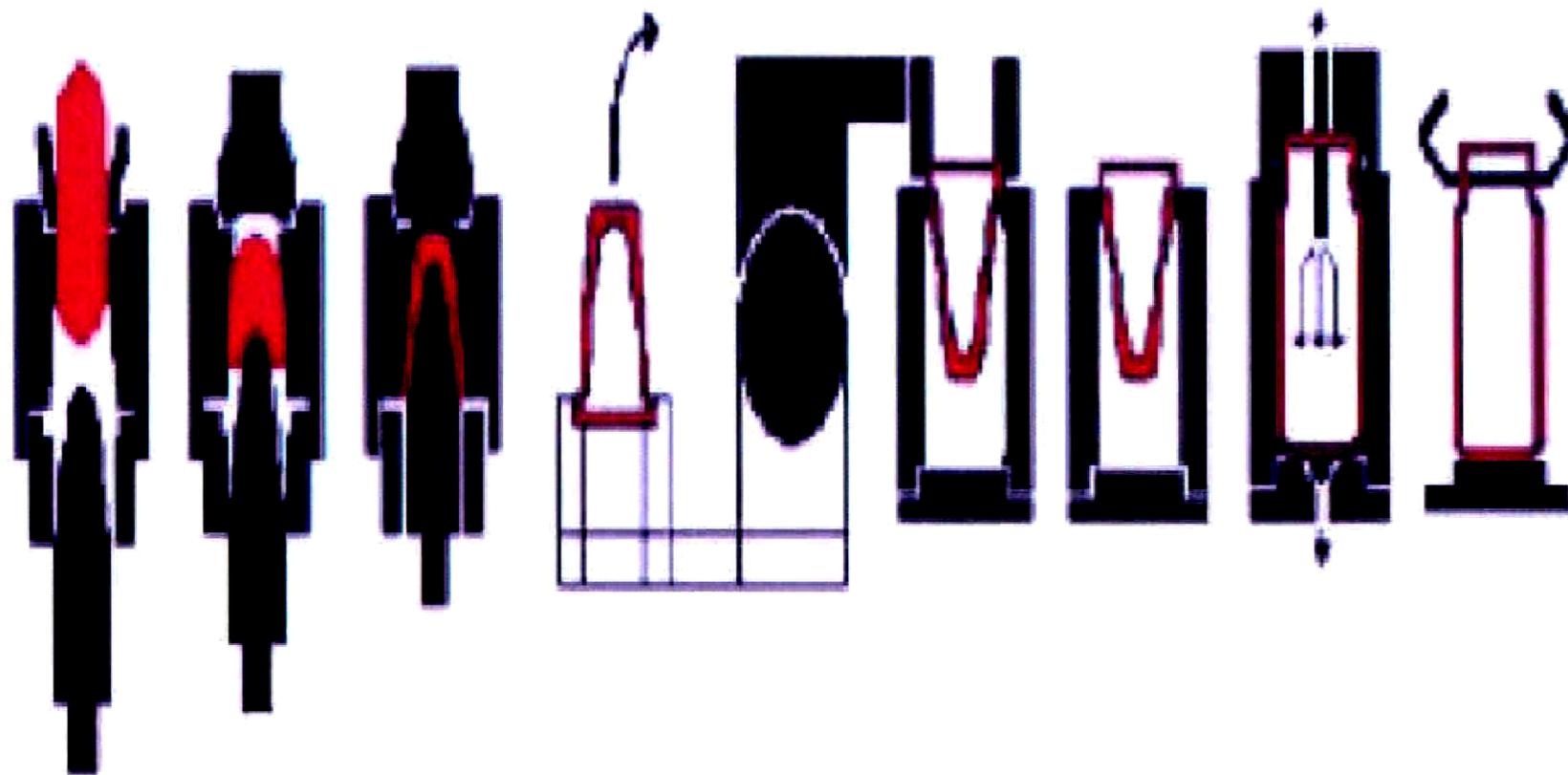
La colata in forme e stampi può essere anche automatica per uso industriale.

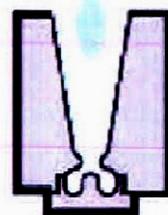
Dopo la formatura il vetro deve essere sempre ricotto e raffreddato lentamente per eliminare le tensioni interne che potrebbero portarlo alla completa rottura.

Tecniche di formatura: pressatura

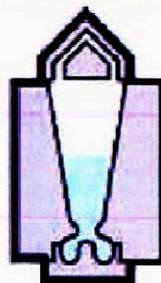
- Viscosità di formatura del fuso 200-400Pa*s, Pressione 0,5-0.8MPa, Rilascio dallo stampo a 10^5 - 10^8 Pa*s



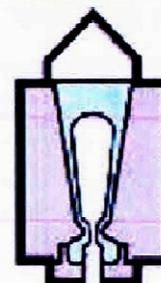




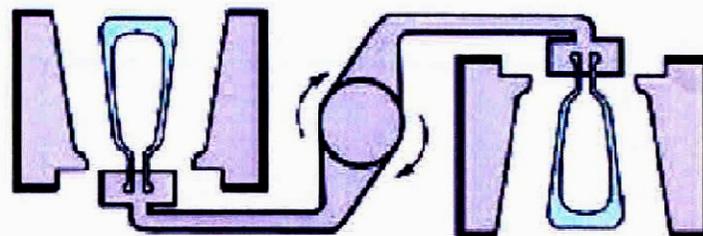
1. La goccia di vetro cade nello stampo abbozzatore



