

# Tecnologia ottica

---

Gli occhiali sono ormai da otto secoli il principale mezzo di correzione delle anomalie refrattive. Dal semplice uso di lenti convergenti documentato già dal XIII secolo per ovviare alla presbiopia, si è passati a lenti sempre più complesse, fino alle attuali lenti multifocali.

Un occhiale è composto essenzialmente da due **lenti** (trasparenti o colorate per esempio per filtrare l'energia luminosa nel caso degli occhiali da Sole) e da una **montatura**, ossia di una struttura idonea a mantenere le lenti in posizione fissa rispetto agli occhi utilizzando come supporti il naso e le orecchie. La competenza tecnica specifica dell'ottico consiste nel sapere identificare, nei singoli casi concreti, il tipo di lenti e di montatura (materiali e forma) più idonei, e nell'operare correttamente il **montaggio** dell'occhiale.

## Le lenti oftalmiche

In generale, una **lente** si può definire come una porzione di materiale trasparente delimitata da due superfici di forma opportuna, che abbia la proprietà di far convergere (lente convergente) o divergere (lente divergente) un fascio di luce che la attraversa.

Si dice **lente sferica** una lente delimitata da due superfici sferiche (diottri sferici). Sono di uso frequente anche lenti delimitate da superfici non sferiche. In generale si parla in questi casi di **lenti asferiche**. Sono lenti asferiche per esempio le **lenti toriche** utilizzate per la correzione dell'astigmatismo e le lenti **multifocali** o **progressive** utilizzate per permettere a visione sia da lontano che da vicino a soggetti presbiti.

Si è soliti indicare come **lenti oftalmiche** le lenti destinate agli occhiali, mentre si parla di **ottica di precisione** quando ci si riferisce a lenti destinate a strumenti ottici quali cannocchiali, microscopi, obiettivi fotografici, ecc. In generale, le lenti oftalmiche hanno particolari caratteristiche costruttive e richiedono tolleranze meno stringenti rispetto alle lenti utilizzate nell'ottica di precisione.

Tra le caratteristiche che deve avere una lente oftalmica ideale vi sono le seguenti:

- leggerezza
- curvatura e spessore ridotti
- assenza di riflessi superficiali
- resistenza agli urti, ai graffi e alle flessioni
- resistenza ai solventi e agli agenti chimici (per permetterne la pulizia)
- materiale biocompatibile (che non produca irritazione al contatto con la pelle)

Tra i materiali attualmente disponibili per la produzione di lenti oftalmiche vi sono diversi tipi di vetri e di materiali organici.

## Caratteristiche dei materiali per lenti oftalmiche

### L'indice di rifrazione

La caratteristica fondamentale di un mezzo ottico è l'**indice di rifrazione**. L'indice di rifrazione  $n$  esprime il rapporto tra la velocità della luce  $c$  nel vuoto e la velocità  $v$  della luce nel mezzo considerato, ovvero:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Nei mezzi materiali la velocità della luce è sempre minore che nel vuoto, e dipende:

- dalla natura del mezzo;
- dalla temperatura (che influisce in particolare nel caso delle sostanze liquide e gassose);
- dalla pressione (che influisce sulle sostanze gassose);
- dalla lunghezza d'onda della radiazione (nella maggior parte dei casi la luce di lunghezza d'onda minore – violetto e blu – è più lenta della luce di lunghezza d'onda maggiore – rosso).

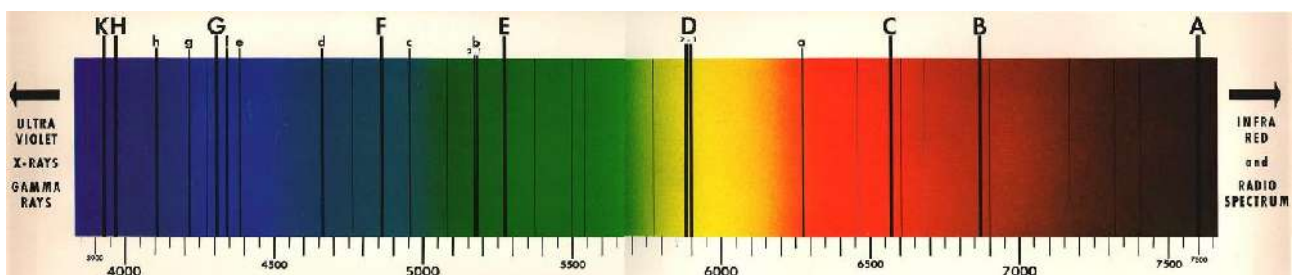
Normalmente i valori dell'indice di rifrazione vengono dati per una temperatura di 20 °C e una pressione di 1 atm (760 torr = 101,325 kPa).

Il valore della lunghezza d'onda della luce a cui si riferisce un indice di rifrazione viene indicato con una lettera aggiunta all'indice di rifrazione: si utilizzano normalmente:

- $n_e$  che si riferisce alla riga verde del mercurio alla lunghezza d'onda  $\lambda = 546,07$  nm ( $1 \text{ nm} = 10^{-9}$  m);
- $n_c$  che si riferisce alla riga rossa del cadmio alla lunghezza d'onda  $\lambda = 643,85$  nm;
- $n_F$  che si riferisce alla riga blu del cadmio alla lunghezza d'onda  $\lambda = 479,99$  nm.

L'indice di rifrazione  $n_e$  riferito alla riga verde del mercurio si dice **indice di rifrazione principale**.

L'uso di indicare le righe spettrali con una lettera (maiuscola) fu introdotto da Joseph von Fraunhofer (1787-1826), che nel 1817 osservò nello spettro della luce solare una serie di righe oscure che identificò con le lettere A, B, C, ... (figura 1).



**Figura 1.** Spettro della luce solare con l'indicazione delle principali righe di assorbimento.

Queste righe scure sono dovute all'assorbimento della luce da parte di gas freddi, che se portati ad alta temperatura emettono luce alle stesse lunghezze d'onda. La luce gialla corrispondente alla riga D, alla lunghezza d'onda  $\lambda = 589$  nm, è prodotta dal sodio. La luce rossa corrispondente alla riga C, alla lunghezza

d'onda  $\lambda = 656,28$  nm, e la luce blu corrispondente alla riga F, alla lunghezza d'onda  $\lambda = 486,13$  nm, sono emesse dall'idrogeno (si tratta rispettivamente delle righe  $H_{\alpha}$  e  $H_{\beta}$  dello spettro dell'idrogeno).

Fino al 1955 per la determinazione degli indici di rifrazione venivano utilizzate lampade spettrali al sodio o all'idrogeno, e si usavano i corrispondenti valori degli indici rifrazione  $n_D$ ,  $n_C$  e  $n_F$ . Per motivi di carattere pratico si è passati all'uso di lampade al mercurio e al cadmio, dato che le righe emesse da questi elementi permettono misure più precise (si noti che la riga D del sodio è composta, in realtà, da due righe alle lunghezze d'onda  $\lambda = 589,00$  nm e  $\lambda = 589,59$  nm). Le righe emesse da queste sostanze sono indicate rispettivamente con le lettere e, C' e F' per la loro vicinanza in termini di lunghezza d'onda con le righe E, C e F dello spettro solare. È utilizzata a volte, in sostituzione della riga gialla (D) del sodio, la riga gialla dell'elio alla lunghezza d'onda  $\lambda = 587,65$  nm, indicata con la lettera d. La tabella riporta le lunghezze d'onda di altre righe spettrali comprendenti anche quelle utilizzate nell'ultravioletto e nell'infrarosso.

Lunghezza d'onda (nm)	Elemento	Simbolo	Colore
1013,98	Mercurio	t	Infrarosso
852,1	Cesio	s	Infrarosso
780,0	Rubidio		Infrarosso
766,49	Potassio	A'	Rosso
769,90			
706,52	Elio	r	Rosso
656,28	Idrogeno	C	Rosso
643,85	Cadmio	C'	Rosso
589,59	Sodio	D	Giallo
589,00			
587,56	Elio	d	Giallo
546,07	Mercurio	e	Verde
486,13	Idrogeno	F	Blu
479,99	Cadmio	F'	Blu
435,83	Mercurio	g	Blu
404,66	Mercurio	h	Violetto
365,01	Mercurio	i	Ultravioletto

Utilizzare un materiale ad alto indice di rifrazione permette di ottenere lenti di ridotto spessore, a parità di potere. L'uso di materiali ad alto indice di rifrazione comporta, però, il peggioramento di altre caratteristiche.

### La dispersione e il numero di Abbe

Se si costruisce un grafico dell'indice di rifrazione di una sostanza in funzione della lunghezza d'onda si ottiene quanto mostrato nella figura 2, che si riferisce a diversi tipi di vetro: l'indice di rifrazione diminuisce all'aumentare della lunghezza d'onda  $\lambda$ .

Per **dispersione** si intende la differenza fra gli indici di rifrazione per radiazioni con diversa lunghezza d'onda. Si distinguono le seguenti grandezze:

- **dispersione principale**, ossia la differenza fra gli indici di rifrazione  $n_F$  e  $n_C$  per la luce blu del cadmio ( $\lambda = 479,99$  nm) e la luce rossa del cadmio ( $\lambda = 643,85$  nm);
- **dispersione parziale**, la differenza fra gli indici di rifrazione per altre lunghezze d'onda;

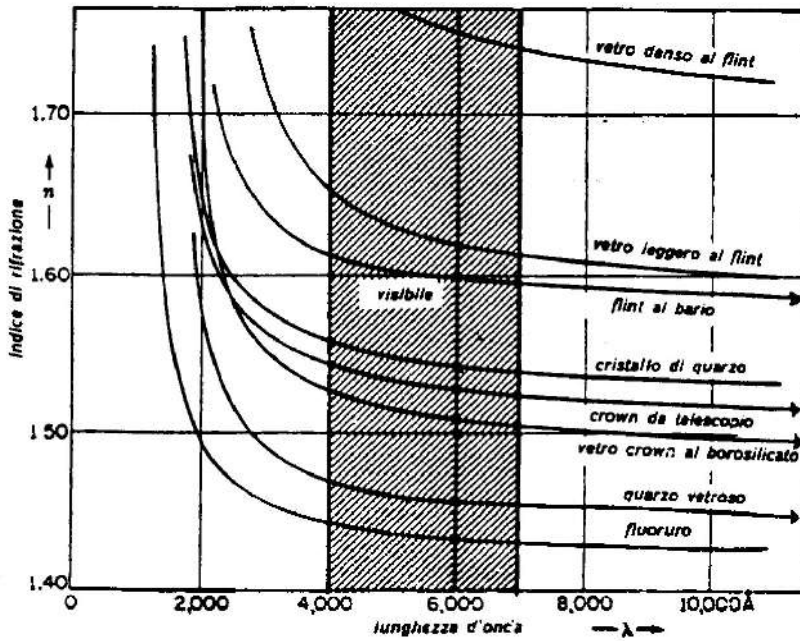


Figura 2. Indice di rifrazione in funzione della lunghezza d'onda per diversi tipi di vetro.

- **dispersione parziale relativa**, il rapporto tra una dispersione parziale e la dispersione principale;
- **numero di Abbe** o **costringenza**, ossia il rapporto

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C} \quad (2)$$

La dispersione è la grandezza che indica quanto i raggi di luce di diversi colori vengono dispersi nel passaggio attraverso un mezzo ottico: se per esempio un raggio di luce bianca, che risulta dalla composizione di tutti i colori spettrali, incide su un prisma a sezione triangolare come mostra la figura 3, nelle due rifrazioni subite dai raggi luminosi nell'attraversare il prisma i diversi colori vengono deviati in misura differente, ed emergono dalla faccia opposta del prisma separati uno dall'altro, con diversi angoli di rifrazione. Una sostanza disperde la luce che passa attraverso di essa tanto più quanto è maggiore la sua dispersione, e quindi tanto più quanto è minore è il suo numero di Abbe.

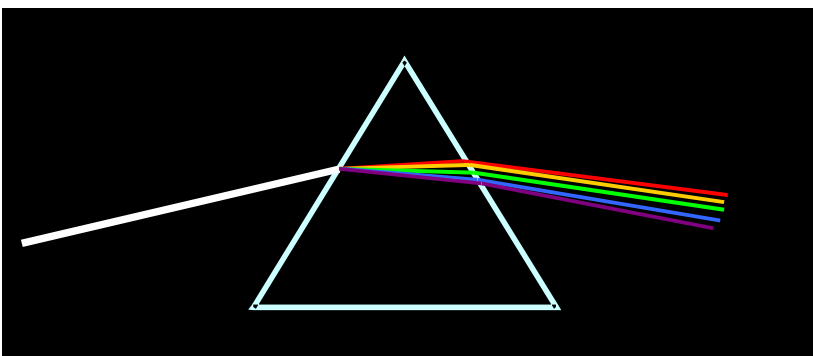


Figura 3. Nelle due rifrazioni attraverso le superfici del prisma triangolare i raggi luminosi corrispondenti ai diversi colori spettrali vengono deviati di angoli tanto più diversi quanto maggiore è la dispersione del materiale.

## La trasparenza

La trasparenza di un mezzo ottico indica la sua capacità di lasciarsi attraversare dalla luce. I fenomeni che possono influire sulla quantità di luce che riesce ad attraversare una lamina di materiale trasparente sono l'**assorbimento** all'interno del materiale e le **riflessioni** su ogni superficie attraversata.

Le grandezze fisiche che misurano l'assorbimento all'interno del materiale sono la **trasmittanza** e l'**assorbanza**. Il valore della trasmittanza  $T$ , per ciascun tipo di materiale e per un dato spessore, è dato dal rapporto tra l'intensità della radiazione trasmessa  $I$  e l'intensità  $I_0$  della radiazione incidente:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (3)$$

L'assorbanza  $A$  (un tempo detta *densità ottica*) è data invece dal logaritmo decimale del reciproco della trasmittanza:

$$A = \log \frac{1}{T} \quad (4)$$

Quando due strati di materiale trasparente vengono sovrapposti, la trasmittanza risultante è data dal prodotto delle trasmittanze dei due strati. L'assorbanza risultante dalla sovrapposizione dei due strati di materiale è data invece dalla somma delle loro due assorbanze.

Quando un fascio di luce incide sulla superficie di separazione di due mezzi, una parte si riflette, e una parte penetra nel secondo mezzo. La percentuale di radiazione riflessa dipende soprattutto dall'angolo d'incidenza, ed è minima per l'incidenza normale; quando il fascio è molto radente, ossia l'angolo di incidenza si avvicina a  $90^\circ$ , aumenta notevolmente la quantità di radiazione riflessa, che risulta anche polarizzata. È utile conoscere la formula semplificata che vale quando l'incidenza è normale o quasi: il fattore di riflessione  $\rho$  (che si legge ro ed è l'erre dell'alfabeto greco), ossia la percentuale della radiazione riflessa dalla superficie di separazione fra due mezzi i cui indici di rifrazione sono  $n'$  e  $n''$ , è espresso da

$$\rho = \frac{(n' - n'')^2}{(n' + n'')^2} \quad (5)$$

Nel caso di un materiale che abbia  $n' = 1,5$  (per esempio vetro crown ordinario) e sia immerso nell'aria, con  $n'' = 1$ , si ha

$$\rho = (0,5/2,5)^2 = 0,04 = 4\%$$

Questa percentuale aumenta all'aumentare dell'indice di rifrazione del materiale. Per un vetro flint che abbia un indice di rifrazione  $n' = 1,7$  si ha

$$\rho = (0,7/2,7)^2 = 0,067 = 6,7\%$$

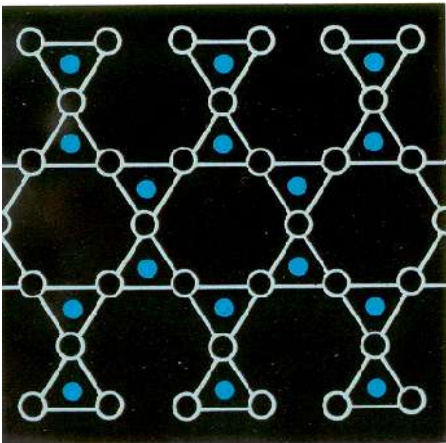
Siccome ogni lente o ogni lamina ha sempre una superficie di entrata e una di emergenza, e siccome si ha riflessione praticamente nella stessa misura su entrambe le superfici, la quantità di radiazione riflessa da una lente è pari all'incirca al doppio di quanto indicato sopra. Vedremo più avanti come queste riflessioni possono essere ridotte o addirittura eliminate con opportuni **trattamenti antiriflesso**.

## Il vetro

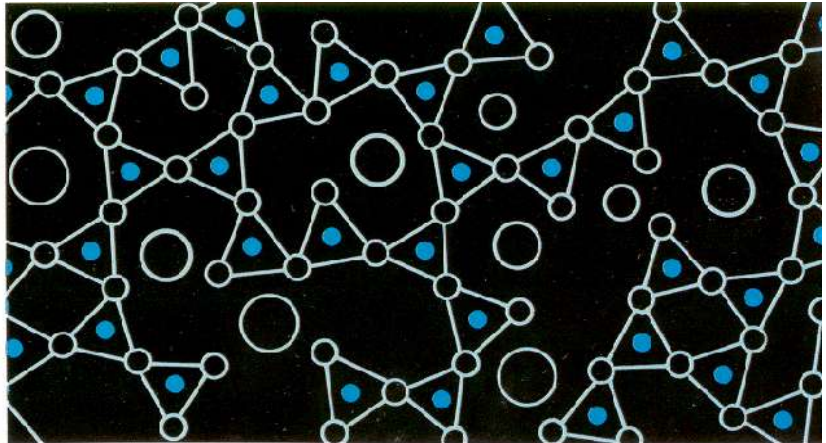
Il vetro è un solido omogeneo e trasparente ottenuto dalla fusione, ad alta temperatura, di silice (biossido di silicio  $\text{SiO}_2$ ) e altre sostanze.

La caratteristica fondamentale del vetro è di avere una **struttura amorfa** ("senza forma"), ossia non cristallina. In generale le sostanze solide hanno una struttura cristallina, nella quale gli atomi sono disposti secondo strutture regolari caratteristiche di ciascuna particolare sostanza. Nel vetro invece gli atomi sono disposti disordinatamente, senza nessuna struttura particolare. La proporzione degli atomi può fluttuare localmente e anche la distanza tra di essi varia in continuazione. Questo disordine, che si manifesta a livello delle dimensioni atomiche, scompare totalmente quando si considera un volume molto più grande. Lo stato vetroso può essere considerato come uno **stato liquido ad altissima viscosità**, tale cioè da assumere l'aspetto e la rigidità propria delle sostanze solide.

Le figure 4 e 5 danno un'idea della differenza tra una struttura cristallina e la struttura amorfa del vetro. Siccome si tratta di una nozione importante conviene chiarirla con un esempio. In una piazza possiamo immaginare una folla confusa, o un reparto militare inquadrato; la folla confusa rappresenta il vetro e il reparto inquadrato rappresenta un cristallo. È anche evidente che in un liquido le particelle non possono essere ordinate, perché il liquido è soggetto a rimescolamento (e abbiamo detto che il vetro si può considerare come un liquido solidificato). L'esempio della piazza permette di comprendere perché nel vetro la velocità di propagazione delle onde deve essere la stessa in tutte le direzioni. Invece in un cristallo non avviene lo stesso, ossia in una certa direzione la velocità di propagazione può essere diversa che in un'altra; proprio come se uno volesse attraversare una piazza occupata da un reparto inquadrato: se uno cammina parallelamente alle file dei soldati, può andare rapidamente, ma se le deve tagliare diagonalmente, deve procedere molto più lentamente.



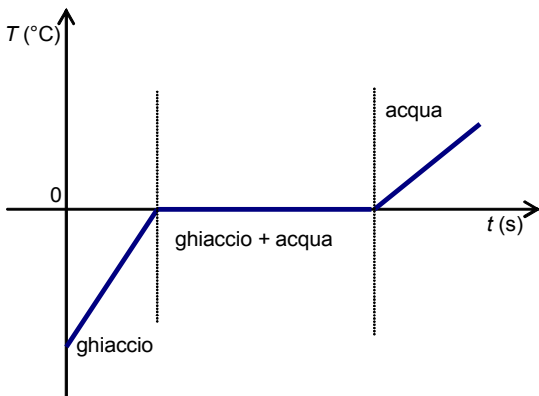
**Figura 4.** Struttura cristallina ordinata di un cristallo di quarzo.



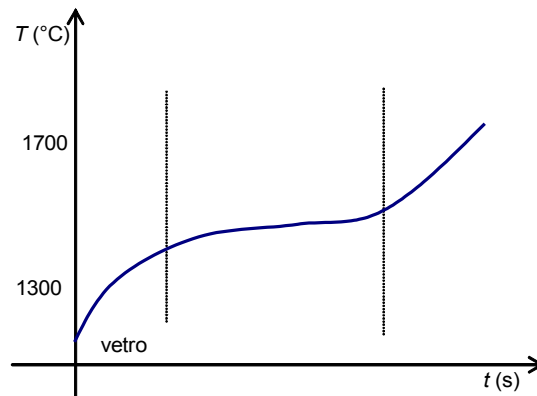
**Figura 5.** Struttura amorfa del vetro.

Un corpo in cui le caratteristiche sono identiche in tutte le direzioni, si dice **isotropo**; un corpo non isotropo si dice **anisotropo**. Si dice perciò che il vetro è isotropo e i cristalli sono anisotropi. L'anisotropia dei cristalli si manifesta in modo evidente: se si osservano attentamente dei granelli di sale da cucina o di zucchero, che sono appunto dei cristalli, si vedrà che presentano delle facce, ossia delle superficie piane, che in tutti i granelli fanno fra loro angoli identici; tali facce sono parallele ai piani secondo cui sono disposti gli atomi nel cristallo. Invece se si osserva un frammento di vetro spezzato non vi vede traccia di facce come quelle dei cristalli.

La differenza tra stato vetroso e stato cristallino si manifesta anche dal fatto che un vetro o una sostanza amorfa e una sostanza cristallina si comportano in maniera differente durante la loro fusione: nel primo caso, con l'aumento della temperatura, il vetro passa dallo stato solido a quello liquido attraverso uno stato pastoso rammollendosi gradualmente senza presentare un netto punto di fusione; nel secondo caso, con l'aumento della temperatura, la sostanza cristallina passa allo stato liquido solo quando ha raggiunto la temperatura di fusione (caratteristica per ogni sostanza), che rimane costante finché tutto il solido non è diventato liquido (figure 6 e 7).



**Figura 6.** La fusione di una sostanza cristallina (ghiaccio).



**Figura 7.** La fusione pastosa del vetro.

Conviene segnalare che nel linguaggio comune si chiama cristallo quel vetro al piombo che appare molto brillante e anche molto sonoro se si urta con un cucchiaio; se ne fanno servizi da tavola di lusso e oggetti di pregio in generale. Si chiamano cristalli anche i vetri dei finestrini delle automobili e quelli delle vetrine; in realtà si tratta di vetro comune, soltanto che ha uno spessore intorno al centimetro e le sue facce sono state lucidate con mezzi abrasivi. In entrambi i casi si tratta di vetro, e non di cristalli con una struttura cristallina.

### La composizione del vetro

Il vetro è ottenuto fondendo nell'intervallo di temperatura 1300-1700 °C una miscela di polveri i cui principali componenti sono:

- **silice** ( $\text{SiO}_2$ ) in genere sotto forma di sabbia silicea o quarzifera;
- **carbonati alcalini** ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ );
- **calcare** ( $\text{CaCO}_3$ ) in genere sotto forma di carbonato di calcio puro.

Se queste sostanze sono pure, il vetro è incolore. Se nella miscela di base si introducono altre sostanze, si ottengono vetri con caratteristiche diverse. In particolare se vi si introducono dei metalli, il vetro diviene colorato, perché risulta trasparente solo a radiazioni di determinata lunghezza d'onda (colore). Così i vetri rossi si ottengono mettendo nella miscela del rame o del selenio, o anche dell'oro; vetri verdi si ottengono mettendo del ferro nella miscela vetrificabile; col cobalto si ottengono i vetri azzurri. Interessante è il caso del ferro, perché il colore leggermente verdognolo del comune vetro da finestra (visto di taglio) è dovuto proprio a una piccolissima percentuale (circa lo 0,02%) di ferro che si trova, come impurità, nella silice comune.

Già nella produzione del vetro ordinario, da alcuni secoli, è stato introdotto il piombo, ottenendo così il vetro flint; il piombo, pur essendo un metallo, colora molto poco il vetro, e soltanto quando vi è messo in una percentuale elevata (anche del 50%) gli fa assumere una colorazione giallina. Ma quando la percentuale di piombo è modesta, il vetro assume delle caratteristiche che lo rendono più pregiato del vetro comune e nel commercio vetrario viene detto impropriamente, come si è visto, cristallo.

La struttura molecolare del vetro è simile a quella di un polimero, come mostra la figura 5. Le catene di atomi dei metalloidi (Si, B, P ecc.) sono legate tra loro attraverso atomi di ossigeno, mentre gli atomi degli elementi metallici (Na, K, Ca, Pb ecc.) sono legati a tali catene mediante legami ionici. Tali catene sono altresì ramificate in modo da formare un vero e proprio reticolato che rende vischiosa la massa fusa e impedisce la formazione e separazione di composti cristallini.

In relazione alla loro funzione, le sostanze che costituiscono il vetro si suddividono solitamente in:

- **sostanze vetrificanti** (silice, anidride borica e fosforica);
- **sostanze fondenti** (ossido di sodio);
- **agenti riduttori e agenti ossidanti**;
- **agenti per la raffinazione del vetro**;
- **agenti stabilizzatori dello stato vetroso** (ossido di calcio);
- **additivi** (coloranti come l'ossido di ferro o decoloranti come l'ossido di magnesio e altre sostanze che conferiscono al vetro particolari caratteristiche).

Le **sostanze vetrificanti** sono **anidridi** (cioè ossidi a carattere acido) che impartiscono alla massa vetrosa lo stato vetroso, e reagendo con gli ossidi di carattere basico (fondenti stabilizzanti) formano i sali che costituiscono il vetro finito.

### **Proprietà ottico-fisiche del vetro**

Il vetro ordinario (vetro **crown**) ha indice di rifrazione intorno a 1,5 (un valore tipico è  $n_e = 1,523$ ) e disperde poco la luce, dato che il suo numero di Abbe è pari a circa 60. La sua densità è pari a circa  $2,5 \text{ g/cm}^3$ . Il vetro **flint** si ottiene aggiungendo piombo ai componenti del vetro: in questo modo si aumenta l'indice di rifrazione (fino a circa 1,7), ma si aumenta anche la dispersione (il numero di Abbe di un vetro flint può essere pari a circa 30) e la densità del vetro (fino a  $4 \text{ g/cm}^3$ ).

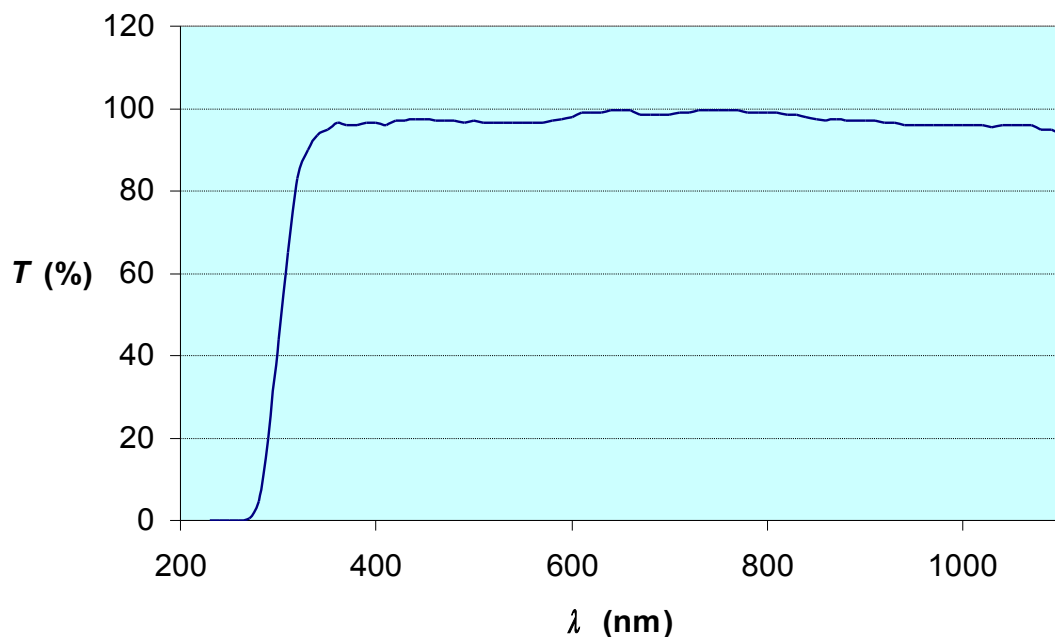
Anziché il piombo, possono essere utilizzati, per aumentare l'indice di rifrazione, il titanio (nelle lenti oftalmiche) e il bario o il lantanio (nelle lenti per ottiche di precisione). Con vetri al titanio si possono ottenere lenti con indice di rifrazione pari a 1,70 e densità di  $3,0 \text{ g/cm}^3$ . A parità di potere, lo spessore e il peso di queste lenti risulta inferiore a quello di lenti in vetro crown o in vetro flint al piombo, come si può vedere nella tabella.

*Tabella di confronto di spessori e pesi riferita a lenti negative con diametro di 60 mm.*

Potere sferico in diottrie	Spessore al bordo (mm)			Peso in grammi		
	Titanio	Flint	Crown	Titanio	Flint	Crown
-5	4,20	4,34	5,58	20,78	29,17	22,74
-10	7,62	7,86	10,84	33,75	47,47	39,56
-15	11,67	12,29	18,52	49,38	70,34	61,62
-20	18,17	19,25	---	70,13	99,88	---



In generale il vetro ottico è quasi perfettamente trasparente alle radiazioni visibili, con valori della trasmittanza dell'ordine del 99% per uno spessore di 1 cm. Passando all'ultravioletto le radiazioni subiscono un assorbimento di intensità rapidamente crescente. Per i vetri flint con indice di rifrazione più elevato la banda di assorbimento si avvicina alla zona della radiazione visibile: questi vetri assorbono un poco nella parte blu-violetta della banda visibile e appaiono con una sfumatura di colore giallastra. Nella figura 8 è riportata la curva di trasmittanza (in percentuale) per un vetro crown dello spessore di 1 mm, che mostra assorbimento nell'UV a partire da circa 330 nm. La trasmittanza di uno spessore di 1 mm di vetro crown nella banda UV-A (da 320 nm a 380 nm) è pari all'84,3% e nella banda UV-B (da 286 nm a 320 nm) è pari al 30,5%.



**Figura 8.** Curva di trasmittanza per un vetro crown dello spessore di 1 mm.

La **durezza** è una caratteristica che assume notevole importanza in quanto indica la resistenza del materiale alle abrasioni, e ha importanza per quanto riguarda la facilità con cui viene scalfito dai materiali con cui viene a contatto.<sup>1</sup> Uno dei motivi per cui le lenti costruite con vetri flint non hanno avuto successo in

1 La **durezza** dei materiali viene riferita alla **scala di Mohs**, dal nome del mineralogista tedesco Friedrich Mohs (1773-1839) che fissò dieci minerali di riferimento, scelti in modo che ciascuno di essi scalfisce tutti quelli di numero inferiore e viene scalfito da tutti quelli di numero superiore, così ordinati:

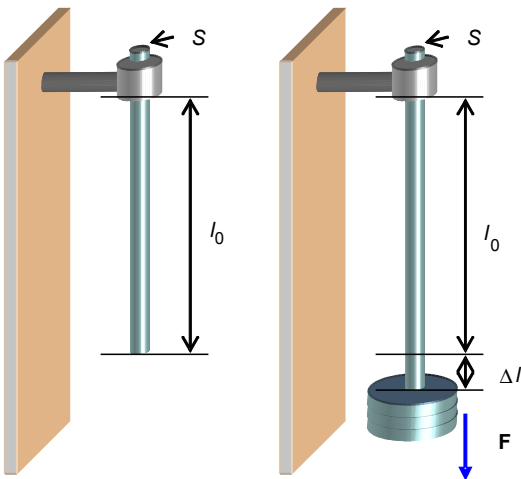
Minerale	Durezza
Talco	1
Gesso	2
Calcite	3
Fluorite	4
Apatite	5
Feldspato	6
Quarzo	7
Topazio	8
Corindone	9
Diamante	10

occhialeria è da riscontrare nel fatto che questo vetro è molto tenero e quindi facilmente rigabile. Il valore della durezza del vetro varia molto a seconda della composizione oscillando tra 4 e 8 della scala di Mohs delle durezza.

Benché il vetro sia alla temperatura ambiente un liquido ad altissima viscosità, si comporta a tutti gli effetti come un solido fragile e indeformabile. L'**elasticità** di un materiale è indicata dal suo modulo di Young, che per il vetro ha un valore compreso tra 45 e 83 GN/m<sup>3.2</sup>

Il vetro è un ottimo isolante termico (anche se in assoluto esistono altre sostanze più isolanti, come per esempio il legno o il sughero). La sua **conduttività termica** è quindi piuttosto bassa ed è compresa tra 6,7 e 12,6 kW/(°C m).

2 L'**elasticità** di un materiale è misurata dall'allungamento di un filo o di una barretta del materiale in questione, in funzione della tensione applicata. Disponiamo un sottile filo di acciaio di lunghezza  $l_0$  e sezione  $S$  in un opportuno apparato di misura, e sottoponiamolo a una leggera tensione, misurando la forza  $F$  esercitata e l'allungamento  $\Delta l$  che ne risulta, come mostra la figura.



Ripetendo la misura per diversi valori della forza  $F$  si verifica una proporzionalità diretta tra l'allungamento relativo  $\varepsilon = \Delta l/l_0$  e il carico  $\sigma = F/S$ . Questo risultato è espresso dalla **legge di Hooke** (formulata dal fisico inglese Robert Hooke – 1632-1705). La costante di proporzionalità

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F l_0}{S \Delta l}$$

è detta **modulo di elasticità** o **modulo di Young** (dal nome del fisico inglese Thomas Young – 1773-1829), ha le dimensioni di una forza per unità di superficie, ossia di una pressione, e si misura quindi in pascal. La tabella che segue riporta i valori del modulo di Young per diversi materiali.

Materiale	E (GPa)		Materiale	E (GPa)
Materiali ceramici:	WC	500-600	Diamante	1.000
	SiC	450	Quarzo	72,5
	TiC	320	Vetro	45-83
Metalli:	Iridio	530	Granito	60
	Tungsteno	345	Calcestruzzo	20-40
	Molibdeno	325-345	Marmo	5
	Berillio	275-305	Grafite	2-17
	Nichel	214	Legno (parallelo alle fibre)	7-14
	Acciaio	193-207	Legno (perpendicolare alle fibre)	0,5-1
	Ferro	172-193	Osso	9-16

Il vetro è anche un ottimo isolante elettrico. Alla temperatura di 20 °C la sua **resistività elettrica** è dell'ordine di  $\rho = 10^{13} \Omega \text{ m}$ . La sua **costante dielettrica relativa**  $\epsilon_r$  dipende dal tipo di vetro e varia dal valore 4,7 per i vetri pyrex al valore 3,75 per i vetri di silice. Per i vetri pesanti (flint) raggiunge anche il valore 10.

La **rigidità dielettrica** del vetro (ossia la tensione elettrica alla quale il materiale viene attraversato da una scarica elettrica) è elevatissima, dell'ordine di 10-40 kV/mm.

## La produzione del vetro

Il vetro viene ottenuto, come si è visto, per **fusione** dei materiali componenti. La realizzazione della massa vetrosa omogenea dalla miscela costituente la carica avviene per fusione nei forni che, per i vetri d'ottica e per i cristalli, sono generalmente dei crogioli di materiale refrattario (mullite o zircone) o di platino. Anche se i vari costituenti della miscela hanno punti di fusione diversi, nell'intervallo di temperatura 1350-1600 °C la massa vetrosa assume carattere di liquido viscoso. Le eventuali bolle di gas presenti nella massa fusa vengono eliminate mediante opportuno mescolamento e con l'introduzione di sostanze raffinantanti quali l'anidride arseniosa o il nitrato sodico che agisce da ossidante. Questa operazione viene chiamata **raffinazione**. Abbassando la temperatura la viscosità del liquido raggiunge valori così elevati da conferirgli l'aspetto pratico del vetro: rigido e indeformabile.

Nella produzione di vetro per l'ottica di precisione la fase di raffreddamento avviene (con la chiusura del crogiolo) molto lentamente – di solito qualche giorno – e ciò per evitare la formazione di tensioni interne a causa del gradiente termico tra la superficie esterna del liquido, più fredda, e la massa vetrosa interna più calda. Nonostante ciò, come si è visto, la creazione di tensioni interne è sempre possibile e quindi si ricorre al trattamento termico della **ricottura**.

Per la produzione di sbocchi per lenti oftalmiche si ricorre invece alla tecnica dello **stampaggio** con metodo automatico. La fusione non avviene in un crogiolo di capacità limitata, ma in forni muniti di una grande vasca di fusione rivestita di platino, che consente il funzionamento continuo, o quasi, per diversi anni (figura 9). La vasca di fusione è relativamente lunga e stretta: da una parte si immette la miscela di materie prime e dall'altra si spilla il vetro fuso, perfettamente omogeneo, grazie a un'opportuna miscelazione.

Il vetro può essere colato in blocchi, che vengono poi raffreddati e lavorati, oppure fatto cadere, in gocce di opportune dimensioni, nella forma di una pressa automatica. La pressa possiede un piatto a giostra munito di più forme. La goccia cade nella forma, poi viene pressata e passa attraverso stazioni successive, nelle quali viene raffreddata gradualmente, prima con fiamma a gas, poi con getti di aria calda. Al termine del percorso la lente pressata, ancora molto calda, viene espulsa e posta su un nastro trasportatore a maglie metalliche, che entra nel forno finale di raffreddamento, da cui escono i "presslinge" pronti per la sbazzatura.

Il vetro ottico viene quindi venduto dalle vetrerie come:

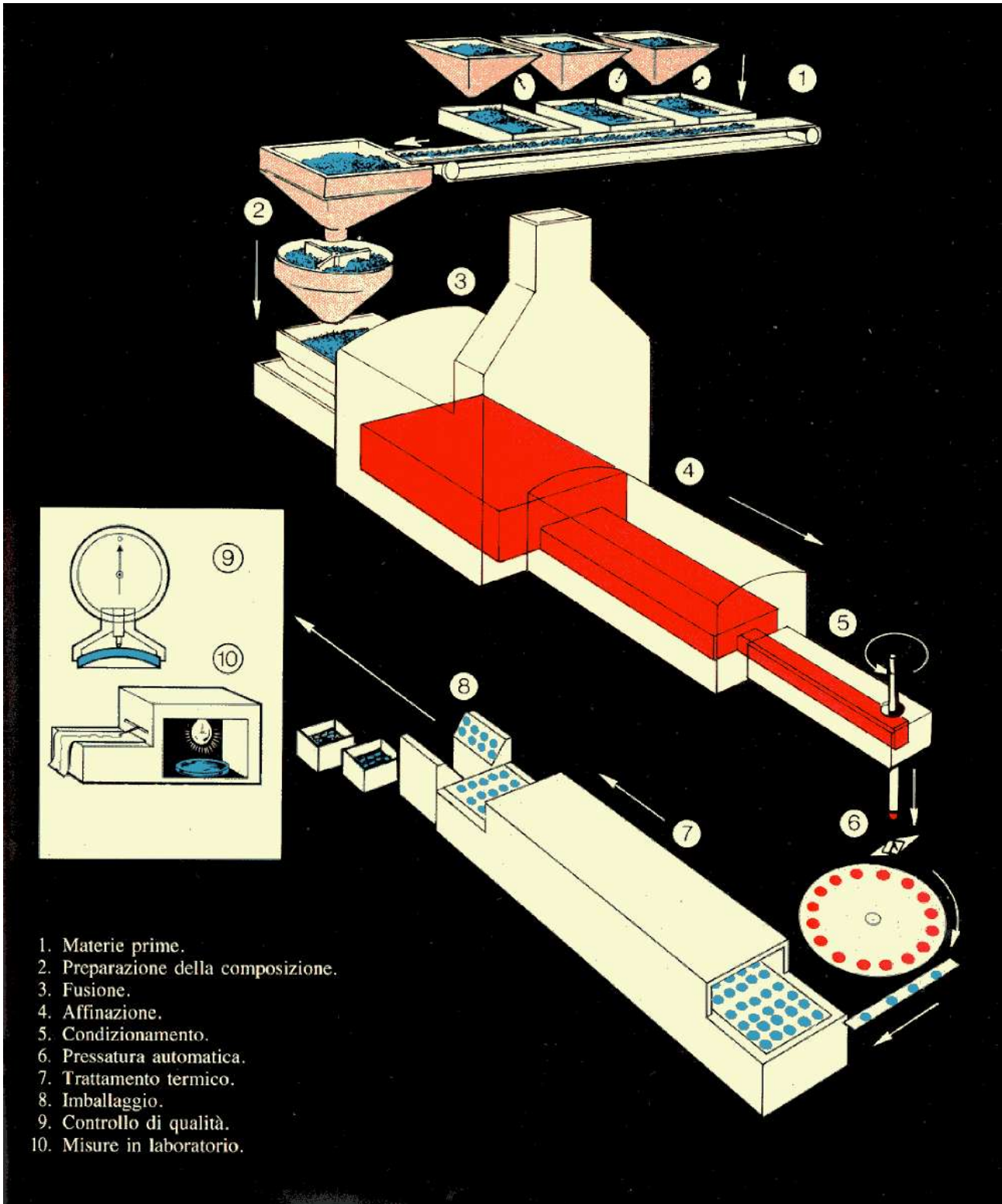
---

Ghisa dolce	110	Polimeri:	Polietilene	7-14
Rame	123		Polistirene	5,4
Ottone	110		Cloruro di vinile	2-3,5
Bronzo	110		Nylon	1,1-2,8
Titanio	104		Poliuretano espanso	0,006-0,07
Zinco	90		Polistirene espanso	0,055
Argento	74			
Alluminio	70	Gomma		0,001-0,007
Piombo	14			

a) piastre quadrate o rettangolari (di dimensioni  $70 \times 70$  cm o  $120 \times 120$  cm con spessore da 2 a 30 mm); le piastre possono essere di 1° qualità (non hanno strie); di 2° qualità (strie debolissime); di 3° qualità (con strie visibili con il metodo a liquido, ma non a vista contro luce);

b) semilavorati o "sbozzi", ottenuti per stampaggio di vetri di prima qualità;

c) "presslinge" pronti per la sbozzatura, prodotti con il metodo automatico.



**Figura 8.** Schema della linea di produzione degli sbozzi grezzi per occhialeria.

## La lavorazione del vetro

Il vetro che deve esser portato alla forma di lente viene lavorato esclusivamente a freddo, cioè non viene mai riscaldato al punto che si possa deformare. Il vetro, quando viene scaldato, comincia a rammollirsi e a deformarsi: un blocco di vetro ottico che per qualche ragione accidentale o volontaria venisse rammollito deve esser considerato perduto, se non altro perché la sua rifrangenza e la sua dispersione sono cambiate, e i dati che prima si avevano ora non valgono più e per determinarli di nuovo, con la tolleranza ottica, occorre un lavoro tale che conviene comprare un blocco di vetro nuovo.

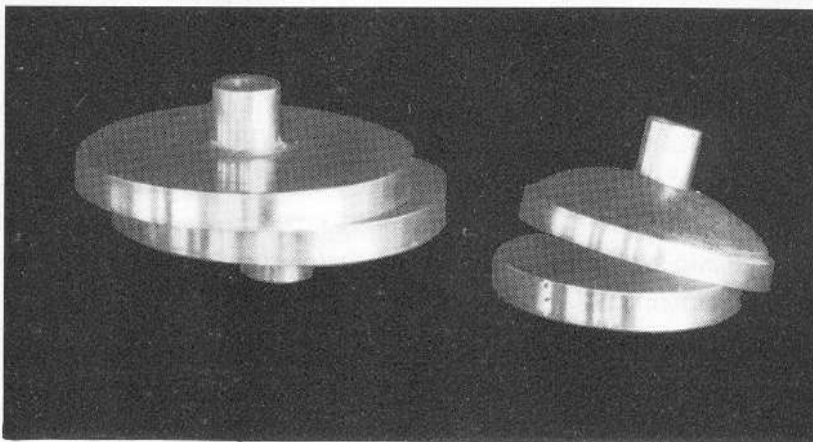
La lavorazione a freddo consiste in abrasione, mediante polveri più dure del vetro, che può avvenire mediante lavorazione manuale o a macchina. Per portare un blocco di vetro come viene dalla vetreria ad essere un'ottica conforme a una ricetta ottica si è soliti dividere la lavorazione in tre stadi, che corrispondono a tre livelli diversi di finezza:

- 1) sgrossatura;
- 2) smerigliatura;
- 3) lucidatura o pulitura.

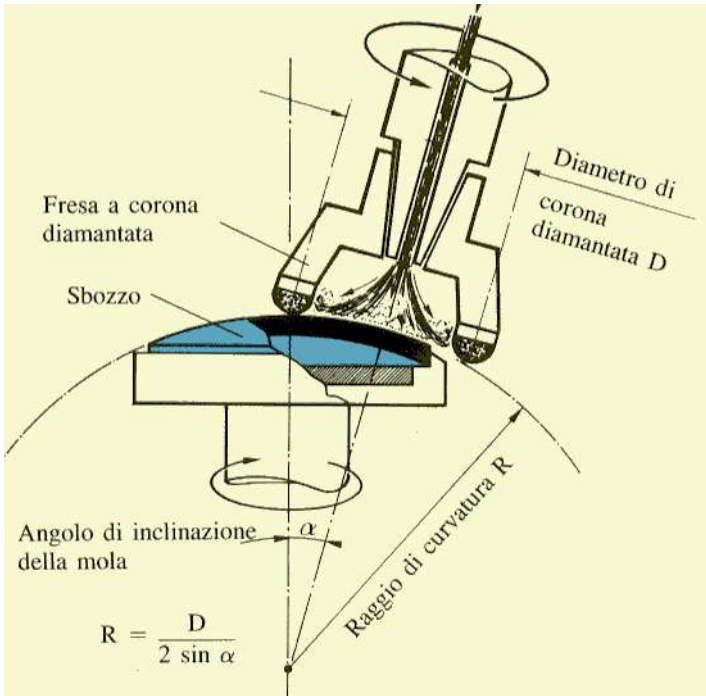
Ogni fase richiede macchine, utensili e processi particolari.

### Sgrossatura

La **sgrossatura** consiste nel dare al vetro lo spessore definitivo e i raggi di curvatura corrispondenti alla ricetta ottica. Può essere effettuata con lavorazione manuale quando si tratta di pezzi singoli, o a macchina per la lavorazione in serie. Nella lavorazione a mano il blocco di vetro viene sottoposto ad abrasione usando come abrasivo sabbia silicea, consumando il vetro sopra utensili, come quelli indicati nella figura 9, che si chiamano *pàtine*. Sono delle coppe concave o convesse di bronzo o di ghisa, che hanno una superficie curva, dotata del raggio di curvatura che dovrà avere la faccia della lente in lavorazione. La *pàtina* è fissata sull'asse di un tornio verticale e ruota con una velocità di circa 150 giri al minuto. L'abrasivo si interpone sospeso in acqua fra vetro e metallo, e per lo sfregamento il vetro si consuma e assume la forma della *pàtina*. Nella lavorazione a macchina il vetro viene consumato dalla rotazione di una fresa a corona diamantata con asse inclinato di un angolo  $\alpha$  che dipende dal raggio di curvatura  $R$  della superficie da realizzare (figura 10).



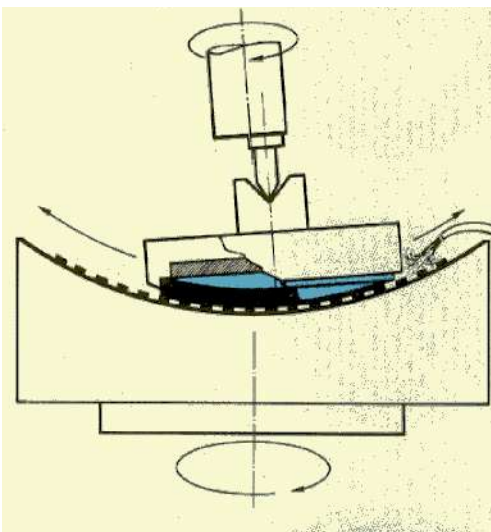
**Figura 9.** Coppie di patine in ghisa utilizzate per lavorazione manuale delle lenti.



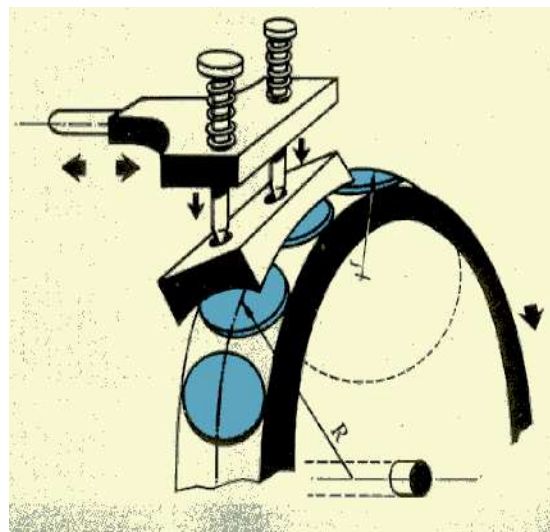
**Figura 10.** Sbozzatura di una superficie convessa.

### Smerigliatura

Il blocco sgrossato viene consumato ancora, ma finemente, senza modificare il raggio di curvatura, mediante polveri chiamate smerigli, composte per lo più di corindone o di carborundum; perciò l'operazione si chiama **smerigliatura** (o anche **lappatura**). Gli smerigli sono di grana molto uniforme, e ve ne è di quelli i cui grani sono dell'ordine del decimo di mm, e altri via via più fini fino a quelli che hanno granuli di appena  $3 \mu$ . Il blocco di vetro viene sottoposto all'abrasione con questi smerigli cominciando dai più grossi, usando come utensile nella lavorazione manuale una patina di ghisa in rotazione a 150 giri al minuto, e nella lavorazione automatica una patina di alluminio ricoperta da pastiglie diamantate, o da una pellicola abrasiva composta da grani finissimi di diamante annegati in un legante di bronzo sinterizzato, in rotazione alla velocità di 400 giri al minuto (figure 11 e 13).



**Figura 11.** Lappatura di una superficie concava.



**Figura 12.** Lappatura di lenti toriche su un anello rotante.

## Lucidatura

Al termine della smerigliatura il diametro, le curve e lo spessore del vetro hanno tutta la precisione richiesta. Le due facce della lente sono lisce ma opache. E' necessario lucidarle per renderle trasparenti. Si passa allora alla terza fase, ossia alla **lucidatura** o **pulitura**. Come principio questa operazione è identica alla precedente. La pàtina è ricoperta da un panno di feltro o nella lavorazione automatica da una pellicola di resina poliuretanaica.

Lo smeriglio o il diamante in granelli sono sostituiti da un abrasivo ancora più fine, ad esempio l'ossido di cerio o di titanio, mescolato ad acqua. Queste polveri finissime venivano un tempo dette "rossetti", perché la più usata era il cosiddetto rossetto inglese, che è semplicemente ossido di ferro.

Durante la pulitura viene levata una piccolissima quantità di materiale. Contemporaneamente si determina uno scorrimento: le rugosità che costituiscono la grana della superficie vengono progressivamente spinte nei vuoti, in modo da rendere perfettamente liscia la superficie.



**Figura 13.** Coppia di patine per la lappatura automatica, con pastiglie diamantate.



**Figura 14.** Coppia di patine per la lucidatura automatica, con pellicola di resina poliuretanaica.

## I vetri organici

Con l'espressione "vetri organici" (non rigorosamente scientifica) vengono definiti quei mezzi ottici trasparenti realizzati mediante polimeri del carbonio. Sono molto diffusi in ottica oftalmica e hanno molte proprietà vantaggiose rispetto ai vetri minerali.

In generale per polimero si intende una macromolecola, ossia una molecola di elevato peso molecolare, costituita dalla ripetizione di un grande numero di gruppi molecolari, detti monomeri, legati tra loro da legami covalenti. Sono polimeri le materie plastiche, vari tipi di gomme e di fibre sintetiche.

### CR-39

Si tratta di un polimero sintetico termoindurente appartenente alla classe dei poliesteri (carbonato di dialliglicole). E' stato sintetizzato per la prima volta dalla Columbia Chemical (ora Pittsburg Plate Glass Ind. - PPG; la sigla indica la trentanovesima formula sviluppata nel 1940 nell'ambito del progetto "Columbia Resins"). Le sue caratteristiche sono le seguenti:

- Indice di rifrazione  $n = 1,498$ . Questo valore relativamente modesto comporta che, a parità di potere diottrico, una lente in CR-39 ha uno spessore maggiore della corrispondente lente in vetro minerale.
- Densità  $\rho = 1,32 \text{ g/cm}^3$ . Questo valore è circa la metà di quello del vetro crown ( $2,54 \text{ g/cm}^3$ ) e ciò conferisce alla lente organica una leggerezza decisamente superiore.
- Numero di Abbe  $\nu = 57,8$ .
- Il CR-39 presenta una buona protezione UV in quanto taglia completamente la radiazione UV-B al di sotto di 320 nm e una buona parte della radiazione UV-A (la trasmittanza nella banda UV-A tra 380 nm e 320 nm di uno spessore di 1 mm di CR-39 è pari al 10,3%).
- Durezza. Il CR-39 è un materiale più morbido del vetro e a tale inconveniente si ovvia con opportuni trattamenti antigraffio, il più diffuso dei quali è il coating organico. Si tratta di un rivestimento con una vernice antigraffio di 4-6  $\mu\text{m}$  realizzato mediante un bagno in polisilossano (materiale trasparente organico contenente silice). Il trattamento antigraffio si accompagna a quello antiriflesso in quanto l'indice di rifrazione della vernice è di poco inferiore a quello del CR-39.
- Ottima resistenza chimica: non viene intaccato da acqua, alcol