

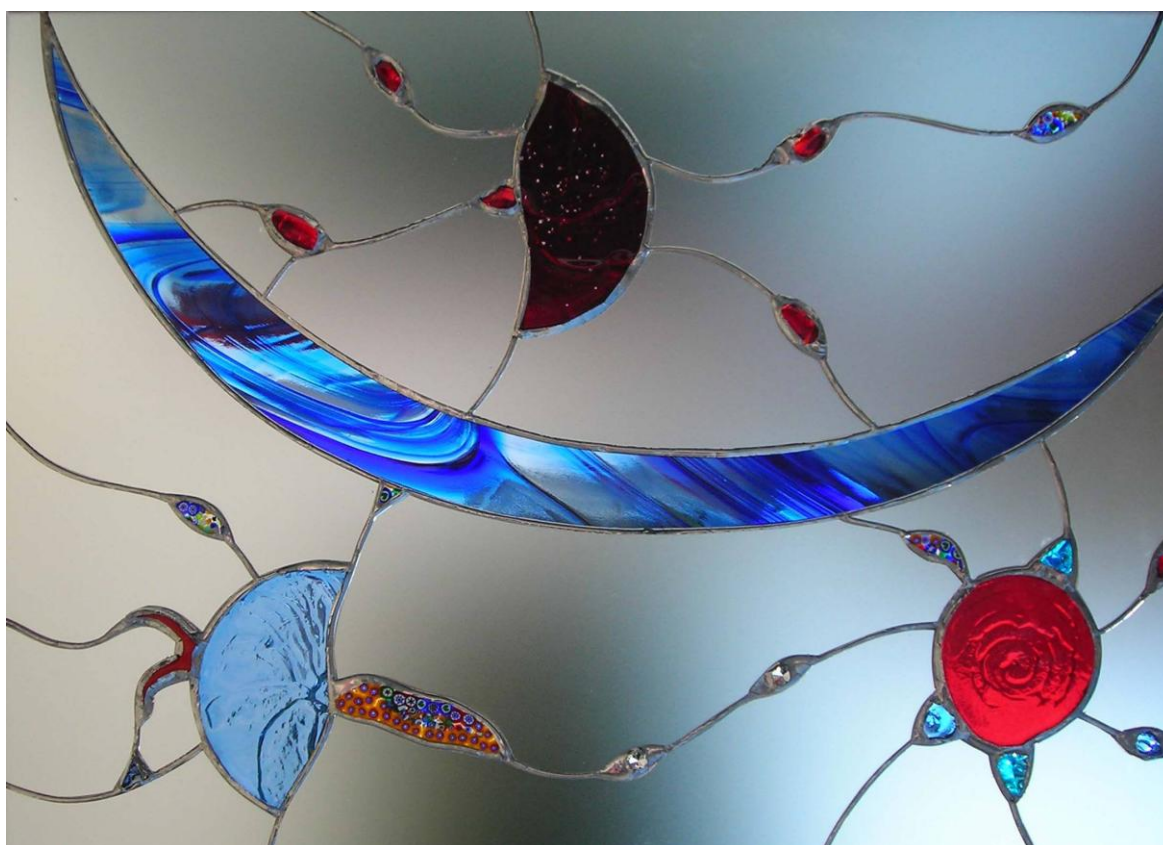


Provincia Autonoma di Trento
Agenzia provinciale per la protezione dell'ambiente



IL VETRO

Caratteristiche, tipologie, tecnologie di produzione,
migliori tecniche disponibili per il controllo degli impatti



a cura di
dott. ing. Maurizio Tava

UMSe di Supporto tecnico specialistico in materia ambientale

*Seconda edizione
2018*

IL VETRO

1.	BREVISSIMA STORIA DEL VETRO	2
2.	CARATTERISTICHE DEL VETRO - COS'È IL VETRO	5
2.1	DEFINIZIONE	5
2.2	NATURA	5
2.3	I PRINCIPALI COMPONENTI DEL VETRO	6
2.4	MATERIE PRIME DEL VETRO	7
3.	FUSIONE DEL VETRO	10
3.1	FORNI FUSORI	10
3.2	FORNI DI RICOTTURA	11
4.	TIPI DI VETRO	12
4.1	QUARZO FUSO	12
4.2	SILICATO SODICO	13
4.3	VETRO SILICO-SODICO-CALCICO	13
4.4	VETRI BOROSILICATI	13
4.5	VETRI AL PIOMBO	14
4.6	VETRO PER OTTICA	14
4.7	VETRI SPECIALI	14
4.8	INVETRIATURE O SMALTI	14
5.	VETRO ARTIGIANALE ED ARTISTICO	15
5.1	TECNICHE DI PRODUZIONE E LAVORAZIONE	15
6.	VETRO INDUSTRIALE	22
6.1	VETRO PIANO	23
6.2	VETRO CAVO	30
6.3	TUBO DI VETRO	36
6.4	FIBRE DI VETRO	38
6.5	VETRI SPECIALI	41
7.	VETRO E AMBIENTE	43
7.1	RACCOLTA E RICICLO DEL VETRO	44
8.	LE M.T.D. NEL SETTORE VETRARIO – (B.A.T.)	45
8.1	GENERALITÀ DEL SETTORE VETRARIO	45
8.2	LE TECNOLOGIE IMPIEGATE NEL SETTORE VETRO CAVO	47
8.3	MIGLIORI TECNICHE DISPONIBILI PER IL CONTENIMENTO DEGLI INQUINANTI	52
9.	VALUTAZIONE SULL'APPLICABILITÀ DELLE BAT	57
9.1	DEFINIZIONE DELLA MIGLIORE TECNICA DISPONIBILE	57
9.2	LE MIGLIORI TECNICHE DISPONIBILI ED APPLICABILI AL SETTORE DEL VETRO CAVO	57
9.3	LIVELLI DI EMISSIONE ASSOCIATI ALLE BAT PER IL SETTORE DEL VETRO CAVO	60
	BIBLIOGRAFIA	64

IL VETRO

1. BREVISSIMA STORIA DEL VETRO

Secondo la leggenda riportata da Plinio il Vecchio nella sua *Naturalis Historia*, la scoperta del vetro sarebbe da attribuire al caso e ad alcuni mercanti fenici con una datazione riferibile al 2000 a.C..

Fama est, adpulsam nave mercatorum nitri, quum sparsi per litus epulas parantes, nec esset cortinis adtollendis lapidum occasio, glebas nitri e nave subdidisse.

Quibus accensis permixta arena litoris, translucens novi liquoris fluxisse rivus, et hanc fuisse originem vitri.

Si narra di una nave di mercanti di salnitro approdata (sulle coste fenicie allo sbocco del fiume Belo); quando i mercanti, sparsi sulla spiaggia preparando da mangiare, si accorsero che non c'era modo di appoggiare le pentole su pietre, presero dalla nave alcuni blocchi di salnitro.

Da questi, accesi e mescolati alla sabbia della spiaggia, cominciarono a scorrere rivoli di un liquido trasparente sconosciuto, e questa sarebbe stata l'origine del vetro.

In realtà, alcuni reperti archeologici sembrano smentire la tradizione ed individuare il momento della sua comparsa in un periodo precedente, tra **3500 e 3000 a.C.** in Asia Minore, forse in connessione con le prime esperienze di metallurgia, per poi arrivare in Egitto nel II millennio a.C..

Del 2000 a.C., attribuito alla XII dinastia egiziana, pare sia il più antico manufatto giunto a noi e conservato nell'*Antikensammlung Berlin* (Museo dell'Antiquariato di Berlino): si tratta di un frammento di canna vitrea a mosaico, molto simile alla murrina veneziana.



Il vetro egizio

Sarebbero poi stati però proprio mercanti e navigatori Fenici (dal VII - VI secolo a.C.) a diffondere i primi oggetti e le tecniche di lavorazione del vetro, dalle coste fenicie e dall'Asia Minore in tutto il bacino del Mediterraneo, dando vita ad una realtà artigianale specializzata in varie tecniche come la **rimodellazione da nuclei preformati**, che permette di realizzare manufatti monocromatici, o la cosiddetta **lavorazione a mosaico**, con il fissaggio di tessere di vetro alla superficie dell'oggetto.

Ancorché non fossero stati dunque gli inventori del vetro, i Fenici, per la maestria con cui seppero applicare la tecnica vetraria, resero quest'arte tanto famosa ed apprezzata dai contemporanei da creare la leggenda di esserne gli artefici.

È poi nel periodo ellenistico che la tecnica vetraria fiorisce e si sviluppa completamente, anche se gli storici localizzano in territorio siro-palestinese l'origine della cosiddetta tecnica di **soffiatura**, intorno al **50 a.C.**

Un maggior perfezionamento delle tecniche di lavorazione più comuni (a **nucleo friabile** o a **verga**, a **colatura in stampi aperti o chiusi**, a **soffiatura libera o in matrici** di varia forma) è poi raggiunto dall'industria romana, che sviluppò anche la tecnica del vetro bicolore.



Il vetro romano

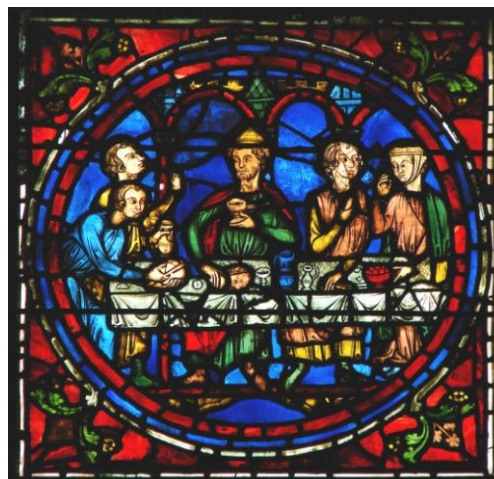
Inizia in questo periodo anche una **paleo-produzione industriale di lastre trasparenti** da utilizzare per schermare le finestre. Si ottenevano mediante la tecnica del **vetro colato**, versando il vetro fuso su una piastra e tirandone le estremità con pinze o altri attrezzi fino a riempire degli stampi; i vetri realizzati con tale sistema sono facilmente riconoscibili per l'irregolarità dello spessore, sottile al centro ma più spesso sui bordi.

Dopo un periodo buio in corrispondenza dell'Alto Medioevo, che non ha lasciato significative tracce nel settore, soltanto attorno al 450, con il regno dei Franchi, appare un nuovo stile nella lavorazione del vetro soffiato, detto franco, merovingio o teutonico, con decorazioni meno elaborate rispetto a quelle romane.

Tra il 500 ed il 600 fu fatto un altro importante passo nella storia del vetro, inventando un nuovo procedimento per fare il vetro piano per soffiaggio di una sfera e suo successivo allargamento per rotazione in forno (*sistema dei dischi*) e più tardi scalottando ed aprendo in piano una sfera allungata (*sistema del cilindro*). Sino al XIX secolo la maggior parte del vetro piano fu realizzato con questo sistema.

Il maggior impulso alla fabbricazione di lastre si ha a partire dal 700 ed ancor più diffusamente verso il **1000**, con l'ampia utilizzazione di **vetrate policrome**, legate con il piombo, in connessione con la costruzione delle grandi cattedrali gotiche in Europa.

Nel frattempo nell'area dell'Impero romano d'Oriente, che per oltre 500 anni dominerà il mercato vetraio mondiale, si sviluppa e si specializza la lavorazione di matrice bizantina basata sulla tecnica a mosaico: piccole tessere fissate nel cemento decorano riccamente cupole e pavimenti di chiese, con rappresentazioni sacre su fondi dai toni dorati.



*Vetrata policroma (XIII sec)
Cattedrale di Chartres (F)*



*Mosaico nella Basilica di Santa Sofia– Istanbul
Maria Vergine con bambino tra Giovanni II Comneno e l'imperatrice Irene (databile 1118)*



Particolare

Invece in Cina il vetro aveva ancora un valore di materiale semiprezioso da impiegare quasi esclusivamente per la lavorazione di perline, amuleti e ornamenti funebri, mentre in India e Giappone era quasi sconosciuto.

Alla caduta di Bisanzio (1453) l'industria e l'arte del vetro erano già ben sviluppate a Venezia, dove, nel 1271 fu emanata la *Mariegola* (o Regola Madre), uno dei primi capitolari che regolavano l'attività dei vetrai veneziani.

Per l'elevato rischio di incendi, e fors'anche per facilitare una rigida sorveglianza ed evitare che i segreti dell'arte vetraria potessero essere esportati, nel 1291 un decreto del Maggior Consiglio obbligò il trasferimento di botteghe e laboratori vetrai sull'isola di Murano. Da quel momento l'arte vetraria diviene l'attività quasi esclusiva dei Muranesi che fondano la *corporazione dei phiolieri e dei verieri de Muran* (le *firole* o *fiale* erano le bottiglie muranesi, con corpo panciuto e collo molto lungo), dando origine a vere e proprie dinastie di maestri vetrai, alcune delle quali tuttora attive.

Il polo veneziano tra la fine del Medioevo e l'inizio del Rinascimento raggiunge livelli qualitativi dei materiali e delle tecniche produttive tali da consentire la realizzazione di oggetti d'incantevole delicatezza e stile, conquistando notorietà e prestigio internazionale per le sue inimitabili creazioni.

Verso la metà del 1400 la vetreria muranese conobbe una svolta epocale con la messa a punto da parte di **Angelo Barovier** di un nuovo tipo di vetro estremamente limpido e così simile per trasparenza al cristallo che lui stesso chiamò *vetro cristallino* o *cristallo veneziano*.



Vetreria muranese di antica fattura

Sul fronte industriale nel 1665, all'interno del programma di rilancio economico francese voluto dal Re Sole Luigi XIV e da J.B. Colbert, vennero concessi alla "*Manufacture Royale des Glaces*" i privilegi per la fabbricazione del vetro colato, dando origine alla SAINT GOBAIN, che in pochi anni divenne il leader nella lavorazione del vetro e la prima produttrice europea di vetro piano.

Nel 1700 la **SAINT-GOBAIN** mette a punto il metodo per la produzione di grandi lastre di vetro colato su tavoli, steso con rulli e quindi lustrato in superficie. Tale sistema, con successivi perfezionamenti, caratterizzerà per quasi tre secoli la produzione del Gruppo Saint Gobain.



*Il vecchio logo SAINT GOBAIN
Il ponte stilizzato è quello di Pont-à-Mousson*

Solo nei primi anni del 1900 inizia la **produzione industriale continua**, prima con il sistema di **colata continua fra rulli**, poi con il **vetro tirato** ed infine dal 1965 con la fabbricazione nello stabilimento di Pisa del vetro piano con il metodo a galleggiamento su stagno fuso (**sistema Float-Glass**) brevettato nel 1959 da sir Alastair Pilkington.

Da qui in poi le tecniche si susseguono: dopo il vetro colato, il sistema dei dischi, quello del cilindro, la colatura tra rulli e, nel **1900**, con l'inizio della **produzione industriale continua**, prima il vetro tirato e poi, dalla fine degli anni '60, la tecnica *Float* di Sir Alastair Pilkington, che ha ormai completamente soppiantato le altre tecnologie nella fabbricazione del vetro piano.



Lastre di vetro piano

2. CARATTERISTICHE DEL VETRO - COS'È IL VETRO

2.1 DEFINIZIONE

Da un punto di vista chimico, con il termine **vetro** ci si riferisce a materiali ottenuti tramite la solidificazione di un liquido, non accompagnata da cristallizzazione.

Il vetro è quindi un **solido amorfo**, assimilabile ad un liquido sottoraffreddato ad elevatissima viscosità, ottenuto per fusione di minerali cristallini.

Nella realtà solo alcuni materiali, che hanno velocità di cristallizzazione molto lenta, hanno la possibilità di solidificare sotto forma di vetro, e fra questi:

- ossido di silicio (SiO_2),
- anidride borica (B_2O_3),
- diossido di germanio (GeO_2),
- anidride fosforica (P_2O_5),
- anidride arsenica (As_2O_5).



In senso più restrittivo nel linguaggio comune e nel mondo industriale con il termine “**vetro**” vengono indicati soltanto i *vetri silicei*, costituiti prevalentemente da **ossido di silicio** con l'aggiunta di altre sostanze che conferiscono infinite colorazioni e particolari proprietà chimico-fisiche che li rende idonei a svariati impieghi:

- materiali trasparenti per l'edilizia (pareti, tegole, finestre),
- contenitori (bottiglie, bicchieri, vasi),
- elementi decorativi (lampadari, oggetti d'arte),
- fibre e filati.

Ialurgia è il nome con cui si indicano arte e tecnica di fabbricazione e di lavorazione del vetro.

2.2 NATURA

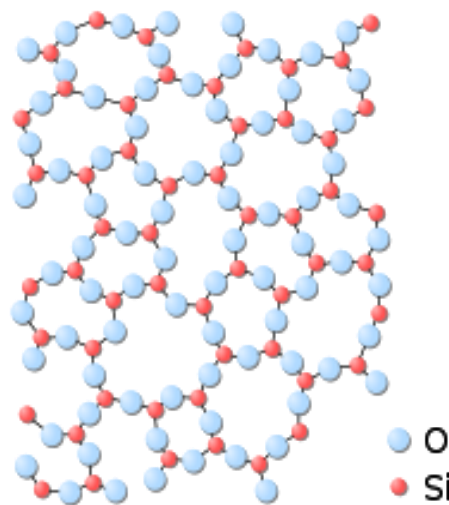
Le principali ed eccezionali caratteristiche intrinseche del vetro sono:

- trasparenza,
- compattezza, durezza e omogeneità strutturale,
- inerzia chimica e biologica,
- impermeabilità ai liquidi, ai gas, ai vapori,
- impermeabilità ai microrganismi,
- inalterabilità nel tempo,
- sterilizzabilità,
- perfetta compatibilità ecologica (riciclabilità).

Tali caratteristiche fanno di questa sostanza artificiale, interamente costituita da sostanze naturali, un materiale estremamente versatile, utilizzato in molti settori.


Alcune caratteristiche chimiche e fisiche - come trasparenza, colorazione, fragilità - possono essere influenzate, esaltate e corrette attraverso la composizione della miscela vetrificabile, il controllo della *storia termica* (durata e intensità della fusione, durata e curva termica del raffreddamento), nonché mediate trattamenti successivi.

Nella seguente scheda sono riportate le principali caratteristiche e proprietà del vetro comune.



Struttura del vetro siliceo.

Si noti l'assenza di ordine a lungo raggio

Caratteristiche generali	
Composizione	Diossido di silicio (SiO ₂) ed altri ossidi
Aspetto	trasparente
Stato di aggregazione (in c.s.)	solido (liquido sottoraffreddato)
Cristallinità	amorfo
Proprietà chimico-fisiche	
Densità (in c.s.)	medio 2,5 (g/cm ³) (2,2÷6,3)
Indice di rifrazione	1,458÷1,86
Capacità termica c _{p,m} ⁰	795 (J·kg ⁻¹ K ⁻¹)
Coefficiente Dilatazione termica lineare	30÷90 10 ⁻⁷ (K ⁻¹)
Conduktività termica	0,00155÷0,0030 (W/m·K)
Proprietà meccaniche	
Resistenza a trazione	4×10 ⁶ (vetro ricotto) (kgf/m ²)
Resistenza a compressione	1 GPa (kgf/m ²)
Resistenza a flessione	40÷200 MPa (kgf/m ²)
Modulo di elasticità longitudinale	37,67÷99,14 (GPa)
Modulo di comprimibilità	35÷55 (GPa)
Modulo di elasticità tangenziale	14,86÷38,81 (GPa)
Durezza Vickers	4,59÷5,27 kN/mm ²
Durezza Mohs	5÷7
Durezza Knoop	382÷572 (HK ₂₀₀) (kgf/m ²)
Codice di riciclaggio	
	# 70-79 GL
	70 trasparente 71 verde 72 ambra 73-79 altri materiali in vetro

2.3 I PRINCIPALI COMPONENTI DEL VETRO

Il vetro è composto da una miscela omogenea di ossidi, in proporzioni variabili, distinti in

- **formatori** del reticolo vetroso,
- **modificatori** del reticolo vetroso.

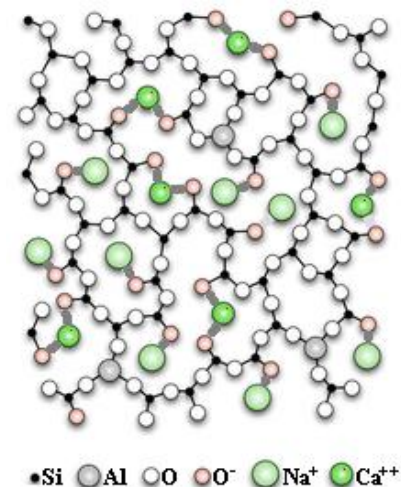
I principali *formatori* di reticolo (per questo detti anche vetrificanti) sono la *silice* (SiO₂) e l'*anidride borica* (B₂O₃), ma anche alcuni altri ossidi tri- o tetravalenti (di *fosforo*, *germanio*, *arsenico*, ecc.) hanno queste caratteristiche.

I *modificatori* di reticolo si distinguono in

- **fondenti** (ossidi alcalini, principalmente di Na e K),
- **stabilizzanti** (ossidi alcalino-terrosi di Ca, Mg, Ba, ...).

Gli ossidi di alcuni elementi come il *piombo* possono essere sia *formatori* che *modificatori* del reticolo.

I vetri silicatici, i più numerosi, sono costituiti da un reticolo nel quale atomi di *silicio* e di *ossigeno* sono legati tra loro da forti legami chimici covalenti. Altri elementi interrompono la continuità del reticolo (per questo sono detti modificatori) creando legami di tipo ionico.



Disegno schematico del reticolo

2.4 MATERIE PRIME DEL VETRO

Il vetro si ottiene per fusione ad alta temperatura di una miscela omogenea di minerali (miscela vetrificabile), mescolati in opportune proporzioni, e di rottame di vetro.

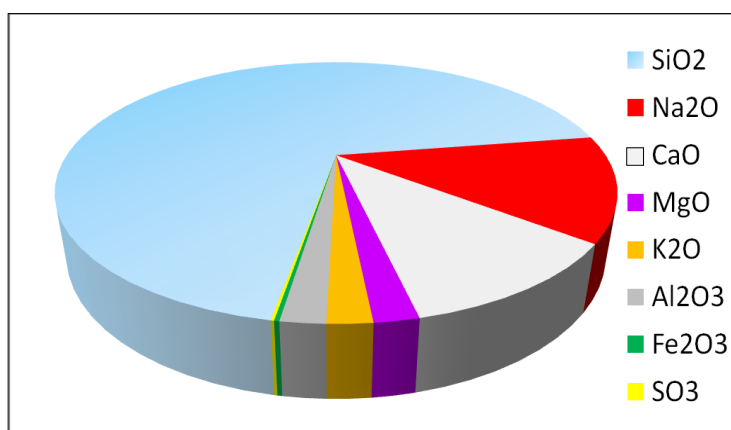
Da 100 parti di miscela vetrificabile si ottengono 83 parti di vetro e 17 parti vengono perse per volatilizzazione (soprattutto CO_2).

Nella tabella e nella figura è riportata la composizione tipica del **vetro comune** così ricavato.

Vetri comuni:

Intervalli di composizione tipici

Componente	% min	% max
SiO_2	68	75
Na_2O	10	16
K_2O	0	4
CaO	9	14
MgO	0	4
Al_2O_3	0	4
Fe_2O_3	0	0,45
SO_3	0	0,3



Tutti i componenti della miscela sono in polvere, né troppo fine (per evitare spolverio), né troppo grossolana (per favorirne la fusione); oltre alla granulometria è importante l'omogeneità della miscela e l'aggiunta di piccole quantità di acqua (2 – 4%).

Miscela vetrificabile

Vetrificante

È la materia prima che costituisce la struttura base del vetro.

La silice (SiO_2 , *biossido di silicio*) è il più comune formatore del reticolo vetroso ed è quindi la più importante materia prima per la produzione del vetro comune.

Circa metà della crosta terrestre è formata da minerali di silice (silicati e quarzo), il maggior costituente di rocce e sabbie. Tuttavia la silice naturale non ha, in generale, le caratteristiche necessarie per la produzione del vetro, sia perché forma dei minerali complessi con altri ossidi (come ad esempio nelle argille e nei feldspati con l'*allumina* Al_2O_3), sia perché contiene degli elementi come il *ferro* che, anche in piccola quantità, danno al vetro colorazioni indesiderate.

Dunque per le diverse applicazioni, come nel caso di vetro per l'ottica, le sabbie naturali provenienti da giacimenti di quarzo debbono normalmente essere ulteriormente purificate con speciali trattamenti.

Fondenti

Hanno la funzione di facilitare il passaggio del vetrificante allo stato liquido durante la fusione.

I fondenti vengono aggiunti al quarzo per abbassarne la temperatura di fusione (circa 1700°C).

Generalmente viene impiegato l'*ossido di sodio* in forma di *soda* o *carbonato di sodio* (Na_2CO_3) ovvero di *nitrato di sodio* (NaNO_2). La *soda* a circa 800°C si decompone in *anidride carbonica*, che si libera in forma di gas, ed *ossido di sodio*, che reagisce con la silice trasformandola in *silicato di sodio*, che fonde a più bassa temperatura.

Allo stesso modo si comporta la *potassa* o *carbonato di potassio* (K_2CO_3).

La *soda* e la *potassa* hanno inoltre la proprietà di allungare l'intervallo di temperatura entro il quale il vetro solidifica (intervallo di lavorazione), rendendo, come si dice in gergo, il vetro più *lungo*.

Attualmente si impiegano prevalentemente fondenti prodotti industrialmente.

In epoca romana si utilizzava il **natron** (*carbonato di sodio* naturale che si trova nei laghi salati del Medio Oriente), e localmente (Siria, Egitto, Libano) si produceva la base vetrosa, che, in blocchi di vetro grezzo, veniva poi esportata per essere rifusa a lavorata nei centri vetrai di tutta Europa.

Nel medioevo il *natron* fu sostituito da ceneri vegetali (di *Salicornia*, ma anche di *faggio* o di *felci*) che, nel caso di impiego per vetro puro ed incolore, venivano purificate per lisciviazione e filtrazione (fino al 40% di sali alcalini); era questo uno dei segreti dei vetrai veneziani che producevano i primi cristalli.

Alla fine del '700 in Francia si cominciò a produrre *carbonato di sodio* artificiale dal *cloruro di sodio* con purezza 70-75% (processo Leblanc). Nel 1865 in Belgio è stato messo a punto un nuovo processo (processo Solvay), che, opportunamente perfezionato, è tuttora impiegato per estrarre il sodio dalle acque marine e trasformarlo in *carbonato di sodio*, con elevata purezza e costi notevolmente inferiori.

Stabilizzanti

Oltre a favorire la lavorabilità del vetro e conferire le proprietà fisiche volute, riducono la possibilità di alterazioni della superficie del vetro.

Il vetro silico-sodico o silico-potassico non è stabile: basta l'umidità atmosferica per corroderne la superficie, formando strati biancastri. Per stabilizzare il vetro si sostituisce parte della soda con altri composti che rinforzano il reticolo vetroso, migliorandone le proprietà chimiche.

Vengono così impiegati gli **ossidi** bivalenti di **calcio** (CaO), **magnesio** (MgO), **bario** (BaO), **piombo** (PbO) e **zinco** (ZnO), che per questo sono detti stabilizzanti. Un ulteriore miglioramento si ha introducendo nel vetro altri ossidi come l'**allumina** (Al₂O₃) e l'**anidride borica** (B₂O₃).

Il *carbonato di calcio naturale* (marmo o calcare) si decompone a circa 1000°C in anidride carbonica e ossido di calcio che entra a far parte del vetro. Può essere sostituito, anche parzialmente, con dolomite (*carbonato doppio di calcio e magnesio*).

L'*allumina*, generalmente aggiunta in forma di feldspati alcalini, serve a migliorare la resistenza chimica del vetro ed a controllare la viscosità del fuso.

Il *piombo*, aggiunto in forma di ossido (*minio* – Pb₃O₄ oppure *litargirio* – PbO), aumenta la brillantezza del vetro.

Affinanti

Hanno lo scopo di favorire l'eliminazione dei gas prodotti dalla decomposizione delle materie prime (prevalentemente CO₂), contribuendo al processo di omogeneizzazione del vetro fuso.

Per eliminarle le numerose bolle gassose, formatesi per decomposizione dei carbonati o per altre cause, vengono aggiunti dei composti affinanti come gli ossidi di **arsenico** (As₂O₅) e di **antimonio** (Sb₂O₃) associati a **nitrati**. Un tempo si usava quasi esclusivamente il *biossido di manganese* (MnO₂), mentre nei moderni forni continui l'affinante principale è costituito da **solforati** associati a piccole quantità di agenti riducenti (**carbone**, **loppa d'altoforno**).

Questi composti nella decomposizione ad alta temperatura (1200°C) liberano bolle di *ossigeno* che, risalendo in superficie, omogeneizzano la massa fusa ed assorbono le bollicine che incontrano.

Decoloranti

Vengono aggiunti, soprattutto nella produzione di vetri trasparenti, per neutralizzare la colorazione ed eliminare gli effetti indotti dalla presenza di alcuni elementi particolarmente coloranti anche in tracce, come **ferro** e **romo**, contenuti come impurezza nelle materie prime. Si tratta di sostanze che agiscono correggendo o annullando la tonalità di colore secondo un principio fisico (sovrapposizione con un colore complementare) o chimico (ossidazione o riduzione dell'elemento colorante).

Il decolorante più noto, che agisce in tutti e due i modi, è il **biossido di manganese** (MnO₂), che tuttavia sottoposto alla radiazione solare tende a virare al giallo-violetto. Per questo motivo attualmente viene sostituito da **ossido di nichel** (NiO) e da una miscela di elementi come il **selenio**, il **cobalto** e **terre rare** che, opportunamente dosati, danno un risultato più completo e stabile.

Opacizzanti

L'opacità del vetro, richiesta soprattutto del settore dei manufatti per l'illuminazione e dei casalinghi, viene ottenuta per la presenza nella massa vetrosa di tenori di **fluoro** del 4 – 5%, che danno luogo alla formazione di microcristalli di *fluoruro di calcio*, di *fluoruro sodico* e di *fluorosilicati* vari. Altri composti opacizzanti sono il *biossido di titanio*, il *biossido di zirconio* e di *stagno*, l'*arseniato di piombo*, il *fluoantimoniato di calcio* ed il *fosfato di calcio*.

L'opacizzazione si sviluppa in fase di raffreddamento e formatura del manufatto.

Coloranti

Per la produzione di vetri colorati si ricorre all'impiego di una vasta gamma di prodotti ad effetto colorante. L'intensità della colorazione, oltre che dalla quantità di colorante introdotto nella composizione del vetro, dipende anche dalle condizioni di gestione del forno e dalla presenza di sostanze più o meno ossidanti o riducenti.

Nella seguente tabella vengono elencati alcuni dei principali elementi e combinazione di composti coloranti con i relativi effetti, distinti a seconda delle condizioni operative ossidanti o riducenti.

Elementi/composti	condizioni ossidanti	condizioni riducenti
<i>ferro ossido</i>	verde giallo	verde-blu
<i>cobalto ossido</i>	blu	blu
<i>rame ossido</i>	azzurro	rosso
<i>cromo ossido</i>	verde smeraldo	verde
<i>manganese ossido</i>	ametista	
<i>nichel ossido</i>	bruno-violetto	bruno-violetto
<i>neodimio ossido</i>	violetto	violetto
<i>selenio ossido</i>		rosso
<i>solfuro di ferro</i>	verde-giallo	giallo-ambra



Materiale riciclato

Il vetro è un materiale totalmente riciclabile: può essere rifuso e modellato infinite volte, senza perdere o modificare le sue proprietà.

Perciò il **rottame vetroso** è diventato, per certe produzioni, una delle più importanti materie prime.

Per esempio nella produzione di bottiglie colorate vengono normalmente impiegate quantità variabili dal 60 al 90% di rottame vetroso derivante da raccolta differenziata (**rottame esterno**).

La presenza di rottame vetroso nella miscela vetrificabile accelera la fusione e consente di risparmiare energia e materie prime.

Anche gli scarti di produzione vengono riciclati in fusione (**rottame interno**).



3. FUSIONE DEL VETRO

3.1 FORNI FUSORI

I forni fusori per la produzione del vetro attualmente impiegati si distinguono in:

- **forni a crogiolo o a vasca**, impiegati nei processi artigianali ed artistici discontinui,
- **forni a bacino**, impiegati per le produzioni industriali in processi continui.

Forni a Crogiolo

I **forni a crogiolo** vengono ancor oggi utilizzati nella produzione del **vetro artistico**.

Sono costituiti da un forno costruito con mattoni refrattari (pareti in materiale *silico-alluminoso* e volta di *silice*) all'interno del quale sono presenti uno o più contenitori refrattari (in argilla o sabbia silicea) di forma cilindrica con capacità da qualche decina di kg ad oltre una tonnellata di vetro (capacità media 500 kg/giorno).

Dopo l'accensione ed il preriscaldamento, che dura alcuni giorni, il forno rimane sempre acceso ed, in alternanza (processo discontinuo), vengono effettuati il caricamento e la fusione della miscela vetrosa e quindi l'estrazione e la lavorazione del vetro fuso, con temperature di esercizio che oscillano fra 1400°C (fusione) e 1000°C (lavorazione). Lo spegnimento per il rifacimento del forno avviene dopo parecchi mesi.



Crogioli ceramici



Forno da vetro



Forno da vetro a 4 fuochi

Forni a Vasca

Nelle vetrerie artigianali più grandi si utilizzano anche i **forni a vasca**, costruiti in refrattario elettrofuso a base di *silice-allumina-zirconio*, con capacità di alcune tonnellate. Il riscaldamento del vetro avviene per irraggiamento con fiamma sopra il bagno fuso. L'aria di combustione viene preriscaldata in un recuperatore di calore (tubo metallico riscaldato dai fumi in uscita dal forno).

In alcuni casi, per ridurre le emissioni di *ossidi di azoto*, vengono impiegati **forni ad ossicombustione**, oppure, soprattutto in presenza di miscele contenenti *piombo e/o fluoro*, **forni elettrici**, con resistenze applicate alle pareti o elettrodi di *molibdeno* immersi nel bagno di vetro.

Forni a Bacino

Sono forni impiegati nei processi industriali a partire dalla fine del XIX secolo, quando la fabbricazione manuale è stata sostituita da macchine formatrici automatizzate, e nei quali le varie fasi si susseguono in continuo nelle diverse zone del forno.

Il caricamento della miscela vetrificabile avviene con continuità all'estremo di una grande vasca rettangolare la cui superficie varia da qualche decina (forni per vetro cavo) fino a quasi un centinaio di m² (forni per vetro piano Float), con spessori del bagno di vetro fuso compresi fra 80 e 150 cm.

Lungo il percorso attraverso la **prima vasca** la miscela **fonde** e, omogeneizzandosi, si **affina** fino ad arrivare ad un foro sommerso (gola), che trasferisce il vetro fuso alla **vasca di condizionamento**, da cui si dipartono i canali (feeders) che trasferiscono la massa vetrosa alla **macchine formatrici**.

I forni a bacino sono costruiti con blocchi di materiale refrattario elettrofuso, resistente ad altissime temperature: normalmente le pareti sono in materiale *silico-alluminoso* e la volta in *silice*.

Si tratta in genere di forni con produzioni che vanno da 100 a 1500 tonnellate al giorno, alimentati con metano (o olio combustibile), ed in cui il riscaldamento del bagno di vetro avviene per irraggiamento. Anche in questo caso per contenere i consumi energetici si impiegano sistemi di preriscaldamento dell'aria comburente di tipo recuperativo (scambiatori metallici) o di tipo rigenerativo (impilaggi refrattari). Inoltre per aumentare la produttività e conferire flessibilità viene talora impiegato il *boosting* elettrico, che fornisce energia termica direttamente nel bagno di vetro fuso.

Una descrizione più dettagliata dei forni a bacino verrà fornita nel paragrafo relativo al *Vetro industriale*, con particolare riferimento al processo Float per **vetro piano** ed ai forni impiegati per il **vetro cavo**.

3.2 FORNI DI RICOTTURA

Dopo la formatura, per prevenire tensioni interne dovute al rapido raffreddamento delle superfici esterne, i manufatti in vetro soffiato o stampato vengono mantenuti alla temperatura di *ricottura* (500-600°C) per un periodo sufficiente ad assicurare il raggiungimento dell'uniformità termica in tutto lo spessore, per essere poi raffreddati lentamente di circa 50°C e successivamente più rapidamente fino a temperatura ambiente. Per la ricottura si impiegano appositi forni che si distinguono in:

- **forni a muffola**, per piccole produzioni,
- **forni a tunnel**, per le produzioni industriali.

Forni a Muffola

Sono piccoli forni in blocchi di refrattario che sono riscaldati a circa 550°C in cui vengono introdotti i manufatti delle lavorazioni artigianali appena formati. A sera il forno viene chiuso e spento, lasciandolo raffreddare lentamente per tutta la notte fino al giorno successivo, quando viene aperto, vuotato e riacceso per ricevere la nuova produzione.



Forno a muffola

Forni a Tunnel

Impiegati nelle produzioni continue industriali, sono costituiti da una sorta di galleria a temperatura decrescente da 550°C alla temperatura ambiente.

Gli oggetti appena formati la attraversano su un nastro metallico che avanza lentamente con velocità dipendente dalla dimensione e dallo spessore dei manufatti.

All'uscita del tunnel la produzione, sempre in automatico, viene trasferita alle eventuali lavorazioni a freddo (taglio, sfilettatura, molatura, ...) nel caso di vetro piano, e/o al sistema di controllo della qualità dei prodotti per il vetro cavo.



Forno di ricottura a tunnel per vetro piano

4. TIPI DI VETRO

Esiste anche il vetro naturale. Il più abbondante è l'**ossidiana**, un materiale lucido scuro, molto duro, formatosi nelle rocce vulcaniche e che l'uomo preistorico imparò a lavorare per preparare manufatti (lame, punte di freccia, ecc.).

Le **tectiti** sono piccoli ciottoli vetrosi formati per impatto di meteoriti con la superficie terrestre.

Le **folgoriti** sono invece filamenti o blocchi di vetro provocate per l'impatto di un fulmine su una spiaggia o su un terreno siliceo.



Come materiale artificiale il vetro è certamente uno dei più utilizzati per le sue eccezionali proprietà (trasparente, durevole, poco costoso, facile da modellare) e per la sua versatilità. L'industria vetraria si è peraltro sbizzarrita nel trovare nuovi settori di applicazione del vetro, studiando per ciascuno le composizioni più appropriate in relazione all'impiego.

Oltre che da solo come tale, il vetro può poi essere impiegato in associazione e combinazione con altri materiali, quali ad esempio smalti per metalli, vetrine ceramiche, detersivi, vetroresina.

La classificazione del vetro può essere fatta in base a:

- tecnica di lavorazione (soffiato, pressato, stampato, ...);
- impiego (per uso alimentare, farmaceutico, per l'edilizia, per ottica, ...);
- aspetto (colorato, incolore, trasparente, opaco, ...);
- particolari proprietà (biocompatibile, atermico, antisfondamento, ...);
- resistenza chimica (inerte, durevole, poco durevole, solubile, ...);
- composizione chimica (quarzo, silico-sodico-calcico, borosilicato, al piombo, ...).

Per quanto concerne in particolare la **composizione chimica** si individuano le seguenti classi principali, delle quali nel seguito si riporta una breve descrizione di proprietà ed applicazioni:

- **QUARZO FUSO**
- **SILICATO SODICO**
- **VETRO SILICO-SODICO-CALCICO**
- **VETRI BOROSILICATI**
- **VETRI AL PIOMBO**
- **VETRO PER OTTICA**
- **VETRI SPECIALI**
- **INVETRIATURE O SMALTI**

4.1 QUARZO FUSO

Il *quarzo fuso* (**vetro di silice**) è una sostanza vitrea ideale per caratteristiche chimiche e fisiche (elevata resistenza alla temperatura, resistività elettrica e chimica, basso coefficiente di dilatazione termica, permeabilità alla radiazione ultravioletta), ma di produzione costosa per l'altissima temperatura di fusione (oltre 1700°C).

Viene impiegato per materiali di laboratorio.



4.2 SILICATO SODICO

Il *silicato sodico* (**vetro solubile** – waterglass) è un prodotto trasparente, facilmente solubile in acqua, che trova larga applicazione in molte industrie.

La maggior quantità viene utilizzata come detersivo per lavastoviglie, ma trova impiego, con opportuni impasti, anche nella produzione di pietre d'arte artificiali. Serve inoltre come accelerante per l'indurimento del calcestruzzo, per la preparazione di intonaci e colori murali, per colori da stamperie, nonché come mezzo sbiancante nelle lavanderie di lana, nella fabbricazione di adesivi, di smalti, di fiammiferi, ecc.



4.3 VETRO SILICO-SODICO-CALCICO

Al gruppo del *vetro silico-sodico-calcico* o *vetro sodico-calcico* (**vetro comune**), appartiene la più vasta produzione vetraria industriale: dalle lastre per edilizia, arredamento e automobili, alle bottiglie, al vetro da tavola.

Commercialmente viene distinto in base al colore in: bianco (perfettamente decolorato), mezzo bianco e colorato (soprattutto verde ed ambra).

In funzione delle caratteristiche chimico-fisiche che si vogliono conferire al vetro, l'*ossido di calcio*, che nella miscela vetrificabile non supera il 12-13% (in peso), viene in parte sostituito da altri ossidi bivalenti:

- l'*ossido di magnesio* (MgO), migliora la fusibilità e la lavorabilità del vetro;
- l'*ossido di bario* (BaO) migliora la lavorabilità, impartisce brillantezza e influisce sulle caratteristiche dielettriche e di resistenza elettrica del vetro;
- l'*ossido di zinco* (ZnO) riduce il coefficiente di dilatazione e migliora la resistenza chimica dei vetri; un consistente impiego è previsto nelle miscele dei vetri opale e in quelle dei vetri rossi colorati al *solfo-seleniuro di cadmio*.

Infine l'*allumina* (Al₂O₃), introdotta nel vetro al posto della silice, agisce sulla viscosità, sul coefficiente di dilatazione, sulla resistenza meccanica e chimica del vetro.



4.4 VETRI BOROSILICATI

Sono vetri di elevata resistenza chimica (per questo detti neutri) e di composizione molto varia, contenenti in genere quantità relativamente elevate di *anidride borica* (B₂O₃) ed *allumina* (Al₂O₃).

Questi tipi di vetro vengono usati per la fabbricazione di contenitori per medicinali (flaconi e fiale), per apparecchiature da laboratorio chimico, per inertizzare le scorie radioattive, ecc.

Per le loro proprietà (modesta dilatazione termica) sono resistenti al calore e trovano numerosi impieghi per manufatti da forno (vetro *Pyrex*, *Duran*, *Bomex*, ...) o per applicazioni particolari.



4.5 VETRI AL PIOMBO

Con questo termine si indicano i vetri trasparenti che, per la loro elevata qualità, imitano il cristallo di rocca naturale. A questo gruppo appartengono vetri con quantità di *ossido di piombo* comprese tra il 24% ed il 30% (**cristallo al piombo**) o fra il 30% ed il 35% (**cristallo superiore**).

Prodotti con materie prime di grande purezza, sono caratterizzati da una notevole lucentezza (elevato indice di rifrazione). Sono usati nel settore artistico, nella vetreria da tavola di pregio e nella realizzazione di schermature per la protezione da radiazioni ionizzanti.

La necessità, per motivi ecologici, di ridurre l'*ossido di piombo*, ha portato negli ultimi anni allo sviluppo di vetri con proprietà ottiche analoghe (mezzo cristallo o vetro sonoro), contenenti *potassio, bario, zinco e zirconio* in sostituzione del *piombo*. Con il termine cristallo ci si riferisce così anche a vetri silico-sodico-calcici (cristallo veneziano, messo a punto da *Angelo Barovier* nel XV secolo) e potassico-calcici (cristallo di Boemia).



4.6 VETRO PER OTTICA

Fra tutti i vetri è il più pregiato e, per conseguire i necessari molteplici rapporti tra rifrazione e dispersione, la sua composizione è molto varia.

I più noti vetri per ottica sono:

- *flint* (vetro piombico con *anidride borica* e *ossido di bario*),
- *crown* (vetro calcico con *anidride borica*, *ossido di bario*, *ossido di zinco* e *fosfati*),
- *borosilicati*, ad alto tenore di *boro*.



4.7 VETRI SPECIALI

Vi sono un'infinità di vetri considerati speciali sotto il profilo composizionale, usati per applicazioni particolari. Fra di essi si ricordano i vetri **allumino-silicatici** (vetro "E" per fibre ignifughe e manufatti da sottoporre a tempra chimica), vetri **fosfatici** (vetri privi di *silice* dove il vetrificante è l'*anidride fosforica*, usati per i biovetri ed i vetri fertilizzanti), vetri privi di *ossigeno* come i **calcogenuri** (*arseniuri*, *solfuri*) che trovano impiego in optoelettronica ed i vetri **alogenuri** (*fluoruri*, *cloruri*, ...) utilizzati per speciali fibre ottiche che trasmettono nell'infrarosso, ecc.

4.8 INVETRIATURE O SMALTI

Vetri di diversa composizione sono utilizzati in strato sottile applicati per la successiva cottura come rivestimento di altri materiali come i metalli (smalti) piastrelle (vetrato) o corpi ceramici (invetriature o smalti).

Si tratta in genere di vetri al *piombo* o borici, relativamente bassofondenti, variamente colorati, con dilatazione termica compatibile con il supporto.



Cartella colore di smalti ceramici

5. VETRO ARTIGIANALE ED ARTISTICO

Fino agli inizi del XX secolo, quando *Michael Joseph Owens* inventò e brevettò (1895) la prima macchina automatica per la fabbricazione di bottiglie (2500 pezzi/ora), la produzione e la lavorazione di manufatti in vetro aveva esclusivamente carattere artigianale.

Attualmente la produzione artigianale è sostanzialmente rappresentata dalla lavorazione artistica del vetro, effettuata mediante soffiaggio e stampaggio, ovvero con l'impiego di attrezzi ed utensili che consentono di modellare gli oggetti lavorati.

Dalle abili mani degli artigiani e dei maestri vetrai escono vetri di incredibile bellezza: vetri a smalto, decorati e dipinti, cristalli, vetri a imitazione di pietre dure, fili di diversi colori, diritti e ritorti a formare reticelli o filigrana, vetri incisi, a intarsio, a cammeo, a pettine, a piuma, con polvere d'oro, azzurrini, trasparenti, "murrine" dai mille colori e combinazioni.

E poi il vetro prende forma in stupende creazioni uniche: calici, bicchieri e coppe, specchi e cornici lavorate, lampadari dalle mille luci, appliques, candelabri, piatti lavorati, vasi e vassoi, gioielli, ma anche oggetti più semplici come souvenir ed articoli da regalo.



5.1 TECNICHE DI PRODUZIONE E LAVORAZIONE

A titolo illustrativo, si riporta una sintetica descrizione delle principali tecniche di lavorazione artigianale del vetro.

5.1.1 ACIDATURA (*Etching*)

È una tecnica che permette di opacizzare e satinare la superficie vitrea, o di incidere anche profondamente, utilizzando *acido fluoridrico*, l'unico acido che scioglie il vetro a freddo.

Per ottenere un motivo decorativo le parti da risparmiare vanno coperte con cera o altro materiale resistente all'acido, cosicché, immergendo l'oggetto nell'acido, questo corrode le parti non protette. Con particolari accorgimenti si possono ottenere incisioni a vari livelli di profondità, ricorrendo a fasi successive di bagno in acido.

Una variante dell'acidatura è la tecnica del *Corroso* con la quale la superficie del vetro viene ricoperta irregolarmente di cera con una spugna.

Il manufatto viene quindi immerso in una vasca piena di segatura imbevuta in una miscela di *acido fluoridrico*. Ne risulta una opacizzazione simile alla superficie di un *ghiaccio craquelé*.



5.1.2 APPLICAZIONI CAVE

Si ottengono applicando sulla parete del soffiato una consistente goccia di vetro. Mentre le gocce sono incandescenti il vetraio soffia all'interno dell'oggetto cosicché esse si dilatano verso l'esterno riempiendosi d'aria. Le bolle possono essere modellate a piacere con l'uso di pinze (borselle).

Allo stesso modo si ottengono le *applicazioni cave verso l'interno*, aspirando attraverso la canna in modo che il vetro incandescente delle gocce si ritrae all'interno formando una bolla cava.



5.1.3 GOCCE APPLICATE

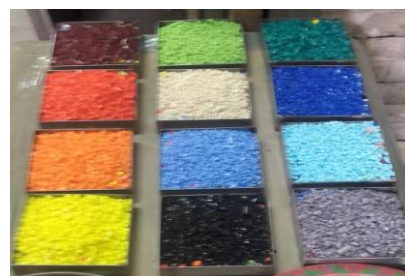
È una tecnica che risale ai primordi dell'arte vetraria.

Sull'oggetto in lavorazione si applicano gocce di vetro incandescente attinto dal crogiolo con un corto e sottile pontello o "speo" (spiedo in muranese). La goccia può rimanere a rilievo o essere inglobata nella parete *marmorizzando* l'oggetto, cioè rotolandolo su una superficie di metallo o di marmo.

Le gocce possono essere di varie dimensioni e dare luogo a protuberanze grandi ed appuntite oppure essere impresse con motivi decorativi simili a lamponi (arte tedesca e olandese del XVII secolo) o fragole (vetraria veneziana dal XVI secolo).

Nella variante *a schegge applicate* con la massa di vetro soffiato (o massiccio) vengono raccolte schegge di vetro colorate disposte su un piano di metallo, marmorizzando sopra di esse. Ciò determina una decorazione irregolare o a macchie colorate.

Se le schegge sono dello stesso colore del vetro di base è non vengono inglobate completamente si può ottenere un effetto simile al *Vetro ghiaccio* (vedi).



Schegge colorate di vetro

5.1.4 FILI APPLICATI

Sull'oggetto in lavorazione, attingendo dal crogiolo con lo *speo*, si applicano filamenti incandescenti di vetro a spirale, in verticale o secondo i motivi decorativi desiderati. I fili possono poi essere mantenuti a rilievo o inglobati nella parete vitrea *marmorizzando*.

Nella variante dei *fili applicati a festoni* (detta *decorazione a fenicio*) i filamenti vitrei incandescenti avvolti vengono pettinati alla bocca del forno con uno strumento a gancio, detto *maneretta*. Anche i festoni possono essere mantenuti a rilievo o inglobati nella parete *marmorizzando*.

Nella variante a *fili applicati spezzati* (tecnica Rinascimentale) un filamento vitreo viene applicato a spirale su un soffiato stampato a nervature; ruotando poi la canna che sostiene il manufatto, questo si dilata leggermente e i fili si spezzano.



Fili applicati



Fili applicati a festoni



Fili applicati spezzati

5.1.5 CANNA

Si tratta di una lunga bacchetta di vetro che viene ottenuta per stiratura di un cilindro iniziale opportunamente lavorato, e successivamente impiegata per la realizzazione di manufatti artistici.

Il maestro *cannér* raccoglie con un'asta di ferro (*ferro da canna*) una idonea quantità di vetro, a cui viene conferita una forma cilindrica, *marmorizzando* sul *bronzin* (piano metallico). Quindi il cilindro (*pastòn*) viene attaccato in corrispondenza dell'altra estremità ad un'altra asta più corta, già predisposta con una piccola quantità di vetro (*conzaùra*). Due vetrai impugnando i due ferri si allontanano rapidamente d'uno dall'altro, agitando le canne secondo una modalità collaudata da secoli e stendendo la canna vitrea su sottili traversine di legno disposte lungo un corridoio, per oltre 50 metri.

La canna ottenuta, che non richiede ricottura e lento raffreddamento, viene immediatamente tagliata in lunghi segmenti.

Allo stesso modo viene tirata la canna forata e quella a millefiori.

Per ottenere la canna forata, prima di stirare il *paston*, con uno strumento si realizza al suo interno una cavità longitudinale che viene chiusa immergendo il vetro nuovamente nel crogiuolo.



5.1.6 CANNA MILLEFIORI

La canna millefiori (detta anche *rosetta*) si ottiene stirando una massa cilindrica (*pastòn*) ottenuta per sovrapposizione di più strati di vetro di colorazioni diverse a partire da una piccola quantità inserita in uno stampo a forma di stella.

Sezioni irregolari di canne a millefiori raccolte, *marmorizzando*, intorno alla parete monocroma di un soffiato conferiscono all'oggetto una decorazione policroma.



5.1.7 SLUMPING

È una tecnica moderna ispirata al principio con cui in passato venivano spianate le lastre di vetro ricavate con il *sistema del cilindro* adagiandole in un piano nel forno.

Nella tecnica *slumping* la lastra di vetro viene appoggiata su una superficie di materiale refrattario di forma preconstituita, generalmente concava, in modo che all'interno del forno con il calore la stessa rammollendosi si adagia sullo stampo e ne assume la forma.



5.1.8 DECALCOMANIA

È un processo in cui la decorazione è incisa su lastre di rame, ricoperta di inchiostro a base di ossidi metallici, che vanno a riempire le cavità dell'incisione, e trasferita prima su carta e quindi sulla parete vitrea. La decorazione viene quindi definitivamente fissata sul vetro con la ricottura in una muffola.

5.1.9 FOGLIA D'ORO E D'ARGENTO IN FORNACE

È una tecnica nella quale il vetraio rotola il vetro incandescente su una foglia d'oro o d'argento facendola aderire alla parete esterna. Soffiando l'oggetto la foglia si sminuzza in una sorta di pulviscolo, che può essere rivestito con un ulteriore strato di vetro trasparente.

La foglia d'argento, se non rivestita, brunisce.



5.1.10 FOGLIA D'ORO GRAFFITA

È una tecnica di laboratorio in cui la foglia d'oro, o d'argento, viene applicata a freddo adattandola sulla superficie vitrea previamente spalmata con un fondente. Quindi il decoratore ne asporta alcune parti esegue la decorazione per mezzo di una punta in osso o in materiale plastico. L'oggetto viene infine ricotto in una muffola per fissare indelebilmente l'oro al vetro, ovvero viene ricoperto con un altro sottile strato di vetro soffiato sovrapposto in aderenza.



5.1.11 GRAAL

È una specialità tecnica svedese che permette di ottenere una decorazione incisa all'interno della parete vitrea.