2. Formazione dell'imboccatura della bottiglia

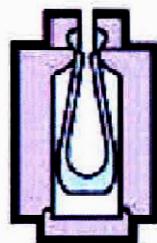


3. Soffiatura della forma preliminare (abbozzo)

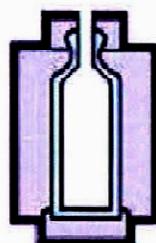


4. Apertura dello stampo abbozzatore

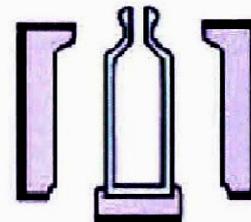
5. Trasferimento dell'abbozzo nello stampo finitore aperto



6. Posizionamento della testa soffiante



7. Soffiatura ad aria compressa e formazione definitiva della bottiglia



8. Apertura dello stampo ed estrazione della bottiglia finita



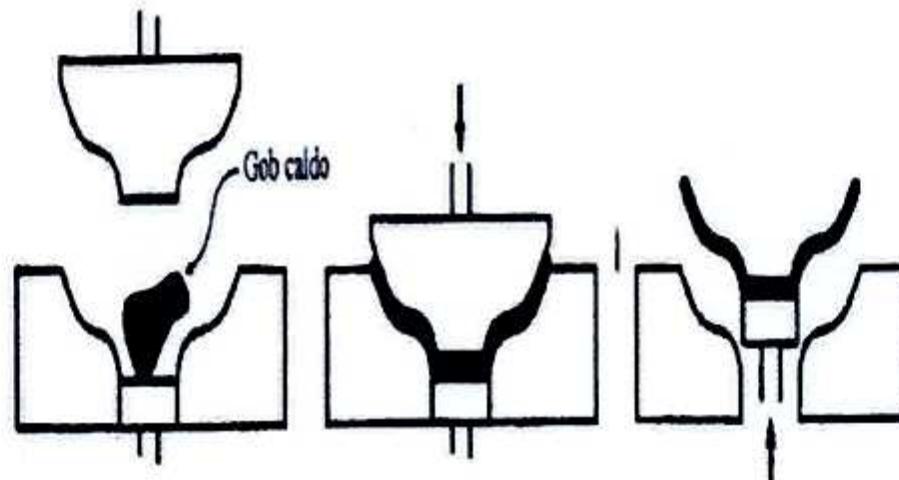
Una volta estratta, la bottiglia viene posizionata su un nastro trasportatore subendo un trattamento superficiale a caldo.



Le bottiglie ancora calde vengono poi fatte entrare in un forno di ricottura. Procedimento che serve per stabilizzare il vetro.

Il colaggio su centrifuga (centrifugal casting)

Il fuso viene colato in uno stampo ruotante. Per effetto della forza centrifuga il fuso risale per le pareti dello stampo producendo pareti a spessore uniforme



Impianto industriale per vetro cavo





Produzione industriale di bottiglie di vetro

VETRI SPECIALI

- **CRISTALLO**

Contiene il 30- 37% di ossido di Piombo che gli conferisce durezza, brillantezza, elevato indice di rifrazione, elevato peso specifico bassa temperatura di rammollimento e lavorabilità alla mola. Se l'ossido di Piombo è 24-30% si ha il mezzo cristallo con caratteristiche inferiori.

- **CRISTALLO DI BOEMIA**

Vetro sodico-calcio-potassico privo di impurità e con buona brillantezza per bicchieri e bottiglie da tavola. La sua bassa temperatura di fusione lo rende facilmente lavorabile.

- **VETRO D'OTTICA**

A elevata rifrangenza a bassa dispersione, sono classificati in crown al bario + calcio ($n = 1,52$). Flint al piombo (23-33% di ossido) ($n = 1,7$). La rifrangenza è misurabile dall'indice di rifrazione. La dispersione dal numero di Abbe. La fotocromaticità è fornita dal trattamento con alogenuri di argento.

- **VETRO DI QUARZO**

Il quarzo (Silice = SiO_2) fonde a 1713°C e raffreddando dà un vetro di quarzo molto trasparente a UV e IR, resistente a $T > 1000^\circ\text{C}$ ed inerte a quasi tutti gli agenti chimici. Per il suo bassissimo coefficiente di dilatazione termica non è soggetto allo shock termico. Si usa quindi per lampade UV e IR, nelle fibre ottiche, nei riscaldatori elettrici, etc. Poiché il vetro di quarzo rammollisce poco a temperatura elevata è di difficile lavorabilità.

- **VETRO AI BOROSILICATI**

È ben conosciuto come vetro PIREX per la vetreria di laboratorio. Per il bassissimo coefficiente di dilatazione termica va direttamente sulla fiamma. Ha buona resistenza chimica e buona brillantezza e luminosità. Viene prodotto mediante sostituzione degli ossidi alcalini con ossido di boro. Composizione base: Quarzo = SiO_2 : 80%; Borace $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$: 20%.

- **VETROCERAMICA**

Si realizza mediante una cristallizzazione pilotata dalla stato amorfo, inserendo nel vetro fuso dei centri di cristallizzazione (cristalliti) attorno ai quali durante il raffreddamento si ha la formazione e sviluppo dei cristalli.

- **FIBRE OTTICHE (mono bava)**

Singoli filamenti di vetro di silice composti da due strati concentrici denominati core (\varnothing 18 μm) e cladding (\varnothing 120 μm). Il core è quello interno di indice di rifrazione maggiore (1,7) perché alla silice viene addizionato tetracloruro di germanio. Il Cladding è quello esterno di indice di rifrazione inferiore (1,47) perché la silice è additivata con Borace. La fibra ottica è capace di condurre al suo interno la luce per chilometri. Le fibre ottiche trovano importanti applicazioni in telecomunicazione, diagnostica medica e illuminotecnica.

- **FIBRA DI VETRO (multi bava)**

Serve come componente di rinforzo per compositi a matrice di materia.

Denominazione delle lastre in base allo spessore

Denominazione	Spessore [mm]
Vetro semplice	1,5 ÷ 2
Vetro semidoppio	2,5 ÷ 3
Vetro doppio	3,5 ÷ 4
Mezzo cristallo	4 ÷ 6
Cristallo	6 ÷ 12

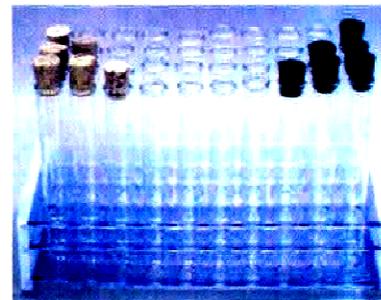
Il vero cristallo è quello al Piombo, levigato e lucidato meccanicamente dopo la ricottura. Essendo questa lavorazione molto costosa, è d'uso chiamare cristallo una lastra di vetro di alto spessore prodotta con processo Float.

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 nei silicati alcalini.
- ❑ L'espansione termica è ridotta ed i vetri possiedono buona resistenza agli shock termici e agli agenti 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 silice e una fase a gocce isolate ricca in boro e sodio

❑ Applicazioni

- ❑ Stoviglieria da forno
- ❑ Vetreria da laboratorio
- ❑ Bulbi per lampade
- ❑ Tubature



VETRO PYREX AI BOROSILICATI (Sostituzione di Na₂O con B₂O₃)

CONFRONTO DELLE CARATTERISTICHE

	VETRO STANDARD	VETRO PYREX
Densità (g/ml)	2,5	2,23
Coeff. Dil. Termica lineare (K ⁻¹)	9 x 10 ⁻⁶	3,3 x 10 ⁻⁶
Conduttività (N/m.K)	0,155	1,4
Res. a trazione N/mm ²	4	7
Punto di rammollimento °C	~ 800	825
Uso fino a °C	< 100	490*
Sopporta sbalzo termico di °C	< 50	130
Modulo di elasticità - KN/mm ²	73	64
Modulo di Poisson	0,23	0,2

*(garantito ≤ 300)

IMPIEGHI

- Vetreria da laboratorio chimico
- Vetreria da forno e cucina. Va direttamente sulla fiamma
- Lenti per ottica e telescopi
- Apparecchi per illuminazione
- Detto anche vetro di Jena o vetro di Schott

Vetri borati, fosfati, germanati

- ❑ **I vetri borati** contengono gruppi planari B_2O_3 come unità strutturali
- ❑ **I vetri fosfati** sono composti da unità tetraedriche PO_4 ma la connettività è differente dai vetri silicati essendo possibile il doppio legame $P=O$. Sono resistenti all'acido fluoridrico.
- ❑ **I vetri all'ossido di Germanio** hanno un più basso punto di fusione. Sistemi del tipo GeO_2-SiO_2 sono utilizzati per la produzione di guide d'onda

Definizione: indice di rifrazione

$$n = \frac{c}{v} \geq 1 \quad \frac{\text{velocità della luce nel vuoto}}{\text{velocità della luce nel mezzo}}$$

Legge di Snell: $n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2)$

Indice di rifrazione più grande \rightarrow traiettoria più vicina alla normale (e viceversa)

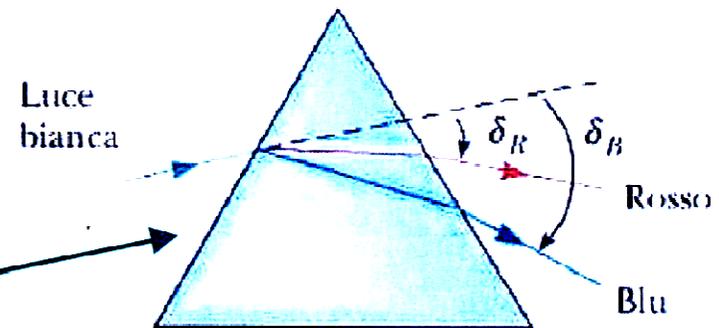
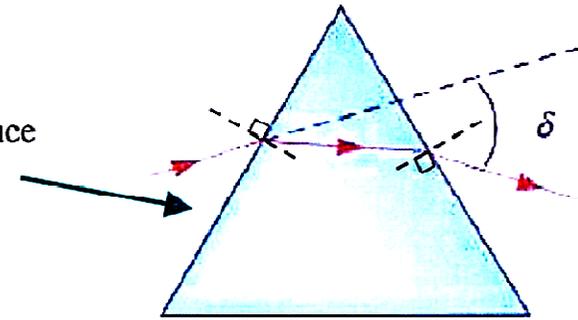
L'indice di rifrazione n può variare con la lunghezza d'onda: onde luminose di lunghezza d'onda maggiore hanno n minore e viceversa. Fenomeno della **dispersione**: un raggio di luce "bianca" (che contiene tutte le lunghezze d'onda nella regione visibile) viene separato nei vari raggi componenti (i colori)

Prisma di vetro che rifrange un raggio di luce monocromatica, e lo devia di un angolo δ

v sempre minore o uguale a c , la quale è la massima velocità possibile (relatività di Einstein)

n è una proprietà fondamentale dei mezzi materiali trasparenti (e più misurabile rispetto alla v !)

Esempi: vuoto $n = 1$; aria $n = 1.0003$; acqua $n = 1.33$, semiconduttori $n = 3.6$; eccetera

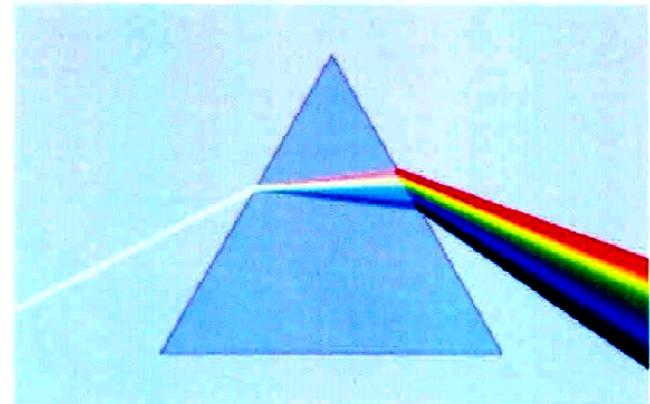


La componente "blu" della luce bianca viene deviata più della componente "rossa"

Indice di rifrazione

L'indice di rifrazione di un materiale è un parametro macroscopico, solitamente indicato col simbolo n , che rappresenta il fattore numerico indicante di quanto la velocità di propagazione di una radiazione elettromagnetica viene rallentata, rispetto alla sua velocità nel vuoto, quando questa attraversa un materiale. Se $IR = 1.5$ vuol dire che in quel vetro una particolare lunghezza d'onda si propaga a una velocità ridotta a $1 / 1.5 = 0.67$ rispetto a quella che ha nel vuoto.

Essendo funzione della lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica e della natura del materiale attraversato, la sua misura in condizioni controllate può essere usata per identificare il materiale stesso.



Indice di rifrazione dei materiali

MATERIALE	N_D^{20}
ACQUA	1,33
QUARZO	1,45
VETRO BOROSILICATO	1,47
VETRO COMUNE	1,5
VETRO CROWN	1,51
VETRO FLINT	1,73
PERICLASIO	1,74
CORINDONE	1,76
CRISTALLO AL PB	1,9
DIAMANTE	2,41
RUTILO	2,72

Vetri ad alto indice di rifrazione

Per ottenere un vetro ad alto indice di rifrazione, era abitudine introdurre nella sua composizione dell'ossido di piombo che aumentava notevolmente la densità del materiale (Flint).

Oggi per realizzare vetri ad alto indice per lenti monofocali, si sostituisce l'ossido di piombo con l'ossido di titanio, che permette di conservare un indice di rifrazione elevato diminuendo la densità del vetro (vetro al titanio); sono presenti anche altri elementi come niobio, lo zirconio, lo stronzio, che correggono le proprietà ottiche.

Per ottenere la gamma dei vetri per lenti multifocali, si utilizza dell'ossido di bario in sostituzione all'ossido di piombo (vetri al bario).

Numero di Abbe

Il **numero di Abbe** è un parametro che indica il **potere dispersivo** della sostanza presa in esame.

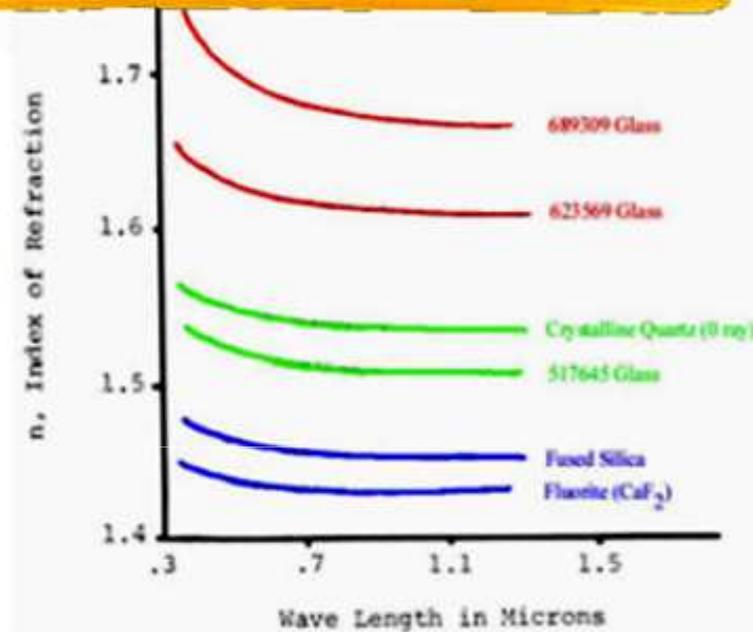
Viene generalmente definito come:

$$V = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$$

dove n_D , n_F e n_C sono gli **indici di rifrazione del materiale** alle lunghezze d'onda delle linee spettrali D-, F- e C- di Fraunhofer (589.2 nm(Na), 486.1 nm(H) e 656.3 nm(H)), rispettivamente.

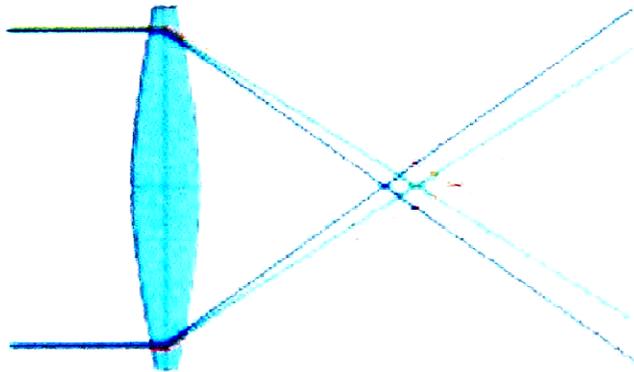
La dispersione ed il numero di Abbe

- ❑ L'indice di rifrazione non è costante ma varia con la lunghezza d'onda. Questa caratteristica produce la dispersione.
- ❑ Per caratterizzare la dispersione si introduce il numero di ABBE:
- ❑ $V = (n_d - 1) / (n_F - n_C)$
- ❑ dove n_d , n_F and n_C sono gli indici di rifrazione alle linee spettrali di Fraunhofer d-, F- and C- (587.6 nm, 486.1 nm and 656.3 nm respectively)

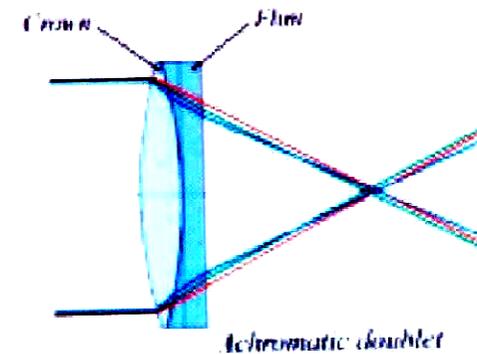


Numero di Abbe

Generalmente **più alto è l'indice di rifrazione** di un vetro, più basso è il numero di Abbe; questa caratteristica influenza la dispersione cromatica.

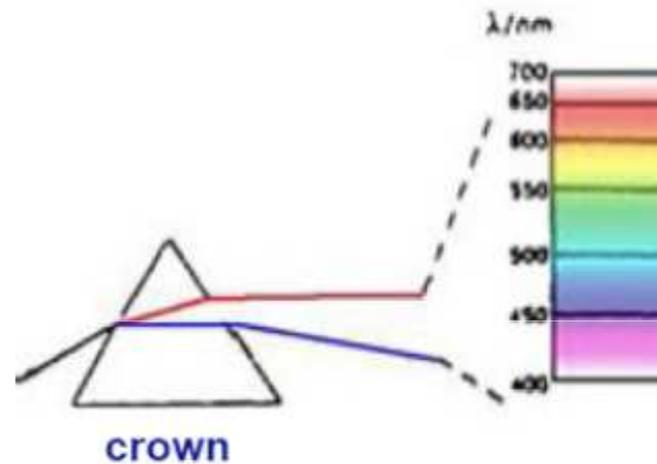


Schema dell'aberrazione cromatica

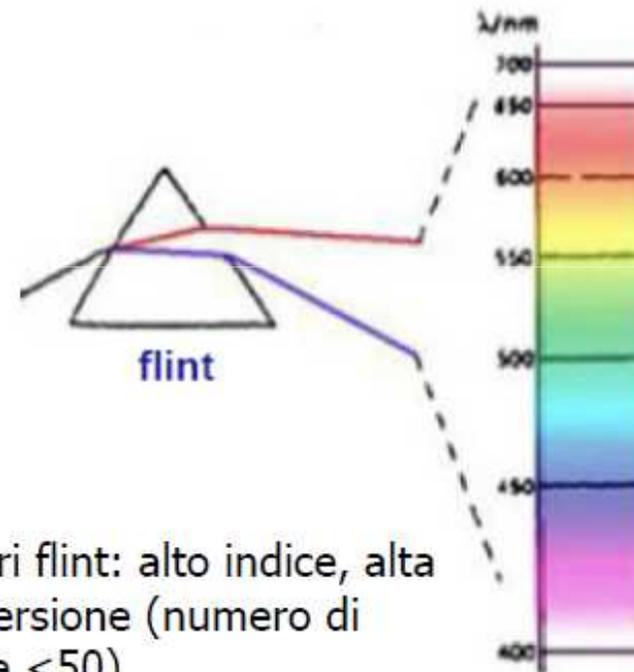


lente di correzione

Vetri crown e vetri flint



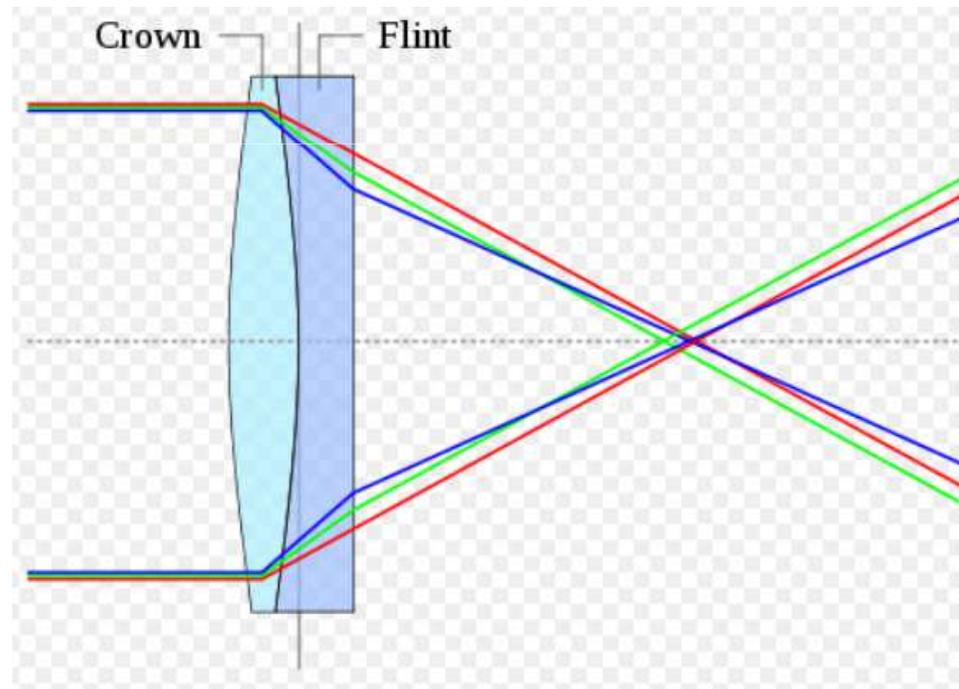
- Vetri crown: basso indice, bassa dispersione (numero di Abbe >50)



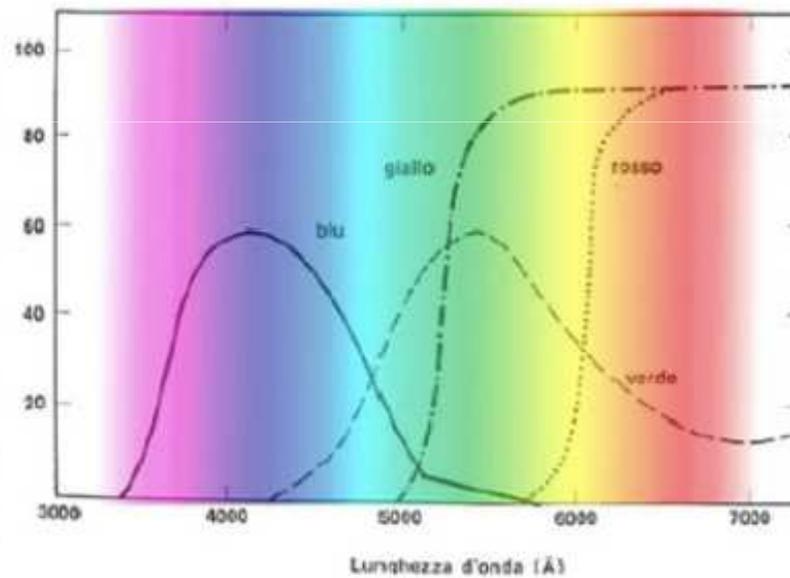
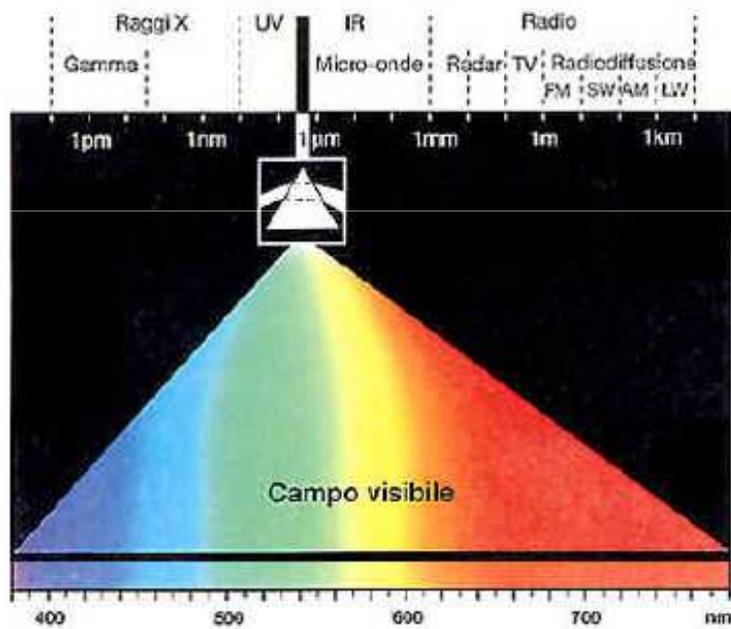
- Vetri flint: alto indice, alta dispersione (numero di Abbe <50)

DOPPIETTO ACROMATICO

Per avere una lente con bassa aberrazione cromatica si accoppia una lente convessa Crown con una concava Flint:



Colori e campo visibile



VETRO CERAMICA

Vetri con cristallizzazione, “controllata” mediante l’aggiunta allo stato sovrافuso di “centri di nucleazione” dei cristalli. La cristallinità che si raggiunge varia dal 30 al 90%. Sono caratterizzati da coefficiente di dilatazione termica molto basso o nullo ($< 1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$).

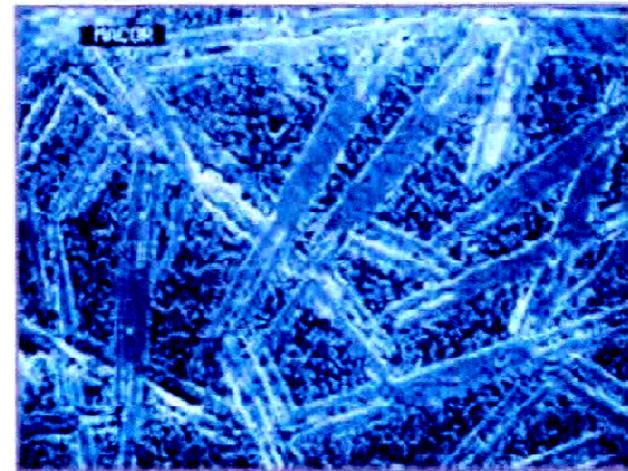
Per es. sistema LAS = $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2$ utilizzato per piani di cottura.

Sistema MAS = $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2$ per pannelli protettivi dei caminetti.

Sistema ZAS = $\text{ZnO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot n\text{SiO}_2$ per ottica.

Lavorabilità dei vetroceramici

- La lavorabilità è alle macchine utensili

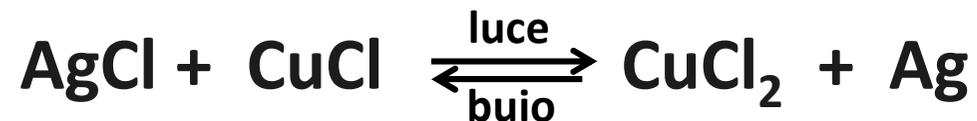


Lenti fotocromatiche

Le lenti fotocromatiche sono lenti che scuriscono quando esposte alla radiazione UV.

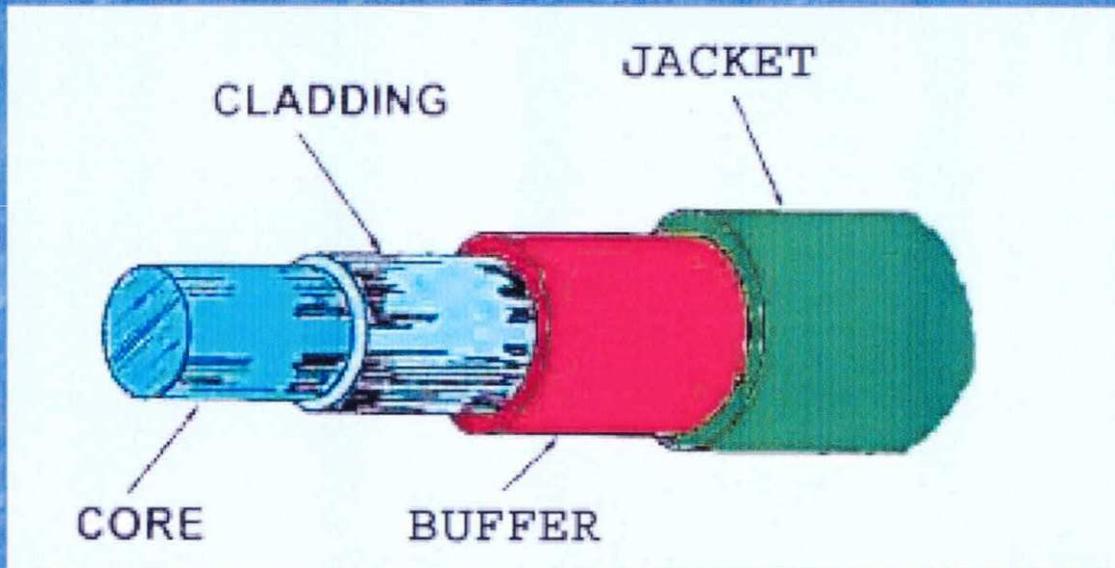
Quando la radiazione UV viene rimossa (ad esempio entrando in un edificio) le lenti gradualmente ritornano allo stato chiaro. Le lenti fotocromatiche possono essere in vetro (sostanze fotocromatiche inorganiche) o plastica (sostanze fotocromatiche organiche).

Reazione base:



Struttura di una fibra

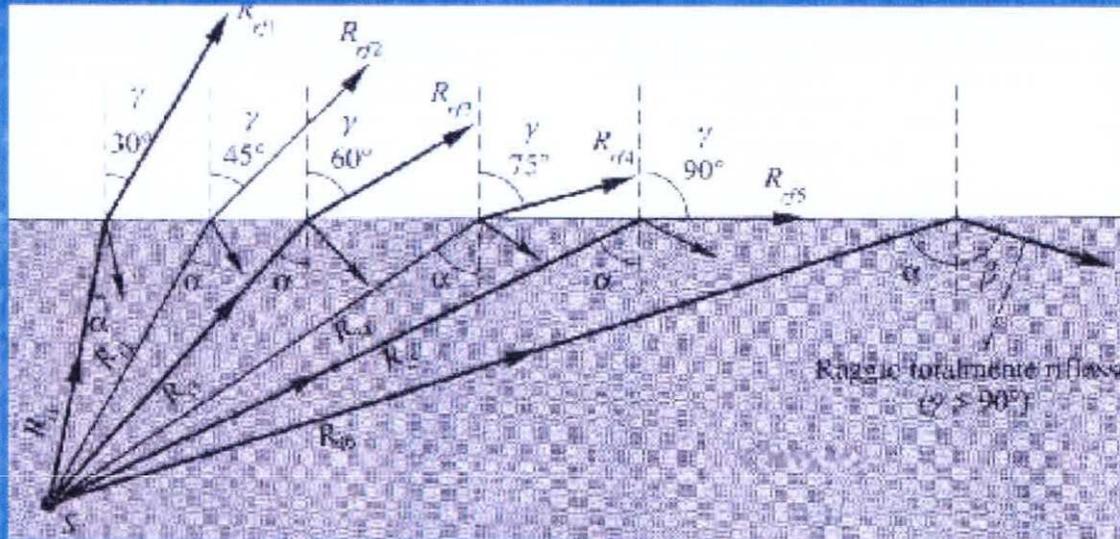
I costituenti di una fibra ottica sono i seguenti:



Core e cladding sono costituite da SiO_2
Buffer e Jacket da materiale plastico

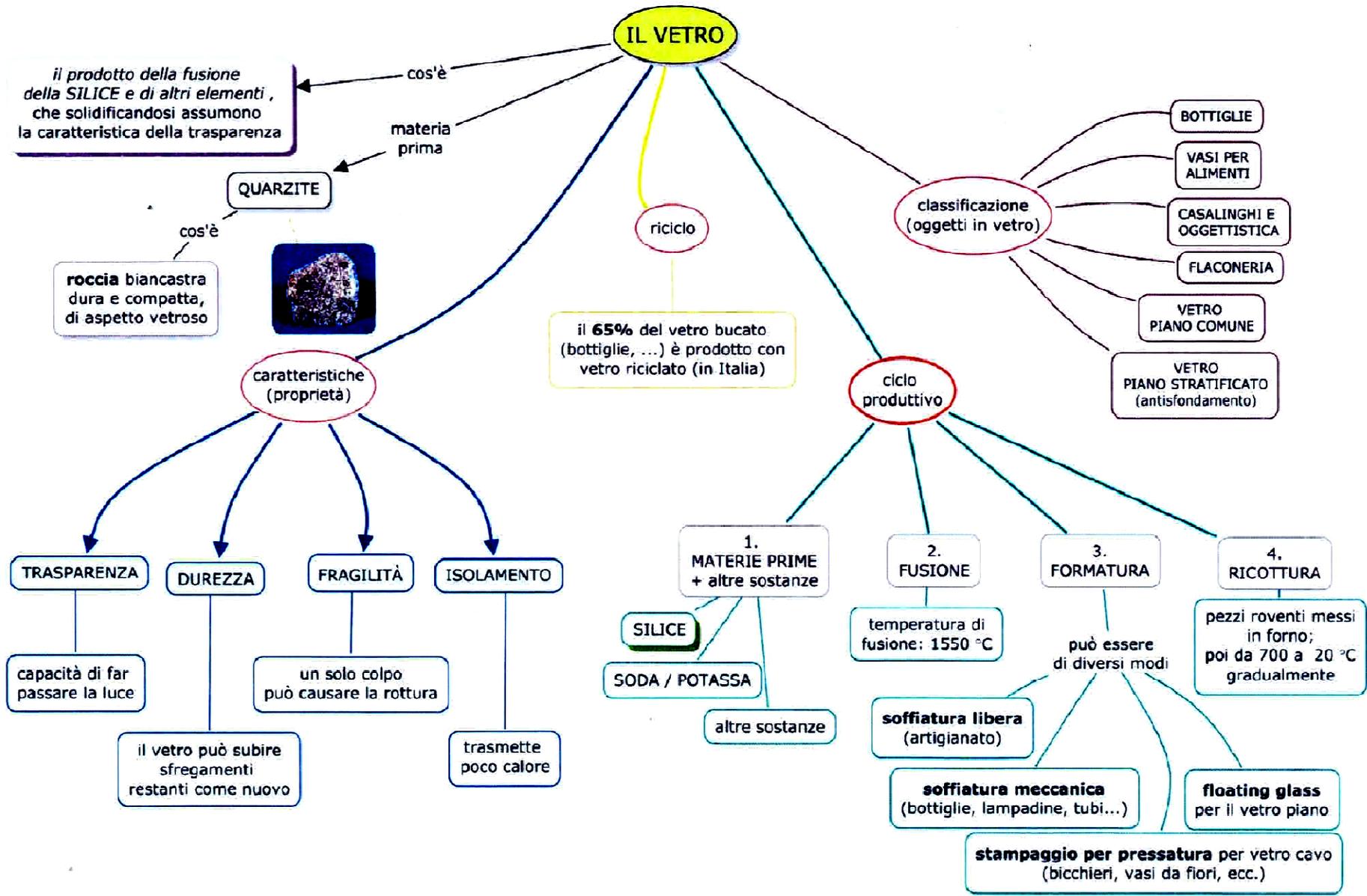
- Il **CORE** e il **CLADDING** sono i costituenti fondamentali di una fibra ed hanno indice di rifrazione differente:
 n_1 (core) > n_2 (cladding)
 $n_1=1,5$ $n_2=1,475$ tipicamente
- Il **BUFFER** ha la funzione di proteggere la fibra da agenti esterni ed irrobustirla meccanicamente
- Il **JACKET** evita fenomeni di microbending e porta ad un aumento del coefficiente di attenuazione

Funzionamento di una fibra



Esempio del fenomeno di riflessione e rifrazione per diversi raggi di incidenza provenienti da una sorgente S

La trasmissione della luce attraverso una fibra è quindi basata sul fenomeno della riflessione totale interna che si presenta quando la luce incide obliquamente sull'interfaccia tra due mezzi di diverso indice di rifrazione, con un angolo più grande dell'angolo critico



Bibliografia

- Amedeo Benedetti, "Vetro, terracotta e ceramica", in *Bibliografia Artigianato. La manualistica artigiana del Novecento: pubblicazioni su arti e mestieri in Italia dall'Unità ad oggi*, Genova, Erga, 2004, pp. 350–367. ISBN 88-8163-358-2
- Cesare Brisi, *Chimica applicata*, 3^a ed., Torino, Levrotto & Bella, 1997, ISBN 88-8218-016-6.
- William F. Smith, *Scienza e tecnologia dei materiali*, 2^a ed., McGraw-Hill, 1995, ISBN 88-386-0709-5.
- *Enciclopedia Universale UNEDI*, vol. XIV, Milano, Scode, 1980, pp. 364-2365.
- Manfred Hegger, Volker Auch-Schwelk, Matthias Fuchs, Thorsten Rosenkranz, *Atlante dei materiali*, Utet Giuridica, 2006, ISBN 88-598-0041-2.
- Christian Schittich, L. Trentini, *Atlante del vetro*, UTET, 1998, ISBN 88-02-05529-7.
- Joan Crous, Giacomo Crous, Giovanna Bubbico, *Vetro. Manuale completo*, Firenze, Giunti Editore, 2004, ISBN 88-440-2746-1.
- Daniela Stiaffini, *Il vetro nel Medioevo: tecniche, strutture, manufatti*, Fratelli Palombi, 1999, ISBN 88-7621-519-0.
- Chris Van Uffelen, *Vetro*, Motta Architettura, 2009, ISBN 88-6116-100-6.
- (EN) E. J. Donth. *The Glass Transition: Relaxation Dynamics in Liquids and Disordered Materials*. Heidelberg, Springer, 2001. ISBN 978-3-540-41801-6
- **Saint Gobain Spa – Manuale Tecnico del Vetro - 4^a Ed. 1986**
- *Il Vetro* – da Wikipedia, l'enciclopedia libera

Sitografia

- Prof. A. Licciulli – Unile – *Vetri Speciali*
- Assovetro – *Vetro Piano*
- Assovetro – *Dati Annuali*
- Good Fellow – *Vetro Borosilicato*