Si procede rivestendo dall'interno un vetro colorato con un cristallo soffiato. Dopo aver inciso a rotina, ad acido o con sabbatura il vetro colorato esterno fino al cristallo, il manufatto viene riscaldato, ricoperto da un strato di vetro aggiuntivo, e lavorato mediante soffiatura.

Nella variante *Fishgraal* l'incisione è più estesa e si ottiene un disegno colorato su sfondo incolore. Nella variante *Ariel* l'incisione effettuata con sabbia è molto profonda in modo che il sottile rivestimento vitreo imprigioni nei solchi un po' d'aria, creando una decorazione evanescente e suggestiva.

Infine nel più recente *Litograal* disegni o parole sono incise a sabbia su uno strato di smalto ceramico.



5.1.12 INCALMO

È una tecnica muranese inventata nel XVI secolo che permette di unire soffiati differenti per colore o per decorazione, l'uno attaccato alla canna da soffio e l'altro ad un pontello, saldandoli a caldo lungo un bordo di eguale diametro. Staccato il pontello, la lavorazione prosegue sul manufatto, reso un pezzo unico, mediante ulteriore soffiatura o modellazione, ripetendo l'operazione anche più volte.



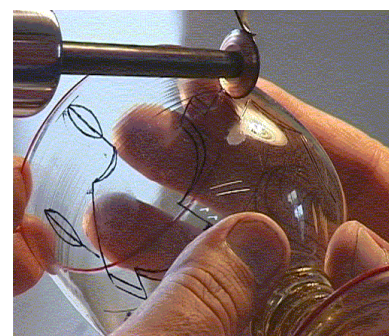
5.1.13 INCISIONE A PUNTA DI DIAMANTE

Si tratta di decorazioni incise su vetro mediante una penna munita di una punta di diamante industriale o trapani con rotelle diamantate. Le incisioni sono lineari o puntinate con effetti grafici di chiaroscuro.

5.1.14 INCISIONE A ROTINA

È una tecnica eseguita con una rotella verticale di rame di varie dimensioni saldata ad un tornio fisso, sul profilo della quale una linguetta di ottone disperde con continuità una sospensione oleosa contenente una polvere abrasiva (carburo di silicio o corindone). La lucidatura viene poi fatta con una rotina di sughero. Con più passate possono essere realizzate incisioni sovrapposte che creano un effetto ottico di bassorilievo.

Il vetro più adatto all'incisione è il cristallo al piombo, che viene minutamente sgranato dall'utensile, con il risultato di una incisione più nitida e precisa.



5.1.15 MEZZA FILIGRANA, RETICELLO, RETORTOLI

Detta anche *vetro a fili* è tecnica che impiega segmenti uguali (circa 20 cm) di canna vitrea trasparente con l'anima costituita da un filo rettilineo opaco bianco, che accostati su una piastra metallica o refrattaria ed inseriti ripetutamente nel forno si saldano assieme fino a costituire una piastra vitrea. Quindi la piastra vitrea viene richiusa a cilindro lungo un lato con l'ausilio di una canna da soffio sulla cui estremità è predisposto un elemento conico e viene progressivamente stirata a spirale lasciando trasparire il disegno dei fili decorativi interni; l'oggetto può essere poi soffiato o variamente modellato.



Con due *mezze filigrane* con spirali in direzione opposta si ottiene una *filigrana a reticello*, con un motivo a rete. Un soffiato cilindrico di mezza filigrana viene soffiato all'interno di un identico soffiato di diametro lievemente maggiore, staccato dalla canna da soffio ed aperto superiormente. Soffiando con la canna da soffio il cilindro interno, la parete esterna di questo va ad aderire alla parete interna del cilindro esterno, inglobando anche una bollicina d'aria in ciascuna maglia della rete, che nell'insieme, regolari nella disposizione e nella forma, costituiscono parte decorativa integrante della *filigrana a reticello*.

Utilizzando canne vitree, ottenute assemblando diverse canne non forate di cristallo e di vetro opaco, previamente stirate e ritorte a caldo, si ottiene la cosiddetta *filigrana a retortoli*. Anche in questo caso, con le canne vitree di cristallo a fili interni bianchi (o colorati) ritorti a spirale, si prepara la piastra vitrea che viene successivamente soffiata e modellata dal maestro vetraio.



5.1.16 MEZA STAMPAURA (mezza stampatura)

La tecnica prevede l'immersione parziale di un soffiato in un crogiolo per rivestirlo solo a metà di un ulteriore strato esterno di vetro, che successivamente inserito in uno stampo metallico viene impresso con nervature che interessano il solo strato esterno. Ruotando il tutto nelle successive lavorazioni le nervature possono anche acquisire un movimento a spirale.



5.1.17 MODELLAZIONE CERA PERSA

È una tecnica molto antica ed è analoga a quella impiegata per realizzazione di fusioni in bronzo.

Il modello originale plasmato in cera da fonderia viene rivestito di argilla che successivamente viene consolidata per cottura. La cera, fondendosi, viene eliminata attraverso un foro di colata e lo spazio lasciato libero dalla "cera persa" viene riempito con vetro in polvere, in granuli o fuso, che assume la forma del modello originario in cera.

5.1.18 MODELLAZIONE A LUME

È una antica tecnica di seconda lavorazione (applicata a Venezia fin dal Rinascimento) con la quale si realizzano figurine o perle, impiegando semilavorati costituiti da bacchette vitree piene (*glass rod*) variamente colorate che vengono rammollite con fiamma orizzontale a metano-aria o metano-ossigeno (più calda) e lavorate con l'ausilio di piccoli strumenti.

Per le perle si avvolgono le goccioline di vetro attorno ad una sottile canna forata di rame, che successivamente viene dissolta in un bagno acido.

Dopo l'invenzione del vetro borosilicato (Pyrex) si è sviluppata la tecnica di seconda lavorazione denominata *soffiatura a lume*.

Il semilavorato costituito da un tubo di vetro borosilicato è sottoposto a riscaldamento e, adattato ad una corta e sottile canna da soffio, viene dilatato e modellato con appositi strumenti.



5.1.19 NIPT DIAMOND WAIES

(da *nipped diamond-wise* - effetto a diamante pinzato)

Si realizza applicando sulla superficie del soffiato filamenti di vetro verticali in modo da ottenere delle nervature a rilievo, oppure ricavandole con la *meza stampatura*.

Quindi si procede con le pinze a pizzicarle unendole due a due alternativamente, così da determinare un effetto di losanghe in rilievo.



5.1.20 PITTURA A SMALTO

La *pittura a smalto* consiste nell'applicazione a pennello di impasti colorati ottenuti da polvere finemente macinata di vetri bassofondenti opachi o trasparenti mescolati con un liquido oleoso.

Nella decorazione si comincia con le linee di contorno (*filettatura*), passando successivamente alla colorazione uniforme dello sfondo (*mezzatinta*), che viene poi asportata nei punti in cui si vuole più luce. Si procede quindi alla colorazione delle forme fino al raggiungimento dell'intensità e del risultato desiderato.

L'oggetto decorato viene inserito infine in una muffola ad una temperatura attorno a 600°C affinché lo smalto rammollisca e aderisca indelebilmente alla parete di supporto.



5.1.21 SABBIATURA

Con questa tecnica, utilizzando aria compressa, si colpisce la superficie del vetro con granelli di sabbia o, per lavori di maggiore precisione, con polvere di corindone, aggredendo così il vetro per renderlo satinato o per scavarlo a varie profondità, ottenendo anche motivi decorativi ad alto rilievo. Le parti da proteggere vanno rivestite con uno speciale film adesivo. Ripetendo più volte l'operazione e proteggendo di volta in volta le parti da scavare meno profondamente si possono ottenere incisioni a vari livelli.



5.1.22 SOFFIATURA

La *soffiatura*, inventata nel I secolo a. C. nell'area siro-palestinese, fu una tecnica che rivoluzionò la produzione vetraria rendendo veloce ed economica la produzione di contenitori in vetro e di conseguenza favorendone la diffusione in tutti i ceti sociali.

Inizialmente veniva impiegata una canna vitrea; ora si impiega una canna metallica, con la quale, inserendo una estremità nel crogiolo contenente il vetro incandescente, se ne attinge la quantità necessaria. Poi il vetraio, soffiando con cautela dall'altra estremità, gonfia una bolla e modella il soffiato con spatole o pinze.



5.1.23 SOFFIATURA A STAMPO

Adottata nel I secolo d.C., la *soffiatura a stampo* consente di formare l'oggetto cavo e di imprimere sulla superficie decorazioni in rilievo. Gli stampi antichi erano in terracotta, pietra, gesso, metallo e legno.

Esistono due tipi fondamentali di stampi:

- lo stampo monoblocco in forma di bicchiere a tronco di cono (*dip-mould*), generalmente di metallo, permette di imprimere sulla superficie del vetro una decorazione a rilievo mentre è la mano del vetraio che determina la forma con l'aiuto di strumenti.
- lo stampo a due o più pezzi incernierati (*closed mould*) permette di conferire al manufatto non solo motivi decorativi ma anche una forma predeterminata.



Oggi prevalgono quelli in metallo, ghisa e legno (legno di pero privo di nodi).

5.1.24 VETRO INCAMICIATO

È una tecnica boema, inglese, scandinava e veneziana analoga a quella impiegata per produrre la base del cammeo con la quale si riveste un vetro opaco con uno strato superficiale di vetro trasparente molto sottile. A Venezia il soffiato allo stadio iniziale viene immerso in un crogiolo di differente colore e poi dilatato, assottigliando così la parete del vetro.

Tecnica simile è quella del *vetro sommerso* con la quale si possono ottenere effetti cromatici molto suggestivi sovrapponendo più vetri trasparenti di diverso colore.



5.1.25 VETRO A GHIACCIO

Questa tecnica decorativa veneziana, risalente al XVI secolo, consiste nell'immergere il vetro incandescente attaccato alla canna da soffio in un secchio d'acqua, provocando nel pezzo una fitta rete di fessurazioni di superficie. Un successivo delicato riscaldamento in forno ripristina l'integrità della parete vitrea mantenendo l'effetto simile a ghiaccio.



5.1.26 VETRO A CAMMEO

La tecnica, di origine romana e ripresa dai veneziani e dagli inglesi nel XIX secolo, è realizzata in due fasi: in fornace dal maestro vetraio immerge un soffiato di vetro scuro, generalmente blu, in un crogiolo di vetro bianco opaco così da ottenere uno strato esterno bianco; successivamente l'oggetto viene lavorato dall'incisore che procede all'esecuzione del bassorilievo con la rotina e con altri strumenti, asportando lo strato bianco.



5.1.27 PRESSATURA A STAMPO

La pressatura a stampo è un metodo veloce ed economico per ottenere oggetti vitrei massicci o concavi. L'ideale quantità di vetro viene colata con una *cazza* su un piano e sulla parte superiore viene pressato uno stampo di argilla refrattaria o di metallo. Poi l'oggetto semilavorato può venire adagiato su uno stampo convesso per ottenere una forma concava.

La pressatura può anche essere eseguita con un doppio stampo, inferiore e superiore, così da conferire l'intera forma solida o concava al prodotto vitreo. Oggi la pressatura a stampo è eseguita anche industrialmente con strumenti automatici.



5.1.28 MOSAICO

La tecnica di preparazione delle piastre da cui ricavare per taglio le tessere da mosaico prevede la colatura di una piccola massa di vetro fuso su un piano metallico e l'appiattimento in forma rotonda con una piastra. La principale difficoltà è quella di comporre le miscele per ottenere una vasta gamma cromatica di vetri opachi. Per le tessere a foglia d'oro o d'argento si depono la foglia sulla piastra appoggiandovi sopra un quadrato tagliato da un vetro soffiato ed inserendo il tutto in forno per assicurare l'adesione vetro-metallo. Le piastre di vetro vengono poi tagliate a freddo per ottenere le tessere utilizzate dal mosaicista per le sue composizioni.



Nella composizione del mosaico si distinguono lo stile ravennate e lo stile veneziano: il primo, molto antico, prevede la messa in opera delle tessere direttamente sul cemento della parete muraria, creando una superficie movimentata, mentre nello stile veneziano, che risale al XIX secolo, le tessere vengono incollate su un cartone, quindi applicate sul rovescio alla parete, lasciando la superficie perfettamente piatta.

5.1.29 VETRO MOSAICO

È una tecnica antichissima che ha permesso di realizzare forme concave prima dell'invenzione della soffiatura. Nel XIX secolo è rientrata nella tradizione tecnologica veneziana col nome di *murrina*.

Tessere di vetro colorato o sezioni di canna policroma (p.es. a millefiori) possono essere accostate su un piano ricoperto di argilla refrattaria e fuse al calore del forno. Quindi la piastra circolare ottenuta viene adagiata su uno stampo concavo o convesso così da conferirle una forma concava. Prima della sagomatura il bordo può essere rifinito con canna ritorta e le superfici eventualmente lisciate ed appianate con una ruota.

Tecnica analoga è quella del *fusing*, che può essere eseguita anche industrialmente, disponendo i frammenti o granuli di vario colore su una lastra, che in fusione si fondono assieme, e se ripetuta produce un effetto di sovrapposizione di colori e di decoro tridimensionale.



6. VETRO INDUSTRIALE

Tipologie e produzione italiana

Le tipologie di produzione del **vetro industriale** possono raggrupparsi nelle seguenti categorie, delle quali nella tabella e nelle figure sono riportate e messe a confronto le produzioni in Italia degli anni 2002, 2010 e 2016:

VETRO PIANO

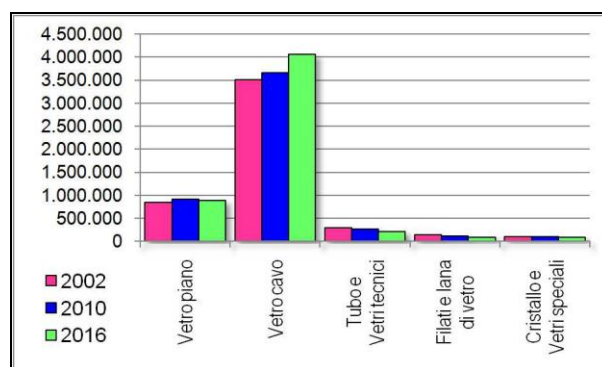
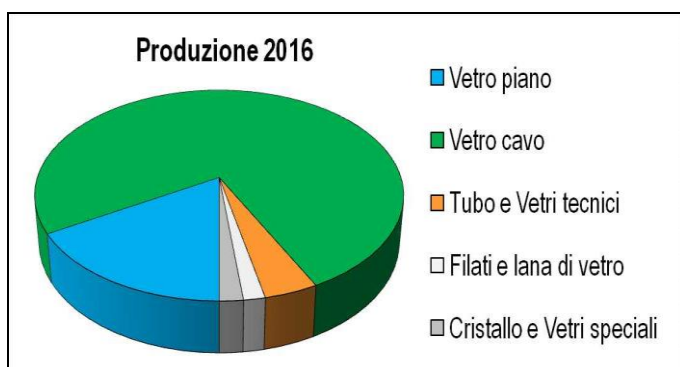
VETRO CAVO

TUBO DI VETRO

FIBRE DI VETRO

VETRI SPECIALI

Produzione Italiana (t/anno)	2002	2010	2016
Vetro piano	841.000	922.000	887.000
Vetro cavo	3.505.000	3.657.000	4.062.000
Tubo e Vetro tecnici	298.000	270.000	216.500
Filati e lana di vetro	145.000	115.500	86.500
Cristallo al piombo e altri vetri speciali	103.000	99.000	95.000
Produzione totale	4.892.000	5.063.500	5.347.000

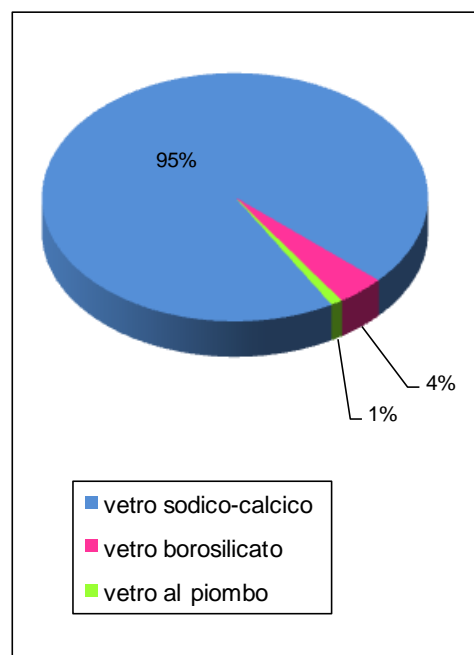


Quanto alle tipologie di vetro in base alla **composizione** a grandi linee si distinguono:

Vetro sodico-calcico: rappresenta circa il 95% della produzione industriale italiana ed è impiegato per produrre il vetro cavo (contenitori d'imballaggio e articoli da tavola) vetro piano (lastre per edilizia e per auto), vetri tecnici (articoli da illuminazione, fari, vetro-mattone, ...).

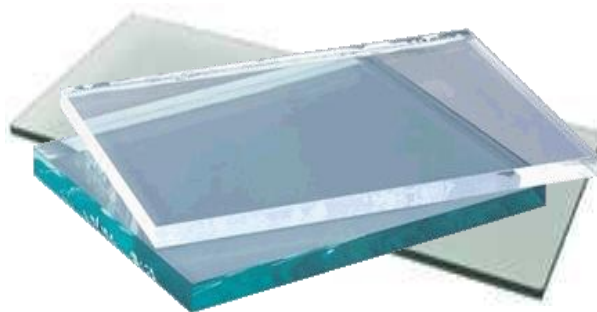
Vetro borosilicato: rappresenta circa il 4% della produzione nazionale, di cui l'1% è costituito da vetro farmaceutico (contenitori e tubo) ed il 3% da filati e fibre di vetro.

Vetro al piombo: la produzione industriale del cristallo (con Pb > 24%) è attorno all'1% della produzione nazionale di vetro e riguarda articoli da tavola ed oggettistica.



6.1 VETRO PIANO

Già in epoca romana si producevano lastre di vetro trasparente per schermare le finestre: si trattava di lastre di piccole dimensioni, non più di 50 x 80 cm, prodotte colando il vetro su una piastra e tirandone le estremità con pinze o altri attrezzi entro uno stampo. Ne risultavano lastre irregolari nello spessore, più sottili al centro e spesse ed arrotondate ai bordi.



Grande incremento nella fabbricazione di lastre si ebbe in Europa a partire dall'VIII secolo con la diffusione delle vetrare policrome legate al piombo, ed ancor più d al XII secolo nelle monumentali cattedrali gotiche. Dal XVII secolo si svilupparono metodi più sofisticati ed economici che consentirono di produrre lastre di dimensioni sempre più grandi e spessori più regolari ed uniformi.

Dopo la tecnica del **vetro colato** si succedettero il **sistema dei dischi**, quello del **cilindro**, la **colatura tra rulli** e, nel 1900, con l'avvento della produzione continua, il **vetro tirato**, che permisero il largo utilizzo delle lastre anche nell'edilizia civile.

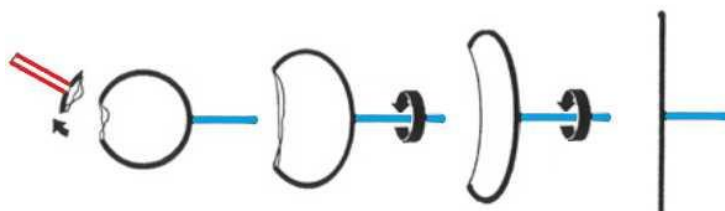
A partire dagli anni '60, infine, il procedimento **Float**, che ha consentito la produzione di lastre di grande dimensione con una perfetta planarità delle superfici, ha completamente soppiantato le altre tecnologie. L'impiego del vetro si è ulteriormente diffuso, oltre che nell'edilizia con lo sviluppo delle facciate strutturali nei grattacieli e in edifici commerciali, anche nel settore automobilistico.

6.1.1 TECNICHE DI PRODUZIONE

Prima di descrivere il procedimento Float, quello attualmente utilizzato in maniera pressoché esclusiva per la produzione industriale del vetro piano, verranno brevemente illustrate le tecniche precedentemente impiegate.

La tecnica del disco

La *tecnica del disco*, messa a punti nei primi secoli d.C. e proseguita fino al XIX secolo, consisteva nel soffiare una sfera che poi, attaccata ad un puntello nella posizione opposta alla canna da soffio, mediante riscaldamento e rotazione



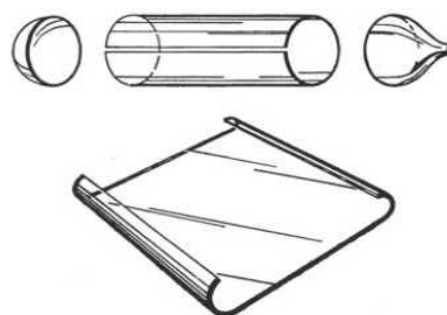
veniva progressivamente aperta ed allargata in corrispondenza al foro lasciato dalla canna fino a formare un disco, che poteva essere impiegato tal quale, o, se grande, veniva tagliato in quadri.

Lo spessore era irregolare (più spesso al centro), ma le superfici erano più limpide, perché si formavano nell'aria senza contatto con altre superfici. La tecnica è tuttora impiegata nella produzione artigianale di piatti e ciotole.

La tecnica del cilindro

La *tecnica del cilindro* consisteva nel far assumere al vetro in lavorazione, con soffiatura e rotazione, una forma allungata fino ad ottenere un cilindro chiuso alle estremità.

Una volta raffreddato, il cilindro veniva scalottato e tagliato longitudinalmente, e successivamente riscaldato in un forno a circa 700°C. Rammollito con l'aiuto di appositi utensili, il cilindro si apriva e si appiattiva in una grande lastra che veniva ricotta.



La superficie superiore risultava lucida, mentre quella inferiore, appoggiata al piano del forno, era scabra e con qualche difetto. Le irregolarità potevano essere spianate con molatura e lucidatura.

La colatura a rulli

È una tecnica francese del XVII secolo, impiegata per fabbricare lastre di grande dimensione da trasformare in specchi.

Il vetro fuso era versato su una piastra di ferro e rapidamente spalmato e distribuito nello stampo rettangolare in strato uniforme mediante un rullo fissato a rotaie. Le dimensioni erano 2x4 e gli spessori piuttosto elevati (oltre i 6-8 mm).

La tecnica di colatura con laminazione (procedimento *Bicheroux*)

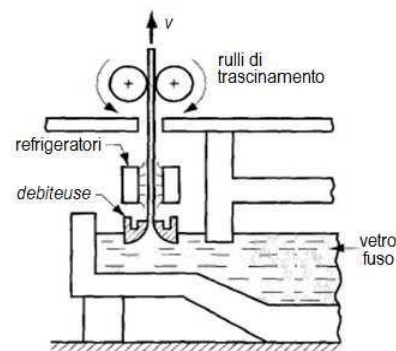
La massa fusa, colata direttamente dal crogiolo, veniva laminata mediante due cilindri raffreddati e distesa su un lastrone di ferro in movimento, con velocità regolata. Si ottenevano lastre larghe 4 m e lunghe fino a 6,5 m, con spessore grezzo di 5 mm. Le irregolarità nello spessore non superano 0,6 mm, con notevole economia nella molatura e lucidatura. Questa tecnica ebbe grande sviluppo con l'avvio dell'industria automobilistica nella prima metà del 1900.

Per migliorare la resistenza allo sfondamento ed evitare il distacco di pericolosi frammenti in caso di rottura, prima del passaggio fra i cilindri laminatori è possibile annegare nella lastra di vetro, ancora allo stato pastoso, un'armatura di fili metallici inossidabili che rimarrà completamente incorporata nel vetro. Allo stesso modo utilizzando cilindri incisi è possibile imprimere su una o entrambe le facce del vetro un disegno in rilievo (*goffratura*).

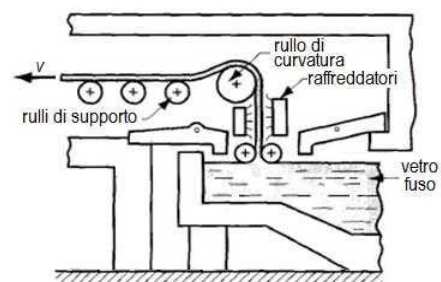
Tiratura delle lastre in continuo

Il problema della planarità e della levigatezza delle superfici fu risolto con due metodi, entrambi basati sull'estrusione del vetro dalla massa incandescente ed il raffreddamento prima di appoggiare il vetro già semisolido su un supporto rigido, che prendono il nome dai loro inventori: il belga **Fourcault** (1913) e l'americano **Colburn** (1916).

Procedimento Fourcault - La lastra era estrusa dalla massa vetrosa fusa verso l'alto attraverso una fessura (*débiteuse*) praticata entro una sorta di cassa refrattaria galleggiante immersa nella massa stessa. Dopo un primo raffreddamento la lastra veniva lentamente sollevata fra due serie di rulli laterali, e successivamente trascinata attraverso una sezione del forno fusorio per una sorta di ricottura. Il processo, economico, dava produzioni di 800-1200 mq al giorno di vetro di grande qualità.



Procedimento Colburn (altrimenti detto *Libbey Owens*, dal nome della società che acquisì il brevetto) - Il metodo prevede il tiraggio della lastra in verticale dalla fusione e l'accompagnamento del bordo, immediatamente all'uscita dalla massa incandescente, fra piccoli rulli girevoli con velocità di scorrimento leggermente inferiore a quella di sollevamento del nastro. Successivamente il nastro vitreo, tirato verticalmente per 1,50 m, viene piegato su un cilindro opportunamente riscaldato ed introdotto orizzontalmente su rulli nel forno di ricottura.



Procedimento Float

Inventato e messo a punto in Inghilterra da *Alastair Pilkington* (1959), il *procedimento Float* (a galleggiamento) è attualmente il metodo più economico ed utilizzato nel mondo per produrre vetro piano di altissima qualità. Il primo impianto *Float Glass* è stato realizzato a Pisa nel 1964.

Il vetro omogeneizzato ed affinato a 1350°C viene progressivamente raffreddato a circa 1000°C e versato in un secondo forno contenente stagno fuso purissimo in atmosfera riducente per evitare ossidazione del metallo. Il vetro galleggia sullo stagno espandendosi sulla sua superficie con uno spessore che naturalmente sarebbe di circa 6 mm e che viene regolato con dispositivi particolari che ne rallentano o accelerano lo spandimento; le facce risultano perfettamente lucide, piane e parallele.

In uscita dal bagno di stagno, sufficientemente solidificato, a circa 600°C il nastro di vetro passa su rulli al tunnel di ricottura, per il lento raffreddamento (ricottura), e quindi alla sezione di taglio automatico (in formati 6×3 m).

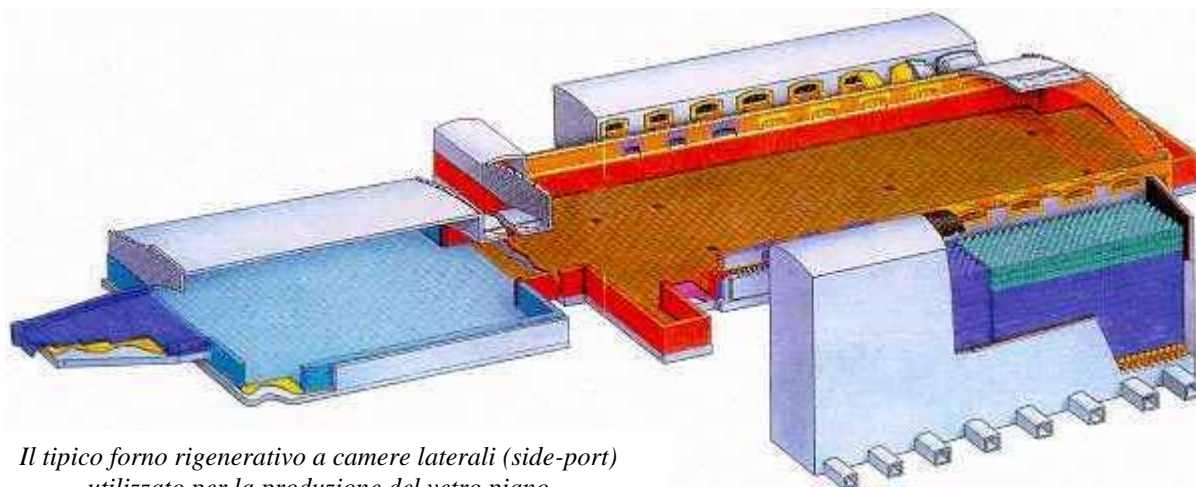
La movimentazione per l'allestimento, lo stoccaggio e la spedizione viene effettuata mediante ventose.

Oltre alla semplicità del processo ed alla perfezione delle superfici (planarità e parallelismo), il metodo consente elevate rese (oltre 600 t/giorno con poco scarto) e versatilità nello spessore (fra 1,3 e 24 mm).

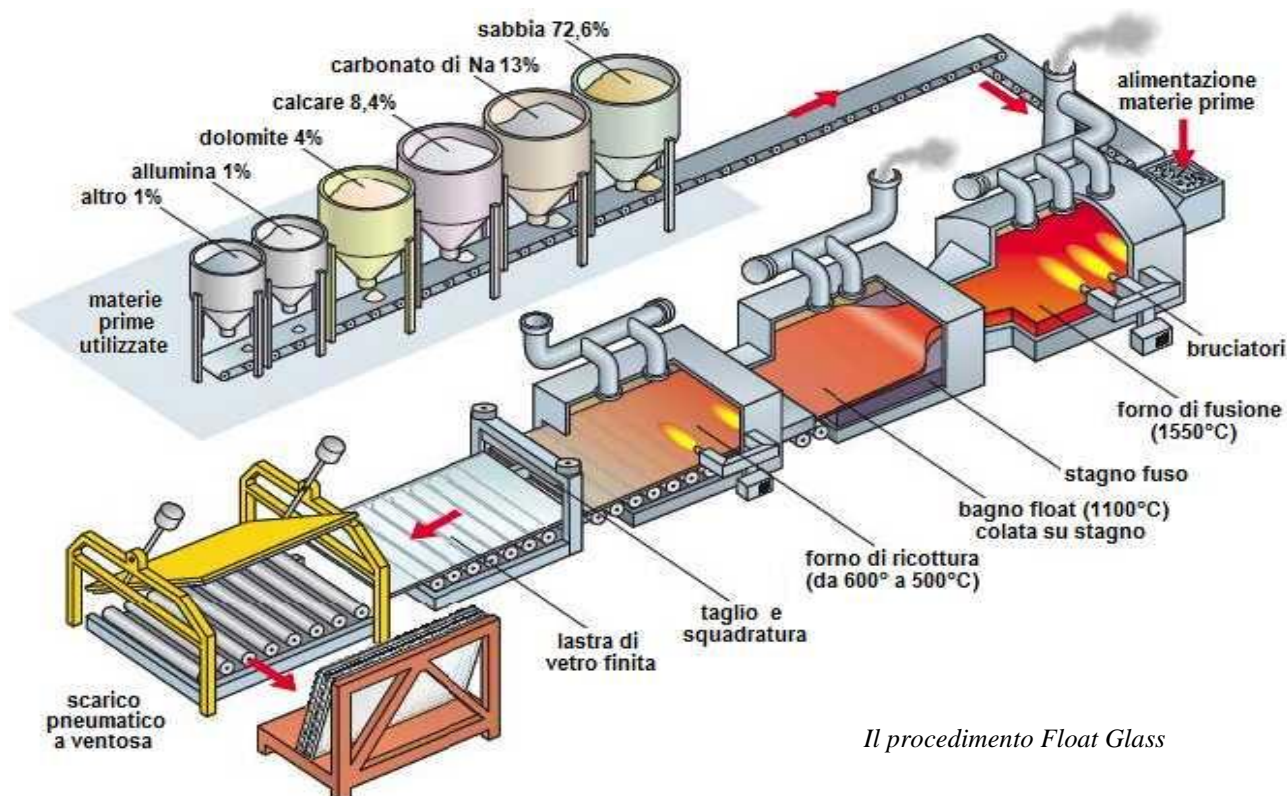
I forni per la produzione di vetro piano sono tipicamente forni a fiamma trasversale e camere di rigenerazione laterali (side-port).

Composizione della miscela vetrificabile per FLOAT GLASS (©Saint Gobain)

Composto	formula	%
Sabbia	SiO ₂	57
Calcare	Ca CO ₃	11
Dolomite	Ca Mg(CO ₃) ₂	10
Feldspato	Na ₂ O Al ₂ O ₃	3
Carbonato di sodio	Na ₂ CO ₃	16
Solfato di sodio	Na ₂ SO ₄	3



Il tipico forno rigenerativo a camere laterali (side-port) utilizzato per la produzione del vetro piano



Il procedimento Float Glass

6.1.2 TRASFORMAZIONE DEL VETRO PIANO

SECONDE LAVORAZIONI

Sono i trattamenti eseguiti sulla lastra per la lavorazione della superficie o la rifinitura dei bordi.

Taglio

Le varie tecniche di taglio del vetro si basano su due principi: l'incisione con materiali duri o il riscaldamento localizzato seguito da raffreddamento che induce tensioni e provoca una frattura.

Il taglio più tradizionale consiste nell'*incisione* del vetro con una rotellina *widia* (particelle di *carburo di tungsteno* inglobate in un metallo) ovvero con una punta diamantata o costituita da materiale più duro del vetro. È poi sufficiente un colpo deciso perché la frattura si propaghi rapidamente seguendo la linea dell'incisione.

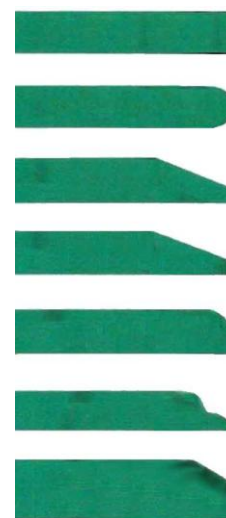
Il più antico metodo del *riscaldamento-raffreddamento* è stato ora soppiantato industrialmente dalla tecnica del *fascio laser*, effettuata mediante impianti a programmazione computerizzata, che consente l'esecuzione di linee molto complesse con tagli assai precisi e già rifiniti, privi di spigoli taglienti. Analogo risultato si ottiene con un getto ad altissima pressione di acqua mista a polvere abrasiva.



Molatura dei bordi

Altrimenti chiamata *sfilettatura*, si tratta dell'eliminazione meccanica o manuale del tagliente sui bordi di una lastra, realizzata con mole in pietra o nastri ricoperti di granuli di materiale abrasivo (*carborundum*, *corindone*, *zirconio*, *diamante*, ...). Può essere eseguita:

- a *filo greggio* tondo o piatto, con mole in pietra, *carborundum* o diamante a grana grossolana;
- a *filo lucido* tondo o piatto, ripassando il filo greggio con mole diamantate a grana finissima o con pomice in polvere;
- a *filo lucido industriale*, trattando direttamente in grande serie i bordi delle lastre con mole di adeguata finezza, senza ulteriori lavorazioni (filo lucido/semi opaco);
- a *bisello*, quando la molatura viene eseguita per smussare gli spigoli con un angolo inferiore a 90° rispetto alla superficie, interessando i bordi e la superficie stessa; è impiegata soprattutto per elementi di arredo, nonché specchi ed altri prodotti di grande pregio.



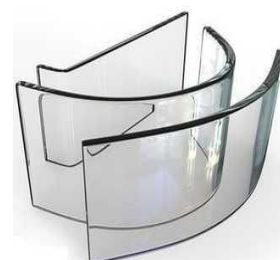
Foratura

I fori – realizzati su ogni tipo di lastra per produrre porte, box doccia e mobili, o per applicare maniglie, viti, bulloni – possono essere eseguiti con appositi trapani dotati di punte a corona diamantata, oppure, per fori più grandi, con tubi di ottone o di ferro trattati con l'applicazione di polveri abrasive di *carborundum*.



Curvatura (slumping)

La curvatura di vetro piano per la produzione di elementi per l'edilizia o per l'industria dell'automobile si ottiene per riscaldamento della lastra in appositi forni fino a circa 600°C e con l'impiego di appositi stampi in cui il vetro rammollito si adagia.



TEMPRA

La tempra è un trattamento *termico* o *chimico* che, a differenza della ricottura, ha lo scopo di mettere lo strato superficiale del vetro in compressione, migliorandone così le caratteristiche di resistenza alla rottura, sia per urto, sia per sbalzi termici, sia per flessione.

Il vetro temprato trova grande impiego come **vetro di sicurezza** giacché in caso di rottura l'energia elastica immagazzinata si libera istantaneamente producendo tanti piccoli frammenti non taglienti.

Quindi le eventuali operazioni di taglio, foratura, modellazione, non sono possibili su un vetro temperato e debbono essere eseguite prima della tempra.

In alcune applicazioni, per le sue caratteristiche meccaniche, l'impiego del vetro temprato è necessario, se non obbligatorio:

- automobili (lunotto posteriore e finestrini laterali),
- elettrodomestici (porte dei forni, oblò lavatrici),
- edilizia (pareti trasparenti, porte, vetrine, parapetti),
- arredamento (vetrine, mensole, tramezzi, scale, sanitari),
- arredo urbano (pensiline, cabine telefoniche, pannelli pubblicitari).

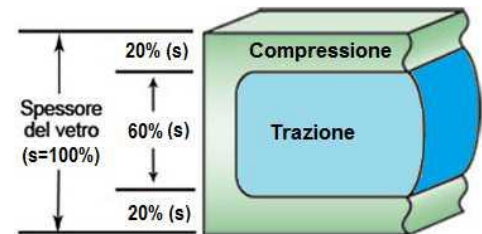


Rottura di vetro temprato

Tempra termica

Il processo di tempra termica consiste nel riscaldare il manufatto vitreo fino a 640°C (temperatura dello stato plastico) e quindi nel raffreddarlo rapidamente.

In tal modo prima si raffredda l'esterno e successivamente l'interno, producendosi tensioni permanenti di compressione in superficie e di trazione all'interno.



Tempra chimica

Il processo di tempra può essere anche chimico, che, rispetto alla tempra termica, ha il vantaggio di conferire compressione allo strato superficiale agendo a temperature nettamente inferiori.

Si ottiene per immersione dell'oggetto di vetro in un bagno di sali potassici fusi (KNO_3) alla temperatura di circa 450°C (inferiore anche a quella di ricottura), innescando la parziale sostituzione degli ioni *sodio* degli strati superficiali con ioni *potassio*, di dimensioni più grandi.

Ne consegue una dilatazione del reticolo vetroso superficiale rispetto agli strati interni che mette la parte esterna in compressione e quella interna in trazione.

Lo spessore interessato dalla dilatazione è molto sottile (circa 50 μm) e ciò talora costituisce una limitazione all'impiego dei vetri temprati chimicamente. Invece questo vetro, a differenza del vetro a tempra termica, non presenta aberrazioni e distorsioni ottiche diverse rispetto al vetro ricotto.

VETRI LAMINATI O STRATIFICATI

Vengono utilizzati nelle applicazioni che impongono l'impiego di vetri in grado di resistere allo sfondamento, come vetri di sicurezza (parabrezza di veicoli, elementi edilizi e di arredo), di protezione contro effrazioni o vandalismi (vetrine di negozi), di protezione rinforzata (per opere d'arte nei musei), vetri blindati (contro esplosioni e colpi d'arma da fuoco).

Il vetro laminato infatti è molto resistente agli urti e, quando colpito da un corpo estraneo, contiene la rottura nel punto di impatto, trattiene le schegge prodotte ed impedisce la penetrazione del corpo stesso.

Esso è costituito da due o più lastre di vetro comune o temprato, incollate tra loro con sottili strati di materiale plastico, generalmente il PVB (*butirrato di polivinile*), che presentano una buona aderenza al vetro ed un alto grado di allungamento, prima della rottura.



VETRI CON DEPOSITI SUPERFICIALI

Sono vetri, prodotti industrialmente, sulle cui superfici vengono polverizzati ossidi metallici, in modo da ottenere uno strato molto sottile (da 0,01 a 0,8 micron) che modifica il comportamento del vetro al passaggio della luce, sia nel campo del visibile che dell'infrarosso.

Sono usati per produrre vetrate, alle quali sono richieste, anche contemporaneamente:

- proprietà estetiche;
- controllo dell'energia solare (vetri selettivi della radiazione);
- controllo della luminosità (vetri oscuranti);
- economia nel riscaldamento e nel condizionamento dell'aria (vetri a bassa remissività).

A tal fine il deposito superficiale, applicato con processi chimici o fisici in continuo sviluppo, è costituito da più film sovrapposti (fino a 15), dei quali:

- il primo film assicura l'aderenza al vetro;
- uno o più film intermedi conferiscono al vetro le caratteristiche volute;
- l'ultimo film assicura protezione chimica e meccanica agli strati sottostanti.

VETRATE ISOLANTI SIGILLATE

Finalizzate a migliorare l'isolamento termico dei serramenti, sono realizzate per immobilizzare fra due o più lastre di vetro sigillate, uno strato d'aria, che in tale condizione presenta bassa conducibilità termica. Le vetrate isolanti sono formate da un telaio di profilato, generalmente metallico, che serve anche da distanziatore, ed al quale le lastre vengono incollate con speciali mastici.

Per garantire la trasparenza ed evitare fenomeni di condensa l'aria intrappolata viene completamente disidratata. Alla funzione principale di isolamento termico, possono essere associate altre funzioni come ad esempio l'isolamento acustico (sostituendo l'aria con altri gas), il controllo della radiazione solare (impiegando vetri trattati), la sicurezza o la protezione dal fuoco.



ARGENTATURA

È il procedimento per la realizzazione di **specchi in vetro**, impiegati anche nell'edilizia, nel settore automobilistico, nell'impiantistica solare. Viene eseguita in fasi successive:

- pulitura e sgrassatura (con *ossido di cerio*) e risciacquo (con acqua distillata) della superficie,
- trattamento con soluzione di *ossido stannoso* con azione riducente,
- precipitazione di *argento* metallico da soluzione di *nitrato d'argento*,
- ramatura (elettrolitica o per nebulizzazione del metallo) con funzione protettiva dall'ossidazione,
- verniciatura opaca finale con funzione di protezione meccanica e barriera contro l'ossidazione.

Senza la verniciatura opaca finale, nebulizzando sottovuoto il vetro trasparente con uno strato di ossidi metallici si ottiene uno *specchio spia*, riflettente da un lato e semitrasparente dall'altro.

LA DECORAZIONE A FREDDO

Il vetro piano può essere decorato analogamente al vetro artistico, con tecniche artigianali manuali o industriali meccanizzate, per trasformare le semplici lastre in vere e proprie opere d'arte.

Acidatura

È effettuata per immersione impiegando miscele di *acido fluoridrico* e *solfonico* che corrodono la superficie del vetro nelle zone non ricoperte con materiali impermeabili (cere o grassi).

L'*acido fluoridrico* è il corrosivo, mentre l'*acido solforico* serve a sciogliere ed asportare i fluosilicati insolubili che si formano.

A seconda delle concentrazioni e dei rapporti tra i due acidi, della temperatura e del tempo di contatto del vetro con il bagno, si ottengono acidature più o meno profonde, lucide od opache.

Incisione

L'*incisione semplice* consiste nella graffiatura manuale della superficie del vetro con punte di materiale più duro del vetro (widia, diamante, corindone) oppure con piccole ruote o punte rotanti applicate ad un trapano, con le quali si traccia il disegno formato da un solco che appare opaco.

L'*incisione (o intaglio) alla ruota* consiste invece nell'asportazione di vetro superficiale mediante polveri abrasive applicate su ruote messe in rotazione a grande velocità, ottenendo depressioni intagliate che creano figure e decorazioni in bassorilievo.

È possibile rifinire le incisioni ripassando con abrasivo più fine ed infine lucidare perfettamente la superficie con *ossido di cerio* applicato su supporti morbidi (sughero, plastiche o panni di feltro).

L'incisione decorativa può essere eseguita in serie ed in modalità 3D anche con macchine laser a controllo automatizzato, con risultati eccellenti in termini di precisione e resa grafica.

Sabbiatura

La smerigliatura del vetro può essere effettuata anche mediante sabbiatura.

L'attacco della superficie del vetro avviene per effetto di un getto d'aria compressa contenente sabbia più o meno sottile, indirizzata con maggiore o minore pressione, sulla superficie della lastra protetta da maschere metalliche nelle quali sono ritagliati i disegni da riprodurre.

Le zone scavate possono anche essere colorate con smalti a caldo o a freddo.

Pittura su vetro

Vi sono tecniche per la pittura del vetro a caldo o a freddo, con applicazione comunque a freddo.

Nella *pittura a caldo* vengono impiegati *grisaglie* (per disegni monocromi, contorni ed ombreggiature, su vetrate colorate) e *smalti* (per disegni colorati), entrambi costituiti da miscugli di polvere di vetro bassofondente ed ossidi metallici, che conferiscono la colorazione, in un legante organico oleoso. Esistono poi anche i *lustri* (particolari smalti impiegati per dorature ed argentature) contenenti metalli non ossidabili come *oro*, *argento* e *platino*.

Dopo l'applicazione a pennello, a spruzzo o mediante serigrafia, lo smalto viene essiccato e successivamente fissato sul supporto attraverso riscaldamento in muffola a 500°C, fino a fusione.

La *pittura a freddo* viene invece eseguita con particolari *vernici* che si fissano per essiccamento del legante e senza cottura. Possono essere facilmente rimosse per abrasione.

Givrettatura

La givrettatura – dal francese *givrè* (= brina, gelata) per l'aspetto della lastra trattata che sembra coperta da fioriture di cristalli di ghiaccio – viene realizzata mediante stesura sulla superficie sabbiata del vetro piano di una particolare colla, che durante l'asciugatura si contrae e provoca il distacco di piccole scaglie di vetro. In corrispondenza dei distacchi la lastra risulta scabra e lucida riacquistando trasparenza.

Dopo il lavaggio per l'asporto dei residui di colla il disegno prodotto risulta assolutamente singolare ed irripetibile, il che conferisce particolare pregio alla lavorazione.

Il vetro *givrettato* è impiegato per vetrate di porte, ante di mobili, pannelli di vetrine, vani scala e per tutte quelle applicazioni che richiedono schermature semitrasparenti adatte ad assicurare privacy, in quanto i fiori di ghiaccio lasciano passare la luce mascherando i dettagli delle immagini.



6.2 VETRO CAVO

6.2.1 PROPRIETÀ CHIMICHE DEI CONTENITORI

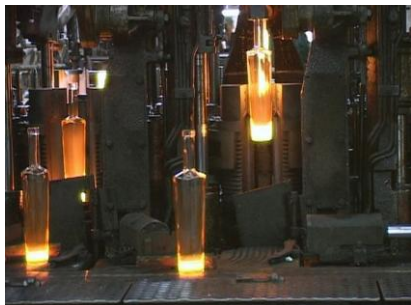
Con il termine **vetro cavo** si intende tutto il settore dei contenitori, destinati soprattutto all'imbottaggio di prodotti alimentari (vasi, bottiglie, bicchieri), di prodotti di profumeria (bottigliette e flaconi), nonché di soluzioni farmaceutiche. Il fattore più importante è la resistenza chimica del vetro, che dipende dalla **composizione chimica** del vetro stesso.

Per l'impiego alimentare viene normalmente impiegato il **vetro silico-sodico-calcico**, nel quale, ai fini della resistenza chimica, una parte dell'*ossido di sodio* è sostituito da *ossidi di calcio e di magnesio*, con l'aggiunta di piccole percentuali di *allumina*.

Per uso farmaceutico il **vetro silico-sodico-calcico** viene sottoposto a solforazione della superficie interna (con SO_2 allo stato gassoso), ovvero, per prodotti iniettabili liquidi, viene impiegato il **vetro borosilicato**, che, per la ridottissima reattività chimica, è detto *vetro neutro*.

In entrambi i casi il vetro è chimicamente resistente a sterilizzazione in autoclave (30 min a 120°C).

Il **colore del vetro** – come nel caso il verde scuro delle bottiglie da spumante ed il giallo-ambra di quelle da birra –, più che per il valore estetico è impiegato per proteggere il prodotto contenuto dalla radiazione ultravioletta, che ne può alterare il gusto.



Vetro cavo in uscita dalle macchine formatrici

6.2.2 PRODUZIONE DEL VETRO CAVO

L'impiantistica

Per la produzione industriale del vetro cavo vengono impiegati **forni a bacino** costruiti con blocchi di materiale refrattario elettrofuso: in *silice* la volta ed in materiale *silico-alluminoso* le pareti. Il bagno di vetro viene riscaldato per irraggiamento da una fiamma alimentata a metano o ad olio combustibile. Sempre più vanno affermandosi i forni a bacino di tipo misto, nei quali parte dell'energia viene fornita attraverso elettrodi immersi nel fuso (*boosting elettrico*). L'attivazione di questi elettrodi, la cui trasmissione di energia termica al bagno fuso è senza dubbio più efficiente rispetto al combustibile, può essere regolata anche in relazione alle necessità produttive.

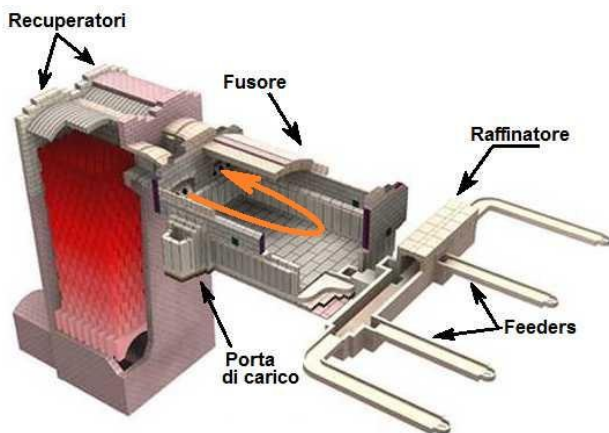
Il forno, attivo 24 ore su 24 ed in grado di resistere per anni alle elevate temperature di fusione, è controllato da monitor e calcolatori di processo ed autoregolato in tutte le sue funzioni in modo tale da verificare costantemente i parametri di processo per ottenere la corretta vetrificazione delle materie prime.

Allo scopo di aumentare l'efficienza termica del processo di fusione sono impiegati sistemi di preriscaldamento dell'aria comburente a spese dei fumi in uscita.

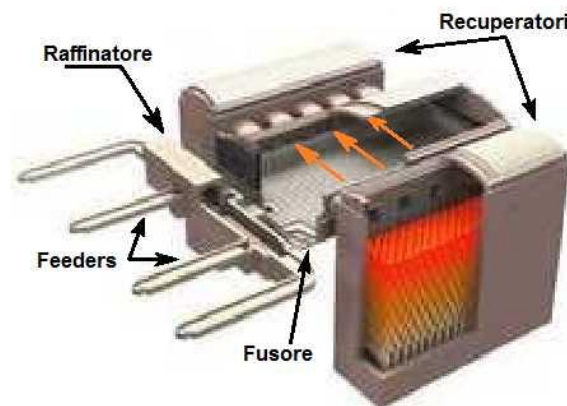
Esistono **sistemi recuperativi** con scambiatori metallici (forni Unit Melter), che preriscaldano in continuo l'aria fino a 800°C, e **sistemi rigenerativi** a 2 camere con impilaggi di mattoni refrattari, che, raffreddando i fumi a 400-450°C, preriscaldano l'aria comburente fino a circa 1350°C.

Tali ultimi sistemi, molto più efficienti sotto il profilo energetico e nei quali le camere lavorano in modo discontinuo ed alternato, sono riconducibili alle tipologie di:

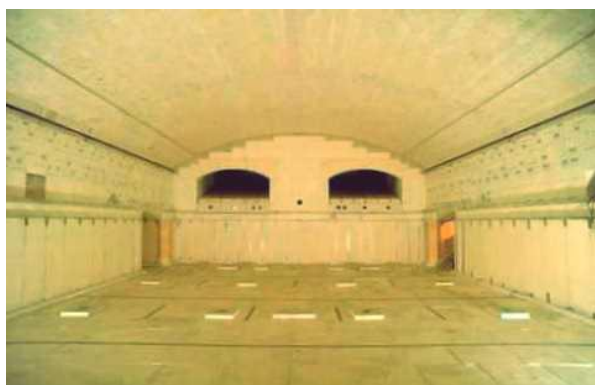
- forni con fiamma ad U e camere di rigenerazione posteriori (*end-port*);
- forni a fiamma trasversale e camere di rigenerazione laterali (*side-port*).



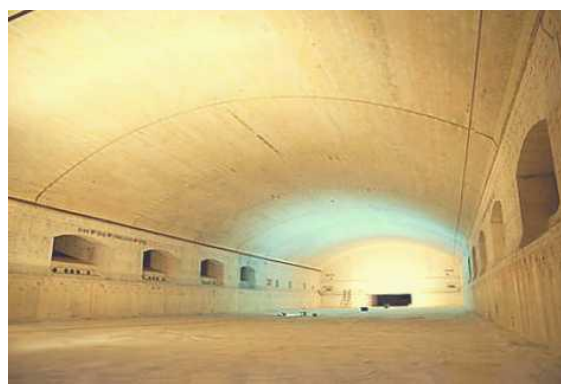
Forno con fiamma ad U (*end-port*)



Forno a fiamma trasversale (*side-port*)



Forno *end-port* - Vista interno forno vuoto



Forno *side-port* - Vista interno forno vuoto

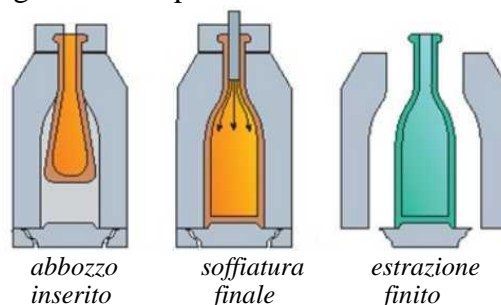
Il processo

Nella lavorazione manuale il maestro vetraio attinge il vetro all'estremità della canna da soffio fino ad ottenere, con più prelievi, la "levata" completa; segue la marmorizzazione, alternata con riscaldamenti e leggere soffiature, per dare omogeneità alla massa, raggiungere la giusta plasticità e sagomare l'abbozzo nella forma più opportuna in relazione all'oggetto che si vuole ottenere; a questo punto si procede alla pre-soffiatura ed alla formatura dell'abbozzo e successivamente all'inserimento nello stampo ed alla soffiatura.

Se la forma esterna dipende dallo stampo, la corretta distribuzione degli spessori e la qualità dell'oggetto finito dipende invece dalla fase di preparazione dell'abbozzo e dalla capacità dell'artigiano.

I contenitori in vetro cavo prodotti industrialmente si ottengono da un procedimento di soffiatura del tutto simile al procedimento manuale: si distingue una prima fase di **preparazione dell'abbozzo** ed una seconda di **soffiatura finale** che conferisce all'oggetto la sua forma definitiva.

Anche nella produzione industriale per ottenere un prodotto di qualità è infatti necessario che la goccia vitrea, prima della soffiatura finale, venga opportunamente raffreddata, sagomata e pre-soffiata.



Le fasi di produzione si possono così sintetizzare:

- Le **materie prime**, contenute in silos, vengono opportunamente dosate, miscelate e, per mezzo di nastri trasportatori, immesse nella **prima vasca** del forno fusorio dove la **miscela vetrosa** viene riscaldata e fusa a 1.400-1.600°C; in tale vasca il vetro subisce fusione ed affinamento, liberando le bolle che si formano per il rilascio di anidride carbonica.
- Il liquido fuso dalla prima vasca del forno passa attraverso una **gola sommersa** (per consentire solo il passaggio della parte più pesante del vetro priva di bolle) ad una seconda **vasca di omogeneizzazione e raffreddamento** dove la temperatura viene regolata a valori compresi fra 1050 e 1250°C, in funzione del tipo e della dimensione del prodotto in lavorazione.
- Dalla vasca di omogeneizzazione e raffreddamento si dipartono i **canali di condizionamento termico** (feeders) che provvedono a regolare ulteriormente la temperatura; a tal fine nella parte terminale di ciascun feeder sono presenti piccoli bruciatori che garantiscono al vetro in lavorazione la necessaria omogeneità termica; nel feeder il vetro può essere colorato aggiungendo vetri bassofondenti intensamente colorati (fritta), assicurando una rapida dispersione mediante agitatori, talché da un unico forno è possibile ottenere contemporaneamente manufatti incolori e di più colori diversi.
- Nella parte terminale di ciascun feeder una vaschetta munita di uno o più fori (*cuvettes*) permette la **fuoriuscita del vetro incandescente** spinto da pistoncini e che, mediante forbici, viene “tagliato” in **gocce** di dimensione e peso proporzionale all’oggetto che si vuole realizzare.
- Dopo il taglio, la goccia incandescente per caduta verticale è guidata, con opportuni canali, alle singole sezioni di **stampaggio**, anche a goccia multipla. Ogni sezione è costituita da un primo stampo, detto appunto “*stampo abbozzatore*”, e da uno “*stampo finitore*” (processo Hartford).

Il primo stampo riceve la goccia in posizione capovolta in cui la parte inferiore modella l’imboccatura. Attraverso il mandrino di testa in basso avviene la prima soffiatura, quindi l’abbozzatore si apre e l’abbozzo, sostenuto dallo stampo dell’imboccatura, viene trasferito, mediante rotazione nello stampo finitore dove avviene la soffiatura finale.

Il processo tradizionale di “formatura” di un contenitore con il procedimento “soffio-soffio” ha trovato evoluzione nel processo “*presso-soffio*”, normalmente applicato a contenitori con imboccatura di grande dimensione e solo più recentemente anche a bottiglie e contenitori con imboccatura stretta. Questa tecnologia consente di ottenere contenitori più leggeri e con migliori prestazioni meccaniche.

Il sistema “*pressato diretto*” è impiegato per la produzione di vassoi ed articoli a bocca larga.

Gli stampi industriali sono fatti di ghisa, più economici, o in acciaio, più lucidi e resistenti.

L’adesione del vetro allo stampo è contrastata mediante raffreddamento e lubrificazione.

Il raffreddamento dello stampo avviene per convezione mediante ventilazione forzata.

La lubrificazione, un tempo effettuata con oli e grassi applicati a tampone, viene attualmente eseguita mediante **grafite colloidale**, che, oltre a ridurre l’adesione, migliora la qualità della superficie del vetro e diminuisce l’ossidazione dello stampo.





Abozzi in entrata allo stampo finitore



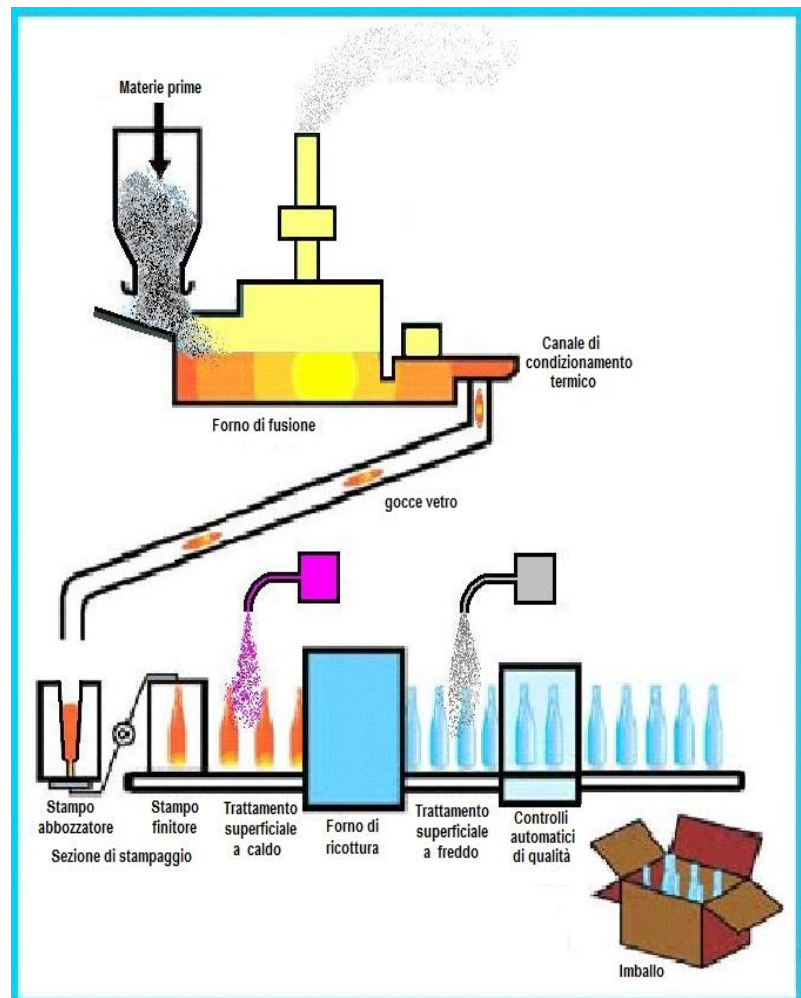
Abozzi posizionati nello stampo finitore



Bottiglie finite



Alcune tipologie di stampi per vetro cavo



Schema del ciclo del vetro cavo

- Alla formatura segue la fase di **ricottura**, procedimento di riscaldamento e successivo graduale raffreddamento dei manufatti prodotti fino a raggiungere la temperatura ambiente. Essa è finalizzata ad eliminare le tensioni che si instaurerebbero nel vetro se la superficie esterna si raffreddasse più velocemente di quella interna, evitando che questo squilibrio termico possa compromettere la resistenza meccanica dei contenitori.
- I contenitori di vetro vengono inoltre sottoposti a **trattamenti della superficie** per proteggerla dai danni derivanti da urti e abrasioni:

- un primo **trattamento a caldo**, effettuato fra formatura e ricottura, consiste nella applicazione di uno strato di ossidi metallici (generalmente *ossido di stagno* o di *titanio*) che agisce da promotore di adesione per il trattamento a freddo;
- un **trattamento a freddo**, effettuato all'uscita della ricottura, consiste nell'applicazione di un sottile strato lubrificante costituito da molecole organiche a lunga catena (*cere paraffiniche*), che rendono idrorepellente la superficie del vetro ed impediscono abrasioni e microfratture per contatto diretto vetro-vetro, riducendo il rischio di rottura in fase di imbottigliamento.



Trattamento a freddo

- Prima dell'imbottaggio, i contenitori finiti passano attraverso una sezione di **scelta** ove vengono eseguiti **controlli automatici in linea** assistiti da operatori.

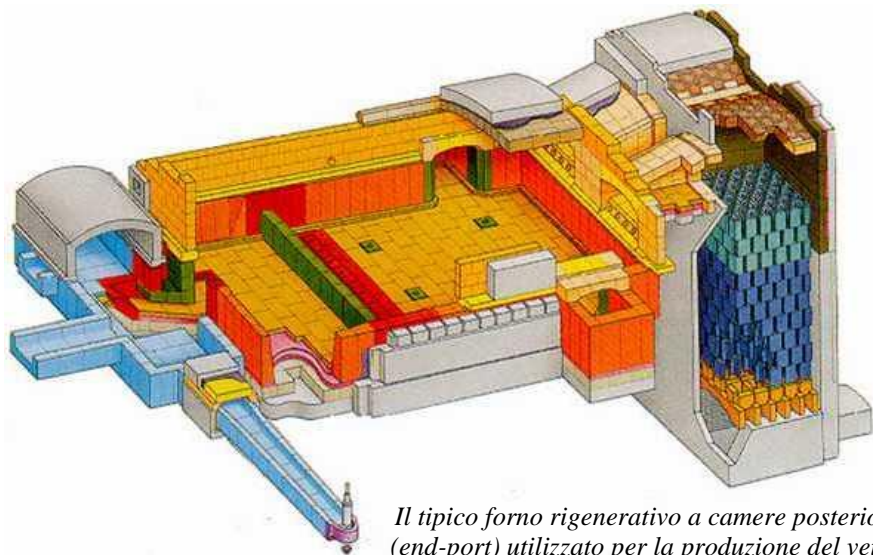
Sono impiegate macchine optoelettroniche che permettono controlli dimensionali ed il rilevamento di difetti costruttivi quali la presenza di screpolature sulla superficie, di bolle o di infusi, di irregolarità nello spessore e di deformazioni. I pezzi difettosi sono scartati e riciclati come *rottame interno*.



Controllo visivo dell'operatore



Nomenclatura delle parti della bottiglia



Il tipico forno rigenerativo a camere posteriori (end-port) utilizzato per la produzione del vetro



Il colore delle bottiglie: fattore estetico caratterizzante il prodotto ed elemento di protezione del contenuto dalla luce

6.2.3 TRASFORMAZIONE DEL VETRO CAVO

DECORAZIONE

In coda al processo o, molto più spesso, in aziende esterne specializzate, possono essere previste seconde lavorazioni di decorazione, effettuate con metodi del tutto analoghi a quelli usati per il vetro artigianale o per il vetro piano. Bottiglie, flaconi, vasi, bicchieri ed altri contenitori possono essere decorati per scopi estetici, funzionali o per dare maggiore riconoscibilità ai prodotti.

È necessario tuttavia considerare che i vari trattamenti decorativi possono indebolire la struttura del contenitore, talché è necessario valutare precisamente le caratteristiche necessarie all'impiego (per esempio la pressione di imbottigliamento per gli spumanti).

Inoltre, trattandosi nella maggior parte dei casi di contenitori per uso alimentare o farmaceutico, è indispensabile che le eventuali sostanze impiegate per la decorazione siano compatibili con le specifiche di sicurezza richieste dall'utilizzo previsto, ed, ancora, non compromettano la possibilità di riciclaggio del vetro post-consumo o lo trasformino in rifiuto pericoloso per la presenza di tossici indesiderati (acidi e/o metalli pesanti, normalmente contenuti in smalti e vernici).

- **Serigrafia:** effettuata con sistemi automatici o semiautomatici a telai piani. Dopo l'applicazione dei colori si procede alla cottura in forno, a temperature di 200-600°C per le vernici a solvente e 20-140°C per le vernici all'acqua, che, reticolando gli inchiostri, li rende indelebili. Temperature eccessive potrebbero indebolire la struttura del vetro.
- **Tampografia:** procedimento tecnico simile alla serigrafia che utilizza tamponi flessibili per trasferire un film di inchiostro da una piastra incisa (cliché) direttamente sulla superficie dell'oggetto da decorare, qualunque sia la superficie (liscia, rugosa) e la sua forma.
- **Verniciatura a polvere:** si tratta di una tecnica moderna che impiega pigmenti di ossidi inorganici in polvere e che, grazie alla bassa temperatura di cottura (80°C), non intacca o modifica il vetro.
- **Incisione:** effettuata con utensili abrasivi, con punte imbevute di *acido fluoridrico*. Si tratta di lavorazioni molto delicate giacché il trattamento provoca sulla superficie delle microfessure che possono influire negativamente sulla struttura fisica del contenitore.
- **Sabbiatura:** effettuata con un getto di sabbia a granulometria controllata che provoca una erosione della superficie del contenitore conferendo un aspetto semitrasparente e ruvido al tatto.
- **Satinatura:** produce un aspetto simile alla sabbiatura, ma meno rugoso, esponendo il vetro all'azione erosiva dell'*acido fluoridrico* o *acido cloridrico*.



6.3 TUBO DI VETRO

6.3.1 PROPRIETÀ CHIMICHE DEL TUBO DI VETRO

Il tubo di vetro trova la sua prioritaria applicazione nella realizzazione di contenitori per uso farmaceutico. In tal caso si utilizza il **vetro borosilicato**, “neutro”, impiegando materie prime scrupolosamente selezionate con caratteristiche granulometriche, titoli e livelli di impurezze costantemente tenuti sotto controllo. Inoltre, per assicurare qualità del prodotto, la pesatura dei componenti e la miscelazione deve garantire la costanza delle ricette.



Composizione chimica vetro borosilicato bianco	
SiO ₂	73%
B ₂ O ₃	11,2%
Al ₂ O ₃	6,8%
Na ₂ O	6,5%
K ₂ O	1,2%
CaO	1,2%
BaO	<0,2%

Composizione chimica vetro borosilicato ambra	
SiO ₂	70,2%
B ₂ O ₃	10,5%
Al ₂ O ₃	5,8%
Na ₂ O	5,8%
K ₂ O	1,3%
CaO	<1,0%
BaO	<2,0%
Fe ₂ O ₃	1,0%
TiO ₂	3,0%

In altre composizioni il tubo di vetro, nella moderna tecnologia, ha ulteriori svariate utilizzazioni. Dal tubo si ricavano ad esempio:

- contenitori (fiale, flaconcini) per il confezionamento di prodotti farmaceutici liquidi o solidi;
- apparecchiature medicali (siringhe) e da laboratorio (cilindri graduati, pipette, burette);
- altri strumenti di controllo come termometri medici ed industriali, densimetri, alcoolometri;
- lampade fluorescenti ed al neon;
- bulbi di alcuni tipi di piccole lampadine elettriche ad incandescenza (p.es. per automobili);
- lo zoccolo portafilamento di tutte le lampade elettriche ad incandescenza (ormai abbandonate).

Inoltre con tubi di maggior diametro si possono costruire condotte per l'industria chimica (resistenti ad attacchi chimici); con tubi di vetro di *silice* (resistente agli sbalzi termici) si possono ricoprire resistenze elettriche riscaldanti; da piccoli tubi di vetro si ricavano, per successive lavorazioni, perline o conterie, utilizzate in grande quantità per la produzione di collane e bigiotteria in genere.

Per quanto riguarda la composizione, tenendo conto delle utilizzazioni più importanti, le varie tipologie di tubi di vetro possono distinguersi in 5 categorie:

- *al piombo*, per tubi al neon e per gli zoccoli portafilamento di lampadine ad incandescenza;
- *sodico-calcici*, per apparecchiature da laboratorio, termometri, lampade fluorescenti;
- *neutri boro-silicati*, usati soprattutto per produrre contenitori farmaceutici, siringhe per iniezioni ed anche apparecchi da laboratorio;
- *boro-silicati* tipo *Pyrex*, per speciali apparecchiature da laboratorio che richiedono elevata resistenza chimica e resistenza agli sbalzi termici;
- *di silice o quarzo*, per speciali apparecchiature che richiedono elevatissima resistenza agli sbalzi di temperatura.

Per quanto riguarda l'eventuale colorazione dei tubi di vetro si distinguono due scopi:

- per taluni farmaci è necessario l'assorbimento selettivo delle radiazioni luminose; i colori più impiegati sono il *giallo-bruno* (con ossidi di ferro e titanio) e l'*ambra* (con solfuri di ferro);
- nel caso di lampade, per colorare la sorgente luminosa (in giallo le lampadine per auto, ma anche rosso, verde, blu, ecc. nel caso di vetri sodico-calcici per insegne al neon).

6.3.2 PRODUZIONE DEL TUBO DI VETRO

FABBRICAZIONE MANUALE – Canna vitrea forata

È un procedimento analogo a quello della formatura della canna vitrea, e viene ottenuta artigianalmente per soffiatura a partire da una quantità di 5-10 kg di vetro plastico prelevato dal forno in più riprese con una canna da soffio. La “levata” viene fatta ruotare su una piastra metallica (marmorizzazione), leggermente soffiata e alternativamente riscaldata in forno fino a raggiungere la giusta plasticità e l’omogeneità della temperatura nella massa e la forma di un tronco di cono allungato. Contemporaneamente con una canna non forata (puntello) viene prelevata una piccola quantità di vetro che, leggermente raffreddata, viene attaccata all’altra estremità del “pastòn”.



Ora inizia la tiratura del tubo: l’operaio con la canna forata soffia e ruota la canna, l’altro operaio si allontana pian piano per molte decine di metri tirando il puntello a formare il tubo, un terzo operaio controlla il calibro del tubo e via via lo raffredda con una ventola. Il tubo di vetro raggiunta la rigidità, viene appoggiato a terra su listelli di legno e successivamente tagliato in spezzoni della lunghezza voluta.

La qualità del tubo ottenuto (costanza di diametro e spessore, buona rotondità) dipende dall’abilità degli operatori nel preparare la massa vitrea e nell’ eseguire la soffiatura/tiratura.

PRODUZIONE MECCANICA

I metodi moderni di produzione industriale si basano su due processi di “estrusione” molto simili:

- **sistema Danner**, a sviluppo semiorizzontale mediante mandrino cavo rotante,
- **sistema Vello**, a sviluppo verticale, dall’alto in basso, con soffiatura attraverso un ugello.

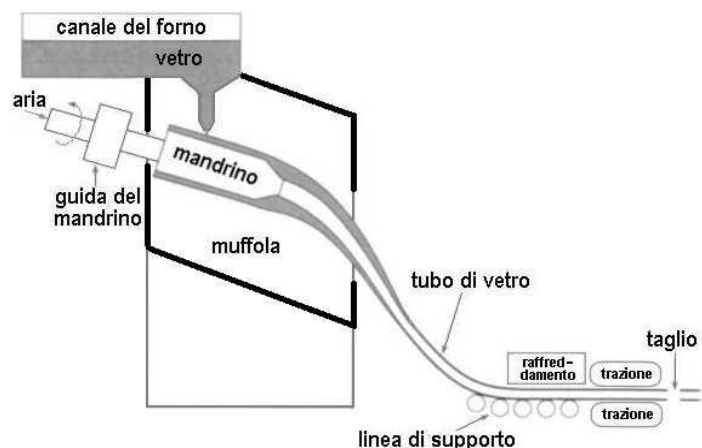
Sistema Danner

È un processo automatico preciso e flessibile per la produzione di tubi in vetro con diametri da 5 a 50 mm e spessore da 0,2 a 4 mm.

La macchina *Danner* è formata da un mandrino rotante in una muffola di formatura ed inclinato 12-20°, attorno al quale viene fatto colare dal feeder un flusso continuo di vetro fuso alla giusta temperatura e nel quale viene effettuato il soffiaggio di aria.

Il tubo incandescente, ma già formato e di adeguata consistenza, è “tirato” qualche decina di metri (50 ÷ 100 m) attraverso la sezione di lento raffreddamento sostenuto e guidato da rulli di grafite, fino alla sezione di tiro e taglio.

Il bilanciamento dell’intero processo è garantito dal controllo dell’aria di soffiaggio attraverso l’asse del mandrino e dalla regolazione della velocità della macchina tiratrice.



Sistema Vello

È un processo molto simile al *Danner* ed è indicato per produrre tubi più grandi, con diametro fino a 180 mm e con spessori fino a 20 mm.

Il tubo si forma per caduta del vetro fuso da un foro realizzato nel canale di adduzione, all’interno del quale è presente un mandrino conico rotante, regolabile in altezza per controllare l’apertura, attraverso cui cola il vetro. Il mandrino si prolunga verso l’alto con un tubo in acciaio che permette l’introduzione dell’aria di soffiaggio per formare e regolare la dimensione del foro, mentre la regolazione dello spessore viene eseguita mediante l’innalzamento/abbassamento del mandrino.

La tiratura ed il taglio avvengono come nel processo *Danner*.

6.4 FIBRE DI VETRO

Fin dalla sua invenzione si è rilevato che il vetro fuso si presta ad esser facilmente stirato in filamenti continui o in fibre corte (fiocco o lana di vetro). Tuttavia la produzione di fibre di vetro è relativamente recente ed avviene esclusivamente su base industriale: con un chilo di vetro si ottengono 4.000 km di filo del diametro di 1 micron.

In funzione degli impieghi e delle prestazioni richieste, le fibre di vetro sono prodotte a partire da vetri con caratteristiche chimico-fisiche diverse. I più usati sono:

- **Vetro E** (*alluminoborosilicato di calcio*), il più comune, usato, da solo o in combinazione con resine sintetiche o verniciate, per le sue **proprietà dielettriche** e l'elevata **resistenza chimica**. È utilizzato sia nell'industria tessile, sia per la fabbricazione di materiali compositi (vetroresina).
- **Vetro AR**, contenente molto ossido di zirconio e particolarmente **resistente agli alcali ed alla corrosione**, è stato concepito come materiale rinforzante per il cemento; viene impiegato in sostituzione dell'amianto per la produzione di pannelli, rivestimenti e componenti per l'edilizia.
- **Vetro R**, ad **elevata resistenza meccanica**, è stato creato per la fabbricazione di materiali soggetti a sollecitazioni nei settori dell'aviazione, dell'industria spaziale e degli armamenti; attualmente trova applicazione anche nell'industria dello sport, del tempo libero e dei trasporti.
- **Vetro D**, possiede **ottime proprietà dielettriche** ed è impiegato per la produzione di materiali compositi a bassa permeabilità alle onde elettromagnetiche, di componenti ad elevato rendimento elettrico, di finestre elettromagnetiche e circuiti stampati ad alte prestazioni.
- **Vetro C** (*borosilicato di sodio e calcio*), **resistente alla corrosione** ed impiegato per rivestimenti esterni anticorrosione, per tubature o tubi composite, per l'**isolamento** (lana di vetro).

Per la produzione delle fibre di vetro la miscela vetrificabile viene fusa a temperature comprese fra 1.400 e 1.550°C, omogeneizzata, attentamente affinata e successivamente estrusa (a 1250°C) e stirata per ottenere filamenti continui o fibre corte.

6.4.1 Vetro Tessile

Il vetro tessile viene fabbricato a **filamento continuo** multibave (*Single strand roving*), oppure a **filamento discontinuo**, cioè a fiocco, facilmente filabile.

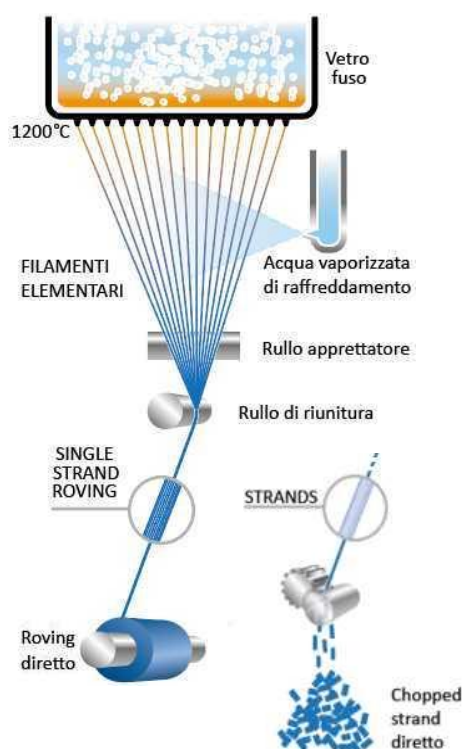
Il filo continuo può essere macinato (*Chopped strand*) per essere impiegato come rinforzo di polimeri, per la produzione di materiali compositi e nei mastici.

Il filo base è ottenuto con la tecnica del **fibraggio** che prevede la stiratura del vetro fuso che scorre ad alta velocità attraverso i fori della filiera.

Per la produzione del **filamento continuo** il vetro fuso è estruso attraverso filiere di *platino-rodio* dotate di 400-8000 ugelli con fori da 1-2 mm e stirato meccanicamente per avvolgere i fili su tamburi rotanti ad alta velocità.

Il vetro tessile in fiocco, a **filamento discontinuo**, viene ottenuto investendo il filetto di vetro fuso uscente dalla filiera con un getto di vapore surriscaldato in modo che le bave prodotte vengano avvolte su tamburi rotanti.

In entrambi i casi le fibre di vetro tessile hanno spessori variabili fra 3 e 30 micron, e, per favorirne l'agglomerazione in filatura e migliorarne la lavorabilità e l'adesione con le matrici sintetiche dei materiali compositi, all'uscita dalle filiere e dopo un primo raffreddamento vengono sottoposte ad **apprettatura** con sottili film di prodotti appositamente formulati (**sizing**), normalmente a base di *silani* e *composti organici* lubrificanti in base acquosa.



Le singole fibre apprettate vengono raggruppate in uno o più fasci (di 100-150 fibre elementari), producendo la fibra primaria chiamata **strand**, la cui dimensione è identificata dal titolo in *Tex* (grammi per chilometro di fibra).

Lo *strand* viene quindi definito sia dal diametro del singolo filamento (micron) che dal titolo (tex).

Lo *strand* viene poi avvolto in una bobina (detta **cake** o *manichetta*) che, dopo una fase di essiccamento, può essere utilizzata direttamente, ovvero trasferita a **secondo lavorazioni** per ottenere i prodotti derivati:



Prodotti di seconda lavorazione da "cake"

- **Roving assemblati** (*Multi end roving*)
- **Chopped strands** (*Fibre tagliate*)
- **Filati tessili** (*Yarns*).

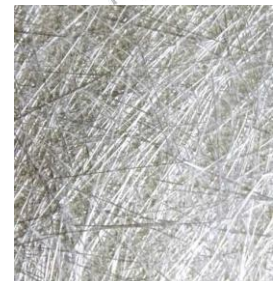
I **Roving assemblati** sono ottenuti semplicemente raggruppando più *strand* opportunamente apprettati fino a raggiungere il titolo desiderato. Sono impiegati prevalentemente nella produzione di cisterne, recipienti, tubazioni, profili ed ondulati in vetroresina, nonché per feltri, stuoie e preimpregnati.



I **Chopped strands** sono ottenuti per taglio (anche diretto) degli *strands* con lunghezze comprese fra 2 e 25 mm e sono impiegati per il rinforzo di resine termoindurenti (per masse da stampaggio mediante compressione o iniezione) e resine termoplastiche (per compound di tecnopolimeri lavorati mediante estrusione).



Utilizzando *Chopped strand* tagliati in lunghezza di 5 cm, distribuiti uniformemente in ordine sparso su un piano senza orientamento preferenziale e legati con un appretto (*binder*) solubile nella matrice da rinforzare, vengono prodotti i cosiddetti **MAT tagliati**; si tratta di feltri più o meno spessi (da 80 a 900 g/m²) impiegati come rinforzo di eccellenza nella stratificazione manuale per la realizzazione di manufatti in vetroresina ed in particolare nel settore nautico.



Una variante sono i **MAT cuciti** (*stitch bonded mat*) in cui il legante è sostituito da cuciture con fili poliestere.

Essi hanno una più ridotta deformabilità, ma risultano di più rapida impregnazione per assenza del legante; oltre che per lavori manuali, vengono impiegati in poltrusione, centrifuga, infusione e stampaggio.

I **Filati tessili** sono ottenuti per ritorcitura (28-40 giri/metro) ed opportuna apprettatura di *strand* a basso titolo per conferire al filato la regolarità e la resistenza necessarie a sopportare le successive operazioni di tessitura, trecciatura ed eventuale ulteriore ritorcitura. Con una ritorcitura si ottengono titoli da 2,8 tex a 544 tex; per titoli superiori si ricorre ad una seconda torcitura di filati ritorti.

I filati ritorti sono impiegati nella produzione di nastri e di tessuti (*yarn fabrics*).

Filati e tessuti di vetro sono impiegati e molto apprezzati nei settori dell'arredamento, della tappezzeria, dei tendaggi, nonché quale rinforzo nella produzione di materiali compositi (vetroresina).



6.4.2 Lana di vetro o lana di roccia

È un ammasso fibroso abbastanza grossolano ottenuto mediante violenti getti d'aria su colate di vetro e sabbia o altro materiale roccioso fuso (basalto), la cui coesione e la tenuta meccanica sono conseguite con l'impiego di leganti che incollano tra loro le fibre; il tappeto fibroso viene in seguito nuovamente riscaldato a 150-200°C per la polimerizzazione delle resine e quindi calandrato per dare stabilità e migliorare la resistenza.

Segue il taglio e l'imballaggio della lana in forma di rotoli o pannelli, ampiamente utilizzati come coibente termico ed isolante termoacustico nell'edilizia ed in altre applicazioni industriali (frigoriferi, forni, stufe).

Attualmente, per ridurre i rischi connessi con la respirazione di particelle fibrose, vengono utilizzati vetri biocompatibili, che nei polmoni si sciolgono senza provocare danni.



Materassino di lana di vetro



Lana di vetro rivestita di alluminio



Lana di roccia pannelli e materassino

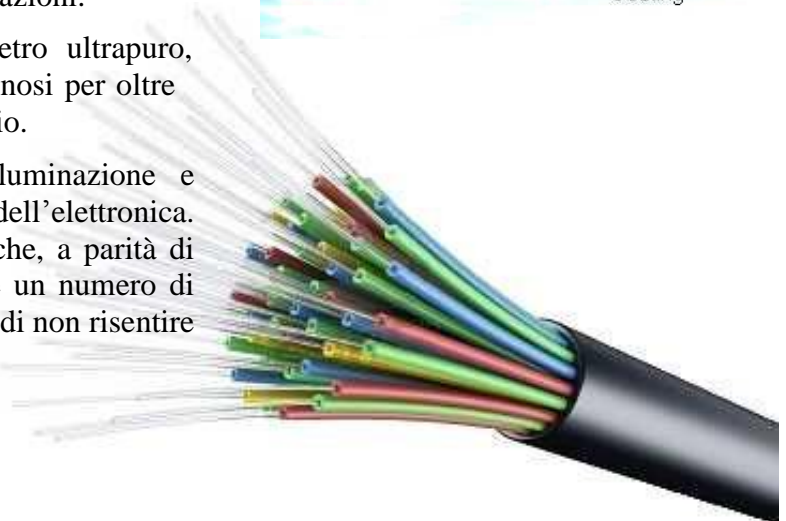
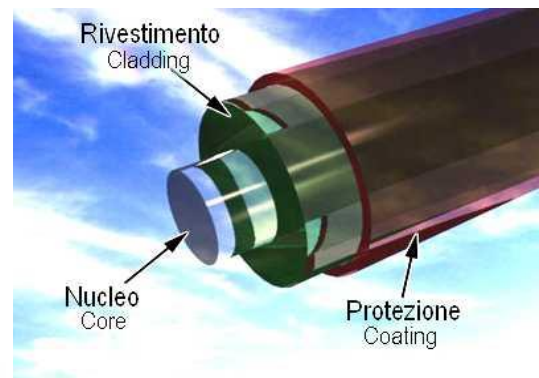
6.4.3 Fibre ottiche

Di diametro pari a 125 μm , sono costituite da una parte centrale (*core*) in vetro ad elevato indice di rifrazione (vetro di *silice* drogato con *germanio* e terre rare), rivestita con una guaina di vetro di *silice* (*cladding*), meno rifrangente, il tutto avvolto da una guaina di protezione (*coating*).

All'interfaccia fra i due vetri avviene una riflessione totale della luce, talché il raggio luminoso che penetra da un'estremità, per riflessioni successive, si propaga lungo la fibra senza significative attenuazioni.

Le attuali fibre ottiche, fatte con vetro ultrapuro, consentono di trasmettere segnali luminosi per oltre 100 km senza apparecchiature di rilancio.

Sono impiegate, oltre che per l'illuminazione e l'arredo, in vari campi dell'ottica e dell'elettronica. Rispetto ai cavi di *rame*, le fibre ottiche, a parità di diametro, sono in grado di trasportare un numero di informazioni enormemente superiore e di non risentire di interferenze elettriche e magnetiche.



6.5 VETRI SPECIALI

Vengono considerati **vetri speciali** sotto il profilo produttivo quei tipi di vetro reperibili in commercio, di solito fabbricati in piccoli stabilimenti, che si riferiscono a settori merceologici diversi da quelli finora considerati (vetro piano, vetro cavo, tubo di vetro, fibre di vetro).

6.5.1 VETRI PER OTTICA

Appartengono a questo gruppo tutti i vetri che sono impiegati nella costruzione di dispositivi ottici.

Vetri per lenti

Convenzionalmente i vetri per lenti sono suddivisi in vetri **Crown** (*sodico-calcici*) e in vetri **Flint** (al *piombo*), caratterizzati da un diverso indice di rifrazione e della dispersione ottica.

Oltre a questi tipi di vetri se ne conoscono altri ottenuti con l'impiego di ossido di *lantanio*, di *torio* e *tantalio*.

Vetri trasmettenti le radiazioni UV e IR

Per la fabbricazione di vetri trasmettenti i raggi ultravioletti (UV) si utilizzano vetri di quarzo e vetri estremamente puri ed esenti da *ferro*, *piombo*, *titanio* e *cerio*, che riducono la trasmissione nell'UV.

Per una buona trasmissione delle radiazioni infrarosse (IR) sono impiegati gli *alluminati di calcio* ed i *calcogenuri*, vetri esenti da *ossigeno*, a base di *arsenico-zolfo-selenio*. Questi ultimi si usano per dispositivi idonei alla visione notturna per usi sia civili che militari.

Vetri selettivi

Sono vetri dotati di assorbimento selettivo in una particolare banda delle lunghezze d'onda:

- vetri contenenti uno o più ioni coloranti che assorbono le radiazioni visibili;
- vetri comuni o vetri al *piombo* che assorbono le radiazioni UV;
- vetri contenenti *anidride borica* e *fosforica* assorbenti le radiazioni IR.

Vetri per laser

Sono vetri di tipo *sodico-calcico* e *borosilicati* a base di *ossido di lantanio* e *torio*, drogati con elementi come *neodimio* e *itterbio*, in grado di emettere un fascio di luce monocromatica quando sono esposti ad una sorgente luminosa (effetto laser).



6.5.2 VETRI SENSIBILI ALLE RADIAZIONI

Appartengono a questo gruppo i vetri che hanno la proprietà di colorarsi più o meno intensamente quando vengono esposti a radiazioni di varia natura, detti anche **vetri cromogenici**.

Vetri fotocromici (o fotocromatici)

Sono vetri che hanno la proprietà di scurirsi quando sono esposti a raggi visibili e UV ed hanno un comportamento opposto al cessare dell'esposizione.

La principale applicazione è nella fabbricazione di lenti per occhiali da sole che si oscurano alla luce.

Il processo fotocromatico si basa sulla decomposizione reversibile di microcristalli di *alogenuri di argento* (*cloruri*, *bromuri*, *ioduri*), presenti come fase dispersa in una matrice d'un particolare vetro.

Analoghi sono i **vetri termocromici** che si colorano all'aumento della temperatura.



Vetri elettrocromici (o elettrocromatici)

Sono materiali in via di sviluppo nei quali l'effetto fotocromatico può essere controllato e comandato attraverso la corrente elettrica, cosicché l'effetto fotocromatico tradizionale può essere inibito nella stagione invernale mantenendo la vetrata trasparente, con grande vantaggio sotto il profilo energetico.

Sono allo studio vetri in grado di perdere la trasparenza trasformandosi in vetri opachi o in specchi.

Vetri fotosensibili

Sono vetri nei quali la sensibilità alla luce visibile o ultravioletta è irreversibile e viene attivata per produrre decorazioni in policromia o microcircuiti stampati nei quali all'interno del vetro vengono ricavate figure complesse e finemente dettagliate non altrimenti ottenibili con processi diversi.

Vetri protettivi

Sono vetri, destinati alle applicazioni nucleari, che contengono un elevato tenore in ossido di bario e terre rare oppure in ossido di piombo (fino ad oltre il 70% in *PbO*). Tali vetri vengono utilizzati per schermi e finestre per l'osservazione delle camere contenenti materiale radioattivo.

6.5.3 VETRI REFRAATTARI

Sono vetri che hanno una temperatura di ricottura superiore a quella dei vetri comuni e comunque non inferiore ai 700°C. Tra essi il più conosciuto è il **vetro di silice** che si ottiene per fusione, a oltre i 2000°C, di *quarzo* purissimo. La sua temperatura di ricottura varia, in dipendenza dalla purezza, tra i 1020 e 1200°C e presenta una resistenza agli sbalzi termici ed alla trasmissione ottica più elevata di tutti gli altri vetri.

Un surrogato commerciale altrettanto resistente, ma con temperatura di fusione e di ricottura più bassa, è il **Vycor** al 96% di *silice* e con piccole quantità di *anidride borica* ed *ossido di sodio*.

Altri vetri refrattari, resistenti a temperature superiori rispetto ai *borosilicati*, sono i vetri **alluminati** ed **allumino-silicati**.



6.5.4 VETROCERAMICHE

Le vetroceramiche sono materiali molto più resistenti del vetro comune e sono ottenute con un particolare raffreddamento che determina una fase vetrosa nella quale sono dispersi i microcristalli.

Vengono impiegate per realizzare materiali molto sollecitati (come lo scudo delle navette spaziali), per corone dentarie con effetto estetico molto migliore delle tradizionali porcellane, per piani cottura, per pentole e tegami trasparenti, come strato vetroso della piastrelle di pavimenti soggetti a grande usura.



6.5.5 BIOVETRI

Sono vetri che per composizione chimica mostrano elevata biocompatibilità con il tessuto cellulare e predisposizione per la formazione di un legame biologico e diretto con il tessuto osseo.

È costituito da *silice*, *ossido di calcio*, *ossido di sodio* e *anidride fosforica*; trovano applicazione in ortopedia come materiale da impianto e per ossa artificiali ed in ortodonzia per protesi dentarie.

7. VETRO E AMBIENTE

Il vetro è il materiale più adatto nella produzione di contenitori destinati all'uso alimentare e per l'industria conserviera.

Infatti, il contenitore in vetro può essere sterilizzato senza modificare la soluzione ed i prodotti contenuti.

È un materiale sicuramente **igienico**, non contiene sostanze tossiche ed è molto resistente al deterioramento. Anche le ridottissime quantità di componenti che possono sciogliersi e ritrovarsi nei prodotti contenuti sono elementi assolutamente inerti ed atossici, comunemente presenti anche nelle acque minerali, come *sodio*, *calcio* e *silice*.

Pure nei confronti dell'ambiente il vetro è un materiale **inerte** e privo di tossicità, che lentamente si trasforma in *silicati*. Inoltre è un materiale ideale per inertizzare componenti pericolosi che possono essere inglobati e bloccati nella struttura del vetro.

È un materiale completamente **riciclabile**, che a differenza di altri materiali può essere rifuso infinite volte, conservando le sue proprietà.



Il **riciclo del vetro** con l'utilizzo di rottame vetroso nella miscela vetrificabile è un **processo ecologico** in tutti i suoi aspetti:

- **riduce la quantità di rifiuti** da trattare o gettare in discarica, consentendo, oltre a ridurre il danno ambientale, un risparmio sui costi di trasporto e smaltimento dei rifiuti;
- **riduce la quantità di materie prime** poiché 1 t di rottame rifuso sostituisce 1,2 t di materie prime vergini, diminuendo i danni all'ambiente derivanti dallo sfruttamento delle cave;
- **riduce il consumo di energia** poiché l'abbassamento della temperatura di fusione permette di risparmiare circa 100 kg di combustibile per ogni tonnellata di rottame rifuso.

Il rottame di vetro viene prodotto dai centri di trattamento che provvedono allo svuotamento delle campane per la **raccolta differenziata del vetro**, alla selezione per colore, alla separazione di materiali estranei contaminanti (metalli, ceramica), alla pulizia ed alla macinazione, trasformandolo in materia prima per la fusione.

Oltre al risparmio di energia il riciclo del vetro, con l'impiego di rottame nella fusione, riduce anche l'inquinamento atmosferico e le emissioni di gas serra (*anidride carbonica*) dovute sia ai gas di combustione, sia alla decomposizione dei *carbonati* presenti nelle materie prime. Nel settore del vetro cavo in alcune produzioni nella miscela vetrificabile viene impiegato fino al 90% di rottame.

Non tutto il vetro viene riciclato mediante rifusione (schermi TV, vetro colorato del settore automobilistico, cristallo, lampadine, specchi, ...), ma potrebbe trovare comunque altri impieghi ove non è richiesto un elevato grado di purezza, come nella produzione di fritte ceramiche, di fibre di vetro per l'isolamento termico, come additivo nella produzione di asfalti, ecc..

La ricerca è attualmente orientata ad ampliare la possibilità di riciclo a tutte le tipologie di vetro.

7.1 RACCOLTA E RICICLO DEL VETRO

Nel 2016 la **raccolta differenziata del vetro** in Italia è arrivata a circa **1.864.000 t**, con un incremento del 2,1% rispetto al 2015. La resa nazionale pro capite è passata da 30 kg/ab del 2015 a **30,7 kg/ab** del 2016.

Nel 2016 il consumo di vetro riciclato da raccolta differenziata dei rifiuti solidi urbani (**rottame ecologico**) da parte dell'industria vetraria italiana è pari a circa **1.687.500 t**, a fronte di un immesso al consumo totale di vetri per imballaggio di circa **2.364.052 t**; in tal modo le percentuali di riciclo (rapporto fra il riciclato e l'immesso al consumo) si sono attestate attorno al **71,5%**, rispetto al 70,9% del 2015.

Questo rottame, opportunamente trattato, è utilizzato prevalentemente per la produzione di vetro cavo mezzo bianco o colorato secondo proporzioni variabili che, in alcuni casi, possono superare l'80% in peso sul totale della miscela vetrificabile.

La raccolta interessa soprattutto il vetro cavo e proviene in parte dalla **raccolta differenziata** dalle campane distribuite nei vari centri abitati ed in parte dalla **raccolta selettiva** effettuata presso comunità, centri commerciali, attività produttive.

Il vetro proveniente dalla raccolta differenziata non può essere riciclato tale e quale, ma deve essere sottoposto a diversi trattamenti volti soprattutto ad allontanare le quantità, anche rilevanti, di impurità che spesso contiene (carta, plastica, materiali ceramici, materiali metallici ferrosi e non). I sistemi di selezione tipologica, di depurazione da corpi estranei e di riduzione a pezzatura omogenea comprendono diverse fasi, sia manuali, sia, in gran parte, automatizzate.

Dapprima vengono allontanati i corpi estranei di dimensioni relativamente grandi e separati i contenitori di diverso colore; successivamente un lavaggio con acqua provvede ad eliminare sostanze diverse (carta, sughero, plastica, terriccio, ecc.).

I materiali metallici ferrosi vengono allontanati mediante dispositivi magnetici, mentre quelli non metallici si eliminano, almeno in parte, manualmente.

Il prodotto viene quindi macinato e sottoposto a vagliatura (per trattenere le parti estranee non sminuzzate), ad aspirazione con aria (per allontanare le impurità leggere), ad ulteriore deferrizzazione (con magneti per separare i componenti ferrosi) e con *metal detector* (per separare quelli non magnetici).

Dopo questi trattamenti, che possono essere ripetuti più volte, le impurezze (inerti, materiali ceramici, metalli) si riducono a quantità inferiori all'1%. Infatti è molto importante conoscere e controllare le caratteristiche di qualità del rottame di vetro, soprattutto laddove il rottame costituisce una significativa percentuale della miscela vetrificabile.

Eccessive impurezze nel rottame possono causare i seguenti problemi in fase di fusione:

- infusi nel vetro, dovuti dalla presenza nel rottame di materiali metallici ferrosi e non ferrosi (questi ultimi responsabili anche di fenomeni di corrosione nel forno), ceramici e refrattari;
- difficoltà nel controllo della fusione come conseguenza della presenza di inquinanti organici;
- presenza di altri inquinanti, quali gli alogenuri (*fluoro*) e i metalli pesanti (*piombo, cadmio, mercurio, cromo, ...*) che, oltre ad essere controindicati per la produzione di vetro per uso alimentare, tendono ad evaporare ed a peggiorare la qualità delle emissioni in aria.



8. LE M.T.D. NEL SETTORE VETRARIO – (B.A.T.)



BRef GLS 2013 - Best Available Techniques (BAT) Reference – Document for the Manufacture of Glass

Ai sensi della **Direttiva 2010/75/UE – IED** del 24 novembre 2010 (sostitutiva delle precedenti direttive 2008/1/CE – IPPC, e 96/61/CE), fra gli altri, sono sottoposti ad Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA) i seguenti impianti facenti parte del gruppo 3. *Industria dei prodotti minerali*:

- 3.3. **Fabbricazione del vetro** compresa la produzione di fibre di vetro, con capacità di fusione di oltre 20 Mg al giorno;
- 3.4. **Fusione di sostanze minerali** compresa la produzione di fibre minerali, con una capacità di fusione di oltre 20 Mg al giorno.

Testo inglese	3.3. Manufacture of glass including glass fibre with a melting capacity exceeding 20 tonnes per day
originale	3.4. Melting mineral substances including the production of mineral fibres with a melting capacity exceeding 20 tonnes per day

Il **BRef (BAT Reference) sulla lavorazione del vetro del 2013** è il risultato della revisione, iniziata nel 2006, del documento **BRef originale adottato dalla Commissione Europea del 2001**.

Le **Conclusioni sulle migliori tecniche disponibili**, contenute nel capitolo 5 del BRef 2013, sono state adottate con la **Decisione della Commissione 2012/134/UE del 28 febbraio 2012**, pubblicata sulla *Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea* dell'8 marzo 2012 (**BATC – BAT Conclusions**).

Rimangono le **Linee Guida** nazionali per il settore vetrario adottate con il **D.M. 29 gennaio 2007**.

8.1 GENERALITÀ DEL SETTORE VETRARIO

8.1.1 Gli impatti

Le maggiori sfide ambientali del settore vetrario sono gli elevati **consumi energetici** e l'inquinamento dovuto alle **emissioni in atmosfera** (soprattutto *polveri, NO_x, SO_x*).

Meno importanti sono gli impatti sull'**acqua** (scarichi di acque di raffreddamento), per quanto riguarda i **rifiuti** (in massima parte riciclati nel processo di fusione) o connessi al **consumo di risorse naturali**, abbondantemente presenti in natura (*sabbie silicee, feldspati, dolomite, carbonato di calcio*) o prodotte chimicamente (*carbonato e solfato di sodio*).

Per quanto riguarda l'**inquinamento acustico**, l'industria del vetro è attività tendenzialmente molto rumorosa per gli ambienti di lavoro, ma non per l'ambiente esterno se situata in area produttiva.

8.1.2 Tecnologie ed impiantistica

Tipologia vetro	Tipologia Forno	Dimensione/produttività	Durata forno	Temperature
Vetro piano	Forno a bacino a metano side-port	float 300–400 m ² ; 600–700 t/d stampato/pressato 150–200 t/d	10 – 12 anni	fusione ~1600 condiz. ~1100 ricottura 550
Vetro cavo	Forno a bacino UM s-p e-p a metano (+boosting elettrico)	10–150 m ² ; 20–500 t/d pressato diretto, soffiato/soffiato, pressato/soffiato	8 – 10 anni	fusione 1400–1600 condiz. 1050–1250 ricottura 550
Tubo Borosilicato	Forno a bacino elettrico o U-M	10 – 40 t/d manutenzioni ogni 18 mesi	8 – 10 anni	fusione 1500(elettrico) fusione 1625(metano)
Lana Borosilicato	Forno a bacino elettrico o U-M	Filieri rotanti spruzzatura e cottura resine (fenoliche, ureiche o melaminiche)		fusione 1400 (elettrico) fusione 1450 (metano)
Filamento Borosilicato	Forno a bacino Unit Melter	Filieri statiche in platino apprettatura con polimeri organici, lubrificanti e reticolanti		fusione 1500
Vetro al piombo	Forno a bacino elettrico	Processo come vetro cavo con lucidatura finale eventualmente preceduta da taglio e molatura		fusione 1350-1450
Vetro artistico	Crogiolo/i - vasca a metano	crogiolo 10–700 kg vasca 500–2000 kg	5 – 10 mesi	fusione 1400 lavorazione 1050

8.1.3 Materie prime

Prodotto	Materie prime vergini		Rottame
Vetro piano	Vetrificanti Fondenti Stabilizzanti Affinanti	sabbie silicee adeguatamente trattate e purificate; <i>Na carbonato</i> ; <i>silico-alluminati di Na e/o di K, Ca carbonato, Ca Mg carbonato</i> (dolomite); <i>Na solfato, Ca solfato</i> , e talora <i>Na nitrato</i> , carbone, (loppe di altoforno).	Rottame interno (scarti di produzione)
Vetro cavo	Vetrificanti Fondenti Stabilizzanti Affinanti	sabbie silicee adeguatamente trattate e purificate; <i>Na carbonato</i> e piccole quantità di <i>K carbonato</i> ; <i>allumina, silico-alluminati Na e/o di K, Ca carbonato, Ca Mg carbonato</i> (dolomite), <i>Ba carbonato</i> ; <i>Na solfato, Ca solfato, Na nitrato o K nitrato</i> , carbone, loppe di altoforno.	Rottame da RD Rottame interno (scarti di produzione)
Borosilicato Tubo	Vetrificanti Fondenti Stabilizzanti Affinanti	sabbie silicee trattate e purificate, sabbie feldspatiche, prodotti borici; <i>Na carbonato</i> e piccole quantità di <i>K carbonato</i> ; <i>allumina, silico-alluminati di Na e/o di K, Ca carbonato, Ba carbonato</i> ; <i>Na nitrato</i> ed in piccola quantità composti del <i>fluoro</i> e del <i>cloro</i>	Rottame interno (scarti di produzione)
Borosilicato Lana Filamento	Vetrificanti Fondenti Stabilizzanti Affinanti	sabbie silicee trattate e purificate, sabbie feldspatiche, prodotti borici; <i>Na carbonato</i> ; caolino, <i>Ca carbonato, Ca Mg carbonato</i> (dolomite); <i>Na solfato</i> , o <i>Na nitrato</i> ed, in alcuni casi, composti del <i>fluoro</i> .	Rottame interno (scarti di non trattati con appretti) Rottame da RD (solo per lana)
Vetro al piombo	Vetrificanti Fondenti Stabilizzanti Affinanti	sabbie silicee trattate e purificate ed, in minima parte, prodotti borici; <i>Na carbonato</i> e <i>K carbonato</i> ; <i>ossidi di piombo</i> ed, in piccole quantità, <i>Ba carbonato</i> ; <i>Na nitrato, K nitrato</i> e modesti tenori di <i>ossido di antimonio</i> .	-
Vetro artistico	Vetrificanti Fondenti Stabilizzanti Affinanti Coloranti Opacizzanti	sabbie silicee trattate e purificate ed, in minima parte, prodotti borici; <i>Na carbonato</i> e <i>K carbonato</i> ; <i>Ca carbonato</i> (marmo), <i>Ca Mg carbonato</i> (dolomite), <i>allumina idrata</i> ; <i>Na nitrato, K nitrato, anidride arseniosa, Sb ossido, CaF</i> (spatofluore); <i>cobalto, rame, nichel, ferro, cromo, manganese, neodimio, selenio, erbio, cadmio, titanio, oro, argento</i> ; Spatofluore, <i>Na fluosilicato, ossido di piombo</i> (minio), <i>arsenico</i> .	-

8.1.4 Uso di prodotti chimici ausiliari e trattamenti secondari

Tipologia vetro	Trattamento - prodotto	Note
Trattamenti a caldo dopo formatura		
Vetro piano	Trattamento superficiale con SO ₂	Miglioramento resistenza chimica agli agenti atmosferici
Vetro cavo	Deposizione strato (0,01 µm) di ossido metallico (<i>stagno</i> o <i>titanio</i>)	Miglioramento resistenza meccanica agli urti
	Trattamento con SO ₃ (da ossidazione catalitica di SO ₂ o decomposizione <i>solfato d'ammonio</i>)	Miglioramento resistenza chimica (vetro farmaceutico)
Vetro artistico	Trattamento con sali di <i>stagno</i> o con miscele di minerali	Trattamento all'iride (con vapori di <i>cloruro stannoso</i>) "Vetro scavo" (<i>Na Bicarbonato, K Nitrato, Ti Ossido</i>)
Trattamenti a freddo dopo ricottura		
Vetro cavo	Vaporizzazione di <i>acido oleico</i> o spruzzatura di emulsioni acquose a base di <i>polietilene</i>	Trattamento antifrizione per contenitori riempiti più volte (vuoti a rendere)
Trattamento di apprettatura di lane e filati di vetro		
Vetro borosilicato Lane e filati	Dispersione acquosa di resine fenoliche, poliestere o ureiche, lignina, silano, acetati di polivinile, ammoniacca ed eventuali coloranti.	Apprettatura con resine termoindurenti (per tenere legate le fibre) e successivo trattamento in forno continuo di essiccazione e reticolazione
Altri processi secondari		
Tutti i vetri	decorazione con smalti vetrificabili, satinatura per acidatura o per sabbatura, accoppiamento delle lastre per vetri di sicurezza, deposizione di metalli per la produzione specchi, serigrafia per l'identificazione dei prodotti	Lavorazioni generalmente effettuate da aziende esterne ai siti di produzione

8.2 LE TECNOLOGIE IMPIEGATE NEL SETTORE VETRO CAVO

8.2.1 Aspetti tecnici e tecnologici specifici del settore

In questa sezione si riassumono i principali aspetti tecnici e tecnologici relativi al settore del **vetro cavo** di produzione industriale.

La definizione di *Vetro cavo* comprende sia i contenitori per alimenti (bottiglie, vasi, ecc.), sia contenitori più piccoli per profumeria, cosmetici, ecc..

In funzione del tipo di vetro e della qualità richiesta vengono impiegati forni di tipologia e capacità sostanzialmente diversa, da un minimo di 20 t/giorno fino a oltre 500 t/giorno.

Le tipologie di forno utilizzate per la fusione del vetro cavo sono i seguenti:

1. Forni a recupero di calore (*Unit Melter*), caratterizzati da minori costi di investimento ma minore efficienza energetica.
2. Forni a rigenerazione (*End-Port* e *Side-Port*), caratterizzati da più alti costi di investimento, elevata efficienza energetica ed maggiore capacità produttiva.
3. Forni elettrici, caratterizzati da elevati costi di gestione, ridotta flessibilità, basse capacità produttive, ma emissioni molto contenute. A causa dei costi elevati, sono impiegati solo per prodotti in vetro ad alto valore aggiunto.

Il vetro cavo è la tipologia di prodotto più versatile e consente l'impiego di elevate quantità di rottame derivante da raccolta differenziata: per il vetro colorato nella miscela vetrificabile si utilizza fino all' 80÷90 % di rottame di provenienza esterna.



*Renana
Breganze*

Tuttavia, per di alcune tipologie di vetro, in particolare la produzione per bottiglie colorate (verde, ambra) la quantità di composti dello zolfo che può essere assorbita dalla massa vetrosa è abbastanza ridotta, cosicché tutto lo zolfo eventualmente in eccesso, introdotto con il rottame di vetro e/o con le polveri derivanti dalla filtrazione e trattamento fumi, viene emesso in atmosfera in forma di SOx.

Inoltre, per talune tipologie di prodotto di elevata qualità non è possibile usare rottame di vetro esterno, né riciclare le polveri recuperate dagli impianti di filtrazione dei fumi, richiedendo la presenza di nitrati nella miscela vetrificabile.

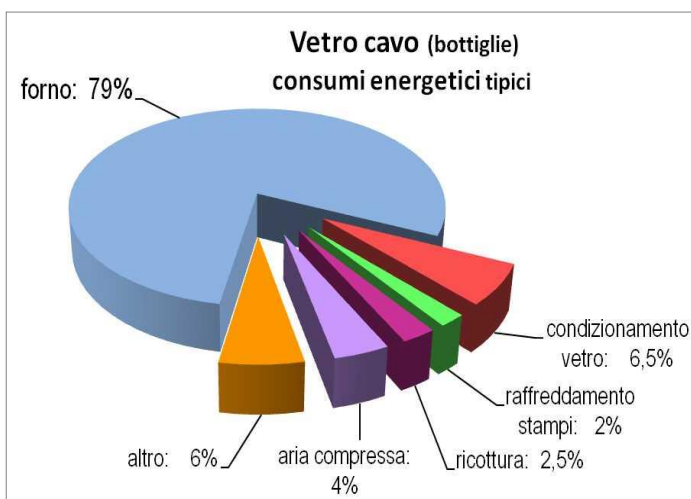


8.2.2 Aspetti ambientali

Consumi energetici

L'industria del vetro é caratterizzata da elevati consumi energetici, dovuti in massima parte al processo di fusione, che da solo assorbe più del 75% dei consumi totali; nel caso dei flaconcini da profumeria i consumi in fusione rappresentano circa il 50% del totale, a causa della bassa velocità, nonché del peso e delle ulteriori lavorazioni a cui sono sottoposti i prodotti (lucidatura a fiamma, ecc.).

Altri consumi energetici importanti sono ascrivibili al riscaldamento dei canali di condizionamento, alla fase di ricottura del vetro ed alla produzione di aria compressa di processo o di raffreddamento.



In Italia, più dell'80% della produzione di vetro cavo industriale è ottenuta mediante l'impiego di gas naturale (*metano*). Altri combustibili fossili sono l'olio combustibile BTZ ($S < 1\%$), *propano* e *butano*, utilizzati anche come combustibili di emergenza.

L'energia elettrica è impiegata sia per l'alimentazione di ventilatori, compressori e per altri servizi, sia per fornire calore ausiliario alla fusione del vetro in forma di "*boosting elettrico*" (fino al 5%).

Per la produzione di vetro cavo normalmente non si utilizzano forni completamente elettrici, se non per la produzione di vetri speciali (opale, borosilicato, al piombo), oppure per ridotte capacità produttive (5-150 t/giorno) di vetro sodico-calcico di elevata qualità e particolare pregio.

Consumi di acqua e scarichi

I principali utilizzi dell'acqua nel ciclo di produzione del vetro cavo sono relativi alla pulizia del prodotto finito ed al raffreddamento di macchinari, attrezzature, strutture termicamente critiche e vetro caldo scartato nella formazione. Anche nel caso di raffreddamento a ciclo aperto lo scarico non presenta problemi particolari, giacché le acque, che non vengono a contatto con sostanze solubili, necessitano soltanto di decantazione (solidi sospesi) e di sgrassatura (oli lubrificanti).

Una parte di acqua, che va persa per evaporazione, è impiegata per l'umidificazione della miscela vetrificabile (fino al 3 - 4%) allo scopo di ridurre la dispersione delle frazioni fini (spolverio) durante la movimentazione e l'introduzione nel forno.



Bottiglia per birra

Inquinamento acustico

Le lavorazioni eseguite con macchine a ciclo continuo (formatrici, scelta, compressori, ventilatori) comportano livelli di rumorosità interna molto elevati (> 90 dB(A)) che impongono la creazione di zone protette e di operare con l'ausilio di dispositivi di protezione individuale (otoprotettori).

In ambiente esterno i livelli di emissione ed immissione normalmente risultano invece inferiori ai limiti di legge previsti per zone classificate come aree destinate alle attività produttive.

Consumo di risorse naturali

Le materie prime utilizzate in maggior quantità per la produzione di vetro sono sostanze abbondantemente presenti in natura (*sabbie, feldspati, dolomite, carbonato di calcio*, ecc.); altre vengono ottenute chimicamente a partire da minerali (*carbonato di sodio, solfato di sodio*, ecc.).

Nondimeno l'attività estrattiva richiede, in generale, una pianificazione preventiva degli interventi necessari a ripristinare le condizioni ambientali del sito dopo la chiusura dell'area di escavazione, i cui costi sono indirettamente sostenuti dall'industria del vetro, consumatrice del minerale estratto.

Emissioni in atmosfera

Le emissioni in atmosfera rappresentano l'aspetto ambientale più rilevante dell'industria del vetro.

Le emissioni derivanti dal ciclo di produzione del vetro sono generate principalmente dal processo di fusione ad alta temperatura; esse dipendono sostanzialmente dal tipo di vetro – quindi dalle materie prime impiegate –, nonché dal tipo di forno e di combustibile utilizzati per la fusione.

Oltre all'*anidride carbonica* (responsabile dell'effetto serra), gli **inquinanti principali** sono rappresentati da: *polveri, ossidi di azoto, ossidi di zolfo*.

A questi si aggiungono altri **inquinanti secondari** che dipendono fortemente dalla qualità delle materie prime utilizzate o dall'impiego di sostanze particolari, necessarie per conferire al prodotto specifiche caratteristiche (opacità, brillantezza, colorazione ecc.): *cloruri e fluoruri gassosi, metalli pesanti*.



Con riferimento agli **inquinanti principali**:

a) Polveri totali

Sono dovute in parte allo spolverio delle frazioni fini presenti nella miscela vetrificabile, ma principalmente ai fenomeni di evaporazione delle sostanze più volatili dal bagno di vetro che ricondensano nella fase di raffreddamento dei fumi.

Nel caso del vetro cavo e dei vetri sodico-calcici le polveri sono costituite per il 95% circa di *solfati di Na, K, Ca e Mg*. Sono caratterizzate da granulometria molto fine: circa l'80% è inferiore a 2 μm .

Inoltre nel caso di impianti dotati di sistemi di trattamento fumi per la riduzione degli inquinanti gassosi, mediante aggiunta di reagenti alcalini solidi, la qualità e quantità delle polveri totali dipende strettamente dalla quantità e dalla tipologia di reagente impiegato.

b) Ossidi di azoto (NO_x)

Possono avere due diverse origini:

- l'ossidazione, ad alta temperatura, dell'azoto contenuto nell'aria di combustione;
- la decomposizione di nitrati alcalini eventualmente presenti nella miscela vetrificabile.

La componente termica delle emissioni di NO_x è influenzata principalmente dall'eccesso d'aria di combustione, dalla temperatura di preriscaldamento dell'aria, dalle temperature di fiamma e dal tempo di residenza ad alta temperatura. Pertanto, a parità di altre condizioni, le concentrazioni di NO_x variano in funzione del tipo di forno (*End Port, Side Port, Unit Melter*) e di combustibile (olio, metano) utilizzati per la fusione del vetro.

Gli *ossidi di azoto* emessi dai forni per vetro sono costituiti al 90-95% da NO ed al 5-10% da NO₂.

c) Ossidi di zolfo (SO_x)

Possono avere due diverse origini:

- ossidazione dello *zolfo* contenuto nell'olio combustibile;
- decomposizione delle materie prime contenenti *zolfo*, come affinantanti (*solfati di Na, Ca e Ba*), coadiuvanti dell'affinaggio (loppe d'altoforno con tenore di *solfuri* dell'1% circa) o coloranti del vetro giallo ambra (*solfuri*).

Anche il rottame di vetro, aggiunto in quantità variabili alla miscela vetrificabile, può dare origine ad emissioni di SO_x a causa del suo diverso grado di saturazione in SO_3 , rispetto al vetro da produrre, con conseguente emissione dei composti dello *zolfo* presenti in eccedenza.

Gli *ossidi di zolfo* emessi dai forni per vetro sono costituiti al 92-95%, da SO_2 ed al 5-8% da SO_3 .

Con riferimento agli altri **inquinanti secondari**:

d) Cloruri gassosi (HCl)

La presenza di cloruri gassosi nei fumi emessi da un forno per vetro é dovuta esclusivamente alle impurezze contenute nelle materie prime (*carbonato di sodio* ottenuto col processo Solvay dal *cloruro di sodio* e loppe d'altoforno raffreddate con acqua di mare) e nel rottame, utilizzati per la preparazione della miscela vetrificabile.

In alcuni casi nella miscela vetrificabile si usa anche *cloruro di sodio*.

Un'altra sorgente è rappresentata dalla decomposizione del *tetracloruro di stagno* impiegato nelle operazioni di trattamento a caldo della superficie dei contenitori.

e) Fluoruri gassosi (HF)

Le emissioni di fluoruri gassosi nella produzione del vetro cavo dipende quasi esclusivamente da impurezze nelle materie prime (dolomite e sabbie purificate) e nel rottame da raccolta differenziata.

Inoltre per talune produzioni come il vetro opale la miscela vetrificabile viene formulata in modo che nella massa vetrosa finale sia presente circa il 5 - 6% di *fluoro*, allo scopo di impartire la necessaria opalescenza al prodotto finale.

L'evaporazione di quantità anche modeste di *fluoro* comporta l'emissione di elevate concentrazioni di questo inquinante. Per questo per la fusione di vetro opale si impiegano forni elettrici a volta fredda.

f) Metalli pesanti

La presenza di metalli pesanti nelle emissioni derivanti dai forni per la produzione di vetro industriale dipende quasi esclusivamente dalle impurezze contenute nelle materie prime impiegate, in particolare nel rottame proveniente dalla raccolta ecologica.

I metalli riscontrabili in concentrazioni apprezzabili sono *piombo* e *cromo^{III}*, e, in quantità ben più modeste, *cadmio*, *arsenico* e *antimonio* presumibilmente provenienti da rottame di vetro artistico. Talora possono essere utilizzate come coloranti o decoloranti quantità significative di *selenio*, *cobalto*, *nichel*, *cromo*.

Dall'impiego di olio combustibile possono derivare *nichel* e *vanadio*.

Anche nel caso di produzione industriale di vetro al *piombo* si impiegano prevalentemente forni elettrici a volta fredda.



*Dama 5 litri
vetro mezzo bianco*



*Dama 5 litri
vetro blu*



vetro rosso

Valori di emissione senza BAT

Per quanto riguarda gli *inquinanti principali*, in tabella sono riportati i tipici valori di emissione riferiti a **forni per vetro cavo** (bottiglie) privi di sistemi di abbattimento.

Inquinanti	Emissioni Vetro cavo senza BAT	
	Tipologia impianto	mg/Nm ³ (8%O ₂)
Polveri	tutti i forni	85 – 300
NOx	Forni <i>Unit Melter</i>	700 – 1400
	Forni <i>End-port</i>	1200 – 2100
	Forni <i>Side-port</i>	2200 – 2600
SOx	Forni a metano	600 – 1200
	Forni a olio combustibile	1500 – 2300



Alcune tipologie di vetro cavo

Emissioni derivanti da processi secondari

Fra i processi secondari nella produzione del vetro cavo si individuano i trattamenti a caldo ed i trattamenti a freddo. Le relative emissioni, normalmente convogliate in atmosfera assieme alle emissioni principali del forno di fusione, sono costituite da *polveri*, *composti dello stagno* e *cloruri gassosi* per i trattamenti a caldo e rispettivamente *composti organici volatili* (*acido oleico* ed emulsioni di *polietilene*) per i trattamenti a freddo.

Rifiuti solidi e contaminazione del suolo

Il principale scarto (rottame di vetro) viene in gran parte riciclato all'interno del processo.

Anche le polveri di abbattimento sono in massima parte riciclate al processo come materia prima.

Gli altri rifiuti significativi dell'industria vetraria sono rappresentati dal materiale refrattario proveniente dalla riparazione e rifacimento dei bacini di fusione, delle camere di rigenerazione, dei canali di alimentazione ecc., e dai materiali per l'imballaggio: carta, cartone, legno e plastica.

La quantità di rifiuti prodotti dal settore del vetro cavo ed avviati a smaltimento esterno ammonta a circa 1 – 7 kg/t_{vetro}.

Rischio ambientale

L'industria del vetro cavo, per l'assenza di materiali pericolosi, normalmente non è compresa tra le attività a rischio di incidente rilevante, né fra i settori ad alto rischio ambientale.

Qualche pericolo può sussistere in relazione allo stoccaggio di sostanze comburenti (*ossigeno*), nel caso di forni ad ossicombustione, e dallo stoccaggio di *ammoniaca*, nel caso di impiego di sistemi SCR o SNCR per la riduzione delle emissioni di NOx.

Sezione di una
bottiglia



8.3 Migliori tecniche disponibili per il contenimento degli inquinanti

Le tecnologie disponibili per il controllo delle emissioni solide e gassose si dividono in:

- interventi primari, aventi lo scopo di evitare la formazione degli inquinanti;
- interventi secondari che mirano a ridurre le emissioni degli inquinanti mediante la loro rimozione dai fumi.

Nei seguenti paragrafi saranno elencate e descritte le tecniche disponibili per il contenimento delle emissioni dei vari inquinanti, utilizzando i seguenti simboli:

- ✓ per le tecniche effettivamente applicabili;
- per le tecniche economicamente non valide o non ancora sufficientemente sviluppate.

8.3.1 Polveri

Stoccaggio e movimentazione materie prime

Si tratta di contenere la polverosità connessa alla movimentazione delle materie prime, mediante:

- ✓ Stoccaggio materie prime polverose in sili con filtri a manica;
- ✓ Pesatura, miscelazione e trasporto miscela vetrificabile in sistemi chiusi, aspirati e depolverati;
- ✓ Umidificazione materie prime (2-3% di acqua) per evitare spolverio;
- ✓ Sistemi di alimentazione chiusi e delimitazione zona infornaggio (dog-house).

Fusione – interventi primari (prevenire l'evaporazione di volatili dal bagno fuso),

- ✓ Utilizzo di carbonato di sodio a basso contenuto di NaCl,
- ✓ Utilizzo di rottame a basso contenuto di volatili (fluoruri, cloruri e metalli pesanti - Pb),
- ✓ Utilizzo di materie prime a basso contenuto di volatili (solfati, boro, fluoruri, cloruri),
- ✓ Combustibile BTZ – metano,
- ✓ Incremento tenore rottame (abbassamento della temperatura nel forno),
- Pellettizzazione materie prime (tecnica di costo elevato).

Ed inoltre (interventi sul forno applicabili in fase di ricostruzione):

- ✓ Geometrie forno per aumentare convezione e ridurre temperature superficiali,
- ✓ Posizione bruciatori per evitare punti di alta temperatura in superficie,
- ✓ Boosting elettrico (riduzione portata gas di combustione e del flusso in massa delle polveri),
- Forno totalmente elettrico (tecnica molto costosa impiegata per tipologie di vetro pregiato e/o caratterizzati di livelli emissivi particolarmente elevati, quali vetri al piombo e vetri opale).

L'applicazione degli interventi primari può portare ad una riduzione delle emissioni di polveri dai forni da vetro di circa il 15–30%, in dipendenza delle tecnologie impiegate.

L'incremento dei consumi elettrici (boosting, trattamento materie prime e rottame, fusione elettrica) trasferisce una quota di emissioni alla centrale termoelettrica.

Fusione – interventi secondari (abbattimento)

Gli interventi secondari si basano essenzialmente sulla filtrazione delle polveri emesse, utilizzando sistemi diversi.

✓ **Filtri elettrostatici**

per impianti molto grandi (capacità produttiva > 200–250 t/giorno).

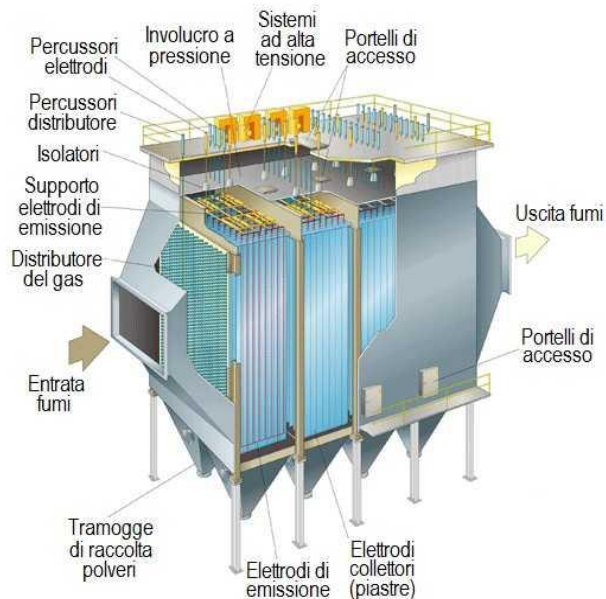
Generalmente il sistema richiede pre-trattamento dei fumi con reagente alcalino per neutralizzare i gas acidi, con notevole aumento delle polveri prodotte, non sempre riutilizzabili nella formulazione della miscela vetrificabile.

È possibile trattare fumi relativamente caldi (350–400°C) e quindi non è richiesto raffreddamento.

I consumi elettrici sono relativamente contenuti.

Prestazioni:

efficienza d'abbattimento 70–90%
concentrazioni in emissione **20-50 mg/Nm³**.



Elettrofiltro – Precipitatore elettrostatico ESP

✓ **Filtri a maniche**

per impianti di media dimensione (portate fino a circa 20.000-30.000 Nm³/h).

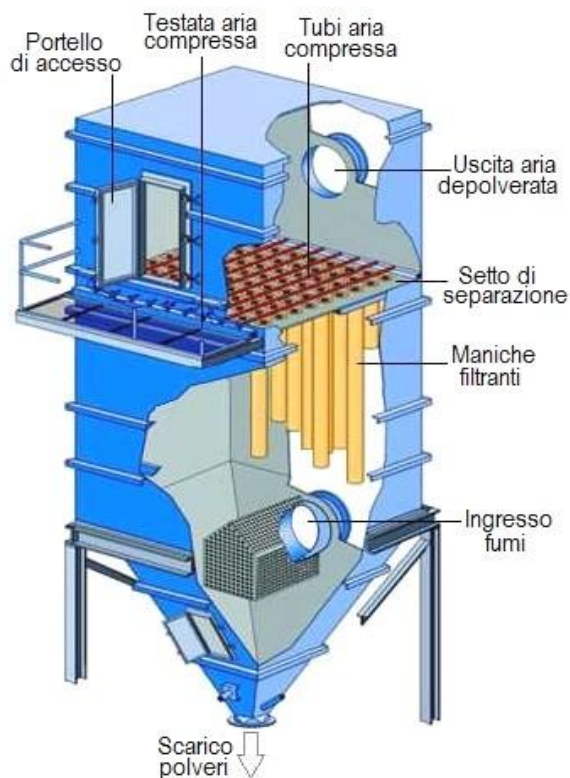
Le temperature di esercizio sono comprese fra 150 e 210°C, talché necessita un sistema di raffreddamento (diluizione, scambiatori, quenching). Inoltre per impedire condensazioni acide sulle maniche, spesso risulta indispensabile utilizzare un sistema di pre-trattamento con reagenti alcalini per la rimozione dei gas acidi presenti nei fumi (SO₃, HCl, HF).

Le polveri abbattute sono normalmente reimpiegate nella formulazione della miscela vetrificabile. Tuttavia per alcuni tipi di vetro il riutilizzo delle polveri può comportare un aumento delle emissioni gassose (SO_x, HCl, HF) a causa della progressiva saturazione del vetro da parte degli inquinanti abbattuti e trattenuti.

Il raffreddamento dei fumi necessario per l'impiego di filtri a tessuto impedisce l'abbattimento degli NO_x mediante catalizzatore (SCR), applicabile solo su fumi depurati ed a temperature di circa 350°C.

Prestazioni:

efficienza di abbattimento 95–99%
concentrazioni in emissione **5 - 30 mg/Nm³**.

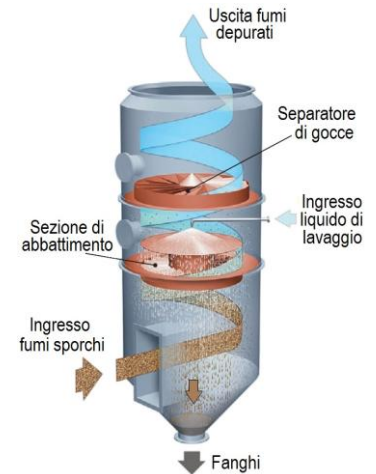


*Filtro a maniche
Depolveratore a mezzo filtrante*

- **Lavaggio ad umido**

usato soltanto in piccoli impianti (forni elettrici per vetro cavo di alta qualità) senza inquinanti tossici (*piombo, arsenico*) e temperatura dei fumi <100°C, o per processi secondari (trattamenti a caldo). In alcuni casi (vetro borosilicato) il lavaggio ad umido viene impiegato a valle della filtrazione a tessuto per abbattere inquinanti che alla temperatura di filtrazione si trovano ancora allo stato gassoso (composti del *boro*).

Il limite principale di questa tecnologia è rappresentato dalla produzione di acque reflue da trattare e smaltire.



Depolveratore ad umido
Scrubber

8.3.2 Ossidi di azoto (NO_x)

Interventi primari – finalizzati a limitare la formazione di *ossidi d'azoto* durante la combustione:

- ✓ **Riduzione dell'eccesso d'aria** mediante:

- ✓ regolazione dell'aria di combustione a rapporti quasi stechiometrici;
- ✓ sigillatura dei blocchi bruciatori;
- ✓ massima chiusura possibile della zona di inornamento della miscela vetrificabile.

La corretta riduzione dell'eccesso d'aria può essere effettuata su qualsiasi tipo di forno e conduce anche all'ottimizzazione dei consumi energetici per la fusione. L'eccessiva riduzione dell'eccesso d'aria può portare alla formazione di *monossido di carbonio*, con danni al forno.

- **Riduzione della temperatura di preriscaldamento dell'aria** (a discapito della resa energetica); l'effetto si consegue con i forni Unit Melter, utilizzati per produzioni inferiori a 250 t/giorno.
- **Combustione a stadi** (tecnica molto promettente, ancora in fase sperimentale); la sperimentazione riguarda il frazionamento del combustibile e del comburente in zone diverse del forno (riduzioni del 10-35%) e con l'uso di ossigeno (riduzioni fino al 70%).
- **Ricircolazione dei fumi di combustione** (tecnica di difficile applicazione industriale, momentaneamente abbandonata); la temperatura di fiamma viene ridotta mescolando l'aria di combustione con una parte dei fumi carenti di ossigeno.
- ✓ **Bruciatori a bassa emissione di NO_x** consiste nella modifica dei tempi di miscelazione aria/combustibile con ottimizzazione della forma di fiamma che evita "punti caldi"; produce una riduzione delle emissioni di NO_x attorno al 30%.
- **Forni a bassa emissione di NO_x (Low-NO_x e Flex-Melter)** si tratta di forni molto allungati che si basano sul preriscaldamento dell'aria di combustione recuperativo, adottando inoltre un sistema di preriscaldamento recuperativo della miscela vetrificabile e del rottame; l'efficienza energetica è inferiore ad altre tipologie di forni e le concentrazioni di NO_x si abbasserebbero a 700-900 mg/Nm³; per ora non sono ancora applicati industrialmente.
- **Processo FENIX** il processo, per ora sperimentato su forno side-port per vetro piano, richiede la completa modifica del sistema di combustione e l'utilizzo di speciali iniettori; consiste in una combinazione di misure primarie riferibili alla riduzione degli eccessi d'aria, l'omogeneizzazione della temperatura di fiamma e della miscelazione controllata di aria e combustibile. Si rilevano riduzioni degli NO_x del 30% e dei consumi energetici del 6%.
- **Ossicombustione** l'aria di combustione viene sostituita con *ossigeno* ad alto grado di purezza, con notevole riduzione degli NO_x (che si limitano a quelli derivanti dalla decomposizione dei nitrati o provenienti dall'eventuale aria parassita), ma anche dei flussi di massa di tutti gli altri inquinanti e dei consumi energetici (10-15%); i costi di investimento si riducono (assenza recupero termico), ma i costi di esercizio aumentano e dipendono dal costo dell'*ossigeno*.

Per questo l'ossicombustione è considerata ancora una tecnologia in via di sviluppo con rischi finanziari potenzialmente elevati per le produzioni ad elevata efficienza (come il vetro cavo), e risulta applicabile soltanto alla produzione di vetri ad alto valore aggiunto.

- **Fusione elettrica** la totale assenza di combustione elimina completamente le emissioni dovute all'ossidazione dell'azoto dell'aria; l'unica fonte di NO_x rimane la decomposizione dei nitrati eventualmente presenti nella miscela vetrificabile. Si riducono drasticamente anche tutte le altre emissioni, peraltro trasferite alla centrale termoelettrica.

La tecnologia del forno elettrico potrebbe dunque essere considerata la **BAT ideale per il settore**. Tuttavia l'elevato costo della tecnologia e la scarsa flessibilità alle variazioni di cavato ne limitano l'applicabilità ai piccoli forni (fino a 50-70 t/d) dedicati alla produzione di vetri ad alto valore aggiunto. All'elevato costo operativo (energia elettrica) si aggiunge l'elevato costo di investimento a causa della breve vita tecnica del forno, ridotta a 2-4 anni.

Interventi secondari – finalizzati ad abbattere gli NO_x formati durante la combustione, per mezzo di processi di riduzione indotti dall'aggiunta ai fumi di *ammoniaca* o di *combustibile fossile*.

- **Reburning e Processo 3R** I due sistemi sono molto simili; essi si basano sull'iniezione di combustibile fossile nei fumi di combustione, direttamente nella camera di combustione (Reburning, in fase di sperimentazione con risultati promettenti) o nelle camere di rigenerazione (processo 3R, già sperimentato e sviluppato con buoni risultati), in modo che i radicali di pirolisi convertano gli ossidi di azoto in azoto gassoso ed acqua. Le riduzioni ottenibili sono dell'ordine del 75-85%.

Per ora tuttavia, a causa delle limitazioni conseguenti all'aumento dei consumi energetici (+ 6-10%) entrambe tecnologie sono scarsamente applicabili a forni adibiti alla produzione di vetro a basso valore aggiunto, in particolare nel settore del vetro cavo.

Riduzione selettiva non catalitica (SNCR) la reazione di riduzione degli NO_x ad *azoto* ed *acqua* avviene alla temperatura di 850-1100°C a seguito dell'iniezione nei fumi di *ammoniaca*; l'applicabilità della tecnologia è limitata dalla possibilità di introdurre il reagente in un punto dove sia possibile mantenere la temperatura corretta per un adeguato tempo di reazione.

Ciò risulta nei fatti assai complicato negli impianti rigenerativi con inversione del flusso dei gas attraverso le camere di rigenerazione.

Il sistema raggiunge efficienze di abbattimento del 50-70% e non richiede pretrattamento dei fumi non essendoci problemi di sporco o avvelenamento del catalizzatore.

- **Riduzione selettiva catalitica (SCR)** la riduzione degli NO_x avviene iniettando *ammoniaca* a 300-400°C, in presenza di un catalizzatore (a base di ossidi di *Va* e *Ti* o zeoliti).

L'applicabilità della tecnologia è limitata dalla vita del catalizzatore, che può essere compromessa dall'impiego di olio combustibile e dalla presenza nei fumi di alcali, composti del *boro* e SO_x . La necessità di preventivo abbattimento, per evitare precoce sporco o avvelenamento del catalizzatore, esclude la possibilità di impiego del sistema di filtrazione a tessuto (più efficiente) in quanto la temperatura del fumo depurato sarebbe troppo bassa.

Il sistema raggiunge efficienze di abbattimento del 70-90%, ma risulta molto costoso sia in termini di investimento sia per quanto concerne l'esercizio; per questo la tecnica non ha raggiunto una diffusione tale da poterla considerare completamente sperimentata.



Catalizzatore ceramico

In entrambe le soluzioni di **riduzione selettiva** lo stoccaggio di *ammoniaca* introduce problemi di sicurezza. In caso di sovradosaggio vi è inoltre possibilità di emissione di *ammoniaca* non reagita.

8.3.3 Altri inquinanti gassosi (SO_x, HCl, HF, CO)

Interventi primari

Gli interventi primari per la limitazione degli *ossidi di zolfo* (SO_x), dei *cloruri gassosi* (HCl) e dei *fluoruri gassosi* (HF) consistono nell'adeguata selezione delle materie prime e del rottame onde limitare le presenze indesiderate di *zolfo* (*zolfo* nel combustibile; *solfati* e *solfuri* negli affinanti, nei coadiuvanti e nei coloranti), di *cloro* (NaCl nel *carbonato di sodio*) e di *fluoro* (sabbie e dolomite).

Per il *monossido di carbonio* (CO) si deve controllare la corretta alimentazione dell'aria comburente (in quantità sufficiente per assicurare una combustione stechiometrica) ed una adeguata miscelazione aria/combustibile per evitare la formazione di zone in difetto d'*ossigeno*.

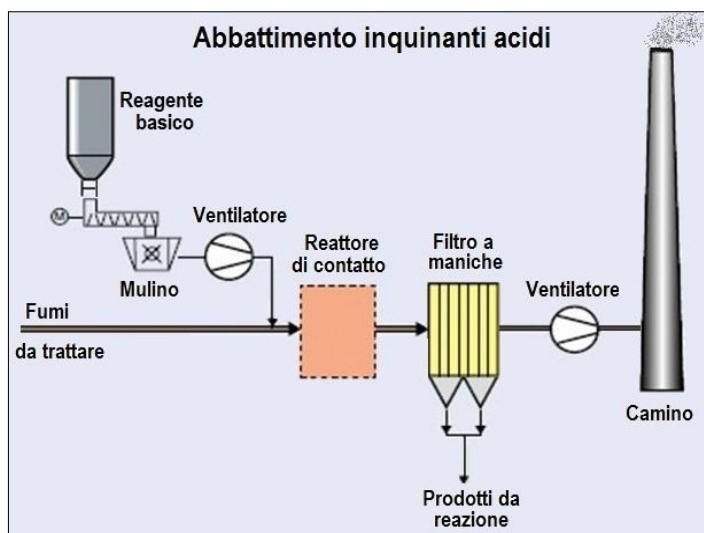
Interventi secondari

Gli interventi secondari per ridurre le emissioni di SO_x, HCl ed HF sono strettamente legati ai sistemi di abbattimento delle emissioni di polveri.

Infatti, essi si basano sulla reazione dei gas acidi presenti nei fumi con sostanze alcaline addizionate nei fumi per via secca o semisecca (soprattutto *idrossido di calcio* Ca(OH)₂ e *bicarbonato di sodio* NaHCO₃, ma anche *carbonato di sodio* Na₂CO₃ e *idrossido di sodio* NaOH), con formazione di sali (*solfati*, *cloruri*, *fluoruri*) separati assieme alle polveri.

La scelta del reagente è effettuata tenendo conto che ciascuno ha efficacia diversa nei confronti dei vari inquinanti, nonché delle quantità e della possibilità di reimpiego delle polveri separate per filtrazione nel ciclo di produzione, a parziale sostituzione di materie prime aventi composizione chimica simile.

Sistema di abbattimento di acidi per via secca



8.3.4 Inquinanti derivanti da trattamenti a caldo ed a freddo del vetro cavo

Le quantitativamente modeste emissioni derivanti dai **trattamenti a caldo** del vetro cavo – eseguiti mediante l'uso di composti clorurati dello *stagno* (*tetracloruro di stagno*, *metil*, *butil cloruri di stagno*), ovvero mediante solforazione con SO₃ – sono in generale convogliate al sistema di trattamento delle emissioni provenienti dal forno di fusione del vetro, non modificando in modo significativo la composizione e le caratteristiche dei fumi generati dal forno fusorio stesso.

Meno utilizzati sono sistemi autonomi di trattamento mediante filtri a maniche o lavaggio a umido con soluzioni alcaline, che in ogni caso risultano poco efficienti nei confronti dei composti deliquescenti dello *stagno*.

Le emissioni derivanti dai processi di **trattamento a freddo** del vetro cavo, eseguiti mediante emulsioni di *acido oleico* e *polietilene*, presentano flussi di massa e concentrazioni poco significativi, tanto da non richiedere alcun trattamento specifico.

9 VALUTAZIONE SULL'APPLICABILITÀ DELLE BAT

9.1 Definizione della Migliore Tecnica Disponibile

In sede di valutazione sull'applicabilità della *Migliore Tecnica Disponibile* si devono tenere in considerazione i principi generali stabiliti all'articolo 10 della **Direttiva 2010/75/UE** (IED) relativa alle emissioni industriali (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento), in particolare:

- devono essere prese le opportune misure di prevenzione dell'inquinamento, applicando in particolare le migliori tecniche disponibili (BAT);
- non si devono verificare fenomeni di inquinamento significativi;
- deve essere prevenuta la produzione di rifiuti, provvedendo, in ordine di priorità, al riutilizzo, riciclo, recupero o, qualora ciò non sia tecnicamente o economicamente possibile, al loro smaltimento evitando o contenendo ogni impatto sull'ambiente;
- l'energia deve essere utilizzata in modo efficace ed efficiente;
- devono essere prese le misure necessarie per prevenire gli incidenti e limitarne le conseguenze;
- deve essere evitato qualsiasi rischio di inquinamento al momento della cessazione definitiva delle attività e il sito stesso deve essere ripristinato.

Le **conclusioni sulle migliori tecniche disponibili (BATC)** adottate con la già citata **Decisione della Commissione 2012/134/UE del 28 febbraio 2012**, definiscono e descrivono per lo specifico settore le migliori tecniche disponibili e le relative prestazioni ambientali ottenibili ed autorizzabili, i cosiddetti livelli di emissione associati alle BAT (**BAT-AEL**, **BAT-Associated Emission Levels**).

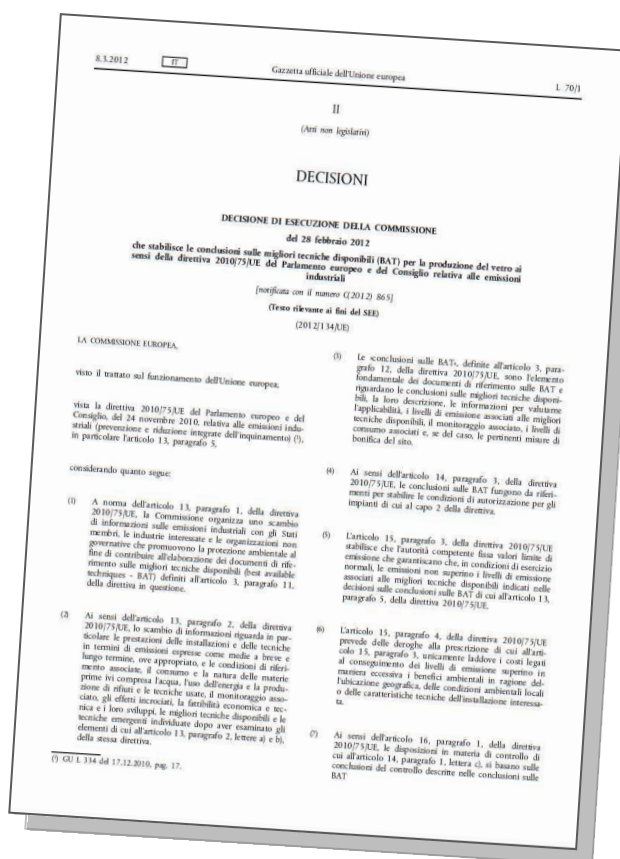
A differenza di quanto accadeva prima della Direttiva 2010/75/UE (IED), questo documento costituisce il riferimento vincolante derivato dall'analisi del **BRef** (*BAT Reference document*) relativo al settore vetrario del **2013**, introducendo indicazioni univoche per quanto riguarda le migliori tecniche disponibili da prendere in considerazione ed i relativi limiti emissivi applicabili.

La decisione di esecuzione della Commissione del 28 febbraio 2012 che stabilisce le Conclusioni sulle BAT per la produzione del vetro – BATC

9.2 Le Migliori Tecniche Disponibili ed applicabili al settore del Vetro cavo

Nella presente sezione per ogni tematica vengono elencate le migliori tecniche disponibili riportate nelle *Conclusioni sulle BAT*, fra le quali, in relazione alla specificità dei processi, è possibile selezionare quelle applicabili caso per caso.

A settore del vetro cavo si applicano sia le misure **generali**, riferibili a tutte le installazioni del settore vetrario, sia quelle **specifiche**, espressamente riferite all'impiantistica del vetro cavo.



9.2.1 Conclusioni generali sulle BAT per la fabbricazione del vetro

Le presenti **misure generali** possono essere applicate a tutte le installazioni del settore vetrario.

Sistemi di gestione ambientale

- 1 Attuazione e rispetto di un **Sistema di gestione ambientale** (SGA).

Un SGA comprende la struttura organizzativa, le responsabilità, le prassi, le procedure, i processi e le risorse per sviluppare, implementare, mantenere, revisionare e controllare la politica ambientale, secondo il modello dinamico iterativo di continuo miglioramento.

Efficienza energetica

- 2 Riduzione del consumo energetico specifico.

Controllo parametri operativi per l'ottimizzazione del processo, manutenzione regolare, attenta progettazione del forno e scelta della tecnica di fusione, regolazione dei processi di combustione, utilizzo di elevati livelli di rottame, recupero del calore, preriscaldamento miscela vetrificabile e rottame.

- 3 Limitazione delle **emissioni di polveri diffuse** derivanti dallo stoccaggio e dalla movimentazione di materie solide.

Stoccaggio materiali polverulenti in sili chiusi depolverati, container chiusi o luoghi riparati; pulizia strade; movimentazione materiali polverulenti mediante trasportatori chiusi o trasporti pneumatici a tenuta; umidificazione miscela vetrificabile, forno in depressione, riduzione dei fenomeni di decrepitazione, aspirazione zone e processi polverosi, alimentatori a coclea,

- 4 Limitazione delle **emissioni gassose diffuse** derivanti dallo stoccaggio e dalla movimentazione di materie volatili.

Controllo temperatura degli stoccaggi, isolamento e protezione dal sole dei serbatoi, serbatoi a letto flottante o a membrane, sistemi di recupero vapori nei travasi,

Tecniche primarie generali

- 5 Riduzione del consumo energetico e delle emissioni in aria attraverso un monitoraggio costante dei parametri operativi ed una manutenzione programmata del forno fusorio.

- 6 Selezione e controllo accurati di tutte le sostanze e materie prime introdotte nel forno fusorio, allo scopo di ridurre o prevenire eventuali emissioni in aria.

Utilizzo di materie prime e rottame esterno con bassi livelli di impurità (*cloruri, fluoruri*, metalli, sostanze volatili) e di combustibili a basso contenuto di impurità metalliche.

- 7 Monitoraggio periodico di emissioni e/o altri parametri di processo pertinenti.

In particolare il monitoraggio riguarda i parametri critici (T, combustibile, aria), CO₂, polveri, NO_x, SO_x, NH₃ (se utilizzata in SNCR e SCR), CO, HCl, HF, metalli, altri parametri alternativi.

- 8 Controllo del corretto funzionamento dei sistemi di trattamento dei gas di scarico in tutte le condizioni di esercizio.

Devono essere definite procedure speciali per situazioni particolari quali: avvio e arresto; pulizia del forno, dei sistemi di recupero termico o dei sistemi di abbattimento; drastici cambi di produzione; anomalie di funzionamento.

- 9 Limitazione delle emissioni di *monossido di carbonio* (CO) provenienti dal forno fusorio in presenza di misure antagoniste per la riduzione degli *ossidi di azoto* (NO_x) (riduzione del rapporto aria/combustibile, bruciatori low-NO_x, combustione a più stadi).

Attento controllo dei parametri operativi.

- 10 Limitazione delle emissioni di *ammoniaca* (NH₃) non reagita, quando si applicano tecniche di abbattimento ad elevata efficienza degli NO_x (SCR o SNCR).

- 11 Riduzione delle emissioni di *boro* provenienti dal forno fusorio, quando nella formulazione di miscele vetrificabili si utilizzano composti del *boro*.

Filtrazione a bassa temperatura, lavaggio a secco o semisecco con filtrazione, lavaggio a umido.

Emissioni in acqua

- 12 Riduzione del consumo di acqua.

Riduzione perdite, reimpiego acque raffreddamento e di processo, sistemi a circuito semichiuso.

- 13 Riduzione del carico di emissioni di inquinanti negli scarichi di acque reflue.

Depurazione semplice (sgrigliatura, decantazione, disoleatura, filtrazione, ...), depurazione biologica, scarico in pubblica fognatura, riutilizzo esterno delle acque reflue.

Rifiuti

- 14 Riduzione della produzione di materiali solidi di scarto da smaltire.

Riciclaggio degli scarti di miscela vetrificabile, riduzione delle perdite di materie prime, riciclo interno degli scarti di vetro, riciclo delle polveri di abbattimento, recupero interno o esterno di altri scarti, recupero esterno dei refrattari a fine vita del forno.

Rumore

- 15 Contenimento delle emissioni di rumore.

Piano di valutazione e gestione del rumore ambientale, confinamento di lavorazioni ed apparecchiature rumorose, terrapieni, pareti fonoassorbenti, barriere naturali, ...

9.2.2 Conclusioni sulle BAT per la fabbricazione di vetro cavo

Le presenti **misure specifiche** si applicano al settore del vetro cavo in aggiunta alle misure generali.

Emissioni di polveri da forni fusori

- 16 Riduzione delle emissioni di polveri presenti nei fumi dei forni fusori.

impiegato di **precipitatore elettrostatico** o **filtro a manica**. Il primo è preferibile per impianti di dimensione molto grande, mentre il filtro a maniche è applicabile su impianti medio-piccoli.

Emissioni di ossidi di azoto (NO_x) da forni fusori

- 17 Riduzione delle emissioni di NO_x provenienti dal forno fusorio.

Mediante tecniche primarie: modifiche della combustione (riduzione del rapporto aria/combustibile, riduzione della temperatura dell'aria di combustione, combustione in più fasi, ricircolazione del flusso gassoso, bruciatori Low-NOX, scelta del combustibile), progettazione del forno, fusione elettrica, ossicombustione.

Mediante tecniche secondarie: Riduzione selettiva catalitica (SCR) e non catalitica (SNCR).

- 18 Nel caso di impiego di nitrati o di particolari condizioni ossidanti.

Riduzione di materie prime contenenti nitrati ed impiego di tecniche primarie e secondarie.

Nel caso di impiego di nitrati per cicli brevi o per forni con capacità produttiva < 100 t/d è richiesto soltanto l'impiego delle tecniche primarie (vedi BAT-AEL).

Emissioni di ossidi di zolfo (SO_x) da forni fusori

- 19 Riduzione delle emissioni di SO_x provenienti dal forno fusorio.

Lavaggio a secco o semisecco con filtrazione, riduzione dello zolfo nella miscela vetrificabile, uso di combustibili BTZ.

Emissioni di acido cloridrico (HCl) ed acido fluoridrico (HF) da forni fusori

- 20 Riduzione delle emissioni di HCl e HF (preferibilmente in combinazione con il flusso gassoso derivante dal trattamento superficiale a caldo).

Scelta di materie prime a basso tenore di Cl e F, lavaggio a secco o semisecco con filtrazione.

Metalli da forni fusori

- 21 Riduzione delle emissioni di metalli provenienti dal forno fusorio.

Scelta materie prime a basso tenore di metalli, riduzione dei metalli nella miscela vetrificabile per colorazione e decolorazione vetro, filtrazione a maniche o elettrofiltro, lavaggio a secco o semisecco con filtrazione.

Emissioni derivanti da processi a valle della catena produttiva (trattamenti a caldo)

- 22 Riduzione delle emissioni di composti dello stagno, stagno organico o titanio.

Riduzione perdite di prodotto in applicazione, abbattimento congiunto con le emissioni del forno, lavaggio ad umido o lavaggio a secco con filtrazione (se emessi separatamente).

- 23 Riduzione delle emissioni di SO_x (quando si usa SO₃).

Riduzione perdite di prodotto in applicazione, lavaggio ad umido.

9.3 Livelli di emissione associati alle BAT per il settore del vetro cavo

Nelle seguenti tabelle vengono riportati i valori dei BAT-AEL (BAT-Associated Emission Levels), che assumono carattere vincolante nel rilascio delle autorizzazioni.

Per essi nella prima colonna viene indicato il n° della BAT a cui fanno riferimento.

BAT-AEL per gli scarichi di acque reflue in acque superficiali provenienti dalla produzione di vetro

Riferimento N° BAT	Inquinante	BAT-AEL (campione composito)
13	pH	6,5 – 9
	Solidi in sospensione totali	< 30 mg/l
	COD	< 5 – 130 mg/l
	Solfati, espressi come SO ₄ ²⁻	< 1000 mg/l
	Fluoruri, espressi come F	< 6 mg/l
	Idrocarburi totali	< 15 mg/l
	Piombo, espresso come Pb	< 0,05 – 0,3 mg/l
	Antimonio, espresso come Sb	< 0,5 mg/l
	Arsenico, espresso come As	< 0,3 mg/l
	Bario, espresso come Ba	< 3,0 mg/l
	Zinco, espresso come Zn	< 0,5 mg/l
	Rame, espresso come Cu	< 0,3 mg/l
	Cromo, espresso come Cr	< 0,3 mg/l
	Cadmio, espresso come Cd	< 0,05 mg/l
	Stagno, espresso come Sn	< 0,5 mg/l
	Nichel, espresso come Ni	< 0,5 mg/l
	Ammoniaca, espressa come NH ₄	< 10 mg/l
	Boro, espresso come B	< 1 – 3 mg/l
	Fenolo	< 1 mg/l

BAT-AEL per le *emissioni in atmosfera* provenienti dalla produzione di vetro (vetro cavo)

Riferimento N° BAT	Inquinante / campo di applicazione	BAT-AEL	
		mg/Nm ³	kg/t _{vetro fuso}
9	Monossido di carbonio (CO)	< 100	-
10	Ammoniaca (NH ₃) quando si applicano tecniche SCR o SNCR	< 5-30	-
16	Polveri	< 10-20	< 0,015-0,6
17	NO _x espressi come NO ₂ - Tecniche primarie - Fusione elettrica - Ossicombustione - Tecniche secondarie	500-800	0,75-1,2
		100	< 0,3
			< 0,5-0,8
		500	< 0,75
18	NO _x espressi come NO ₂ Impiego di nitrati nella miscela in forni con capacità produttiva < 100t/d	< 1000	3
19	SO _x espressi come SO ₂ Gas naturale Olio combustibile	< 200 – 500	<0,3-0,77
		< 500 – 1200	<0,73–1,8
20	Acido cloridrico espresso come HCl Acido fluoridrico espresso come HF	< 10-20	<0,02-0,03
		< 1-5	<0,001–0,008
21	Σ (As, Co, Ni, Cd, Se, Cr ^{VI}) Σ (As, Co, Ni, Cd, Se, Cr ^{VI} , Sb, Pb, Cr ^{III} , Cu, Mn, V, Sn)	< 0,2 - 1	< 0,3 – 1,5
		< 1 - 5	< 1,5 – 7,5
22	Polveri Titanio Ti Stagno Sn HCl Trattamenti a caldo (emissioni trattate separatamente)	< 10	
		< 5	-
		< 5	
		< 30	
23	SO _x espressi come SO ₂ Trattamento di superficie con SO ₃ (emissioni trattate separatamente)	< 100-200	-



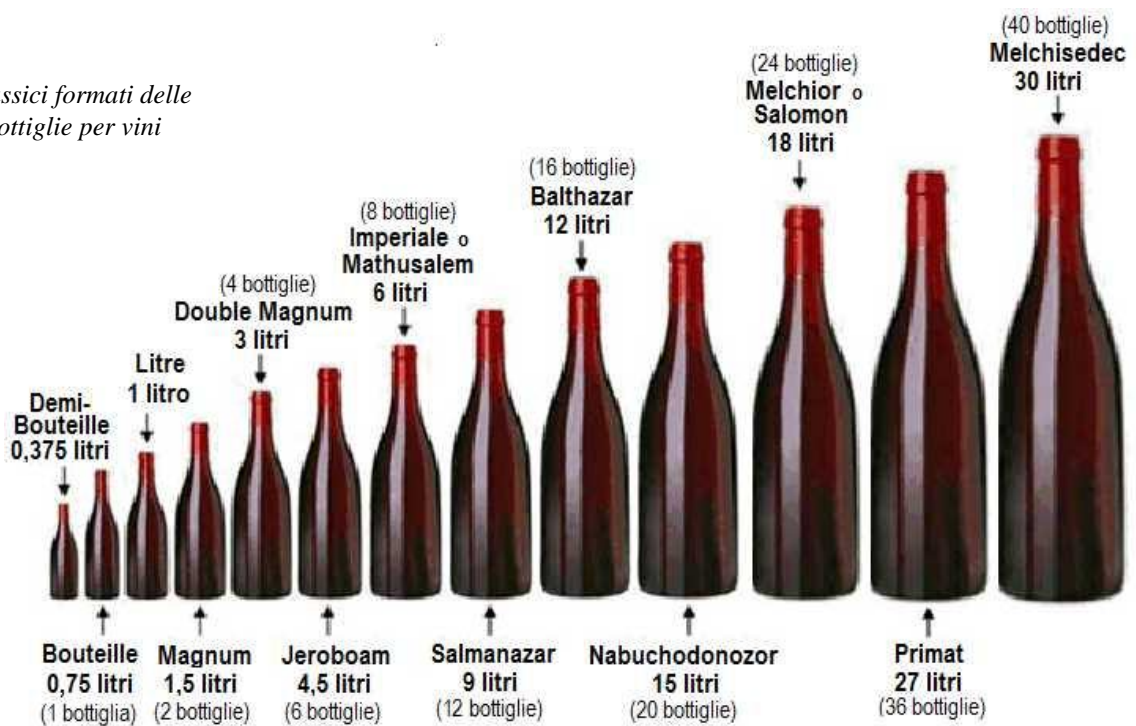
*Vetro cavo
in diversi colori e formati*



L'ideale privacy dell'uomo è una scatola trasparente (di vetro) immersa nella natura !!

Saul Steinberg – giornalista (1914 – 1999)

*I classici formati delle
bottiglie per vini*





Tacchi a spillo – taglia 36
Åsa Lovisa Jungnelius
Fisksätra Sverige (1975)



Jelly Fish – Medusa
Richard Satava
maestro vetraio californiano



Cavallini muranesi

BIBLIOGRAFIA

Direttiva 24 novembre 2010 n. 2010/75/UE – DIRETTIVA DEL PARLAMENTO EUROPEO E DEL CONSIGLIO relativa alle emissioni industriali (prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento) Pubblicata nella G.U.U.E. 17 dicembre 2010, n. L 334.

European Commission – JRC Reference Report – Best Available Techniques (BAT) Reference – Document for the Manufacture of Glass (**BRef GLS 2013**) – Joint Reference Center **2013**

Decisione di esecuzione della Commissione del 28 febbraio 2012 che stabilisce le conclusioni sulle BAT per la produzione del vetro – Gazzetta dell'Unione europea 3.3.2101

D.m. 29 gennaio 2007 - Emanazione di linee guida per l'individuazione e l'utilizzazione delle migliori tecniche disponibili, in materia di fabbricazione di vetro, fritte vetrose e prodotti ceramici, per le attività elencate nell'allegato i del d.lgs. 18 febbraio 2005, n. 59 - Gazzetta Ufficiale 31 maggio 2007, n. 125, S.O.

AssoVetro - Linee guida per l'applicazione della direttiva europea IPPC 96/61/ce all'industria del vetro ed alla produzione di fritte - 2006

AssoVetro – Rapporti ambientali dell'Industria Vetraria Italiana – anni vari

AssoVetro – La storia del vetro – www.assovetro.it

CoReVe Consorzio Nazionale per la raccolta, il riciclaggio e il recupero degli imballaggi in vetro – Dati raccolta differenziata - <https://www.coreve.it>

Luca Di Palma - Tecnologia dei Materiali e Chimica Applicata – terza edizione febbraio 17

Vincenzo M. Sglavo – Lezioni di Ingegneria del vetro – UNITN 2009 – <http://www.sglavo.it>

Regione Val d'Aosta – Il vetro dall'antichità al contemporaneo nel bacino del mediterraneo – Le verre de l'antiquité au contemporain – <http://www.glassway.vda.it>

<http://it.wikipedia.org/wiki/Vetro>

www.spevetro.it - Stazione sperimentale del vetro

www.pilkington.com – sito ufficiale di Pilkington plc e Nippon Sheet Glass Co, Ltd. (NSG)

www.saint-gobain-glass.com – sito ufficiale di Saint-Gobain Building Glass (SGG)

www.vitrum.it – ipertesto informativo sul vetro nei suoi aspetti storici, produttivi e tecnici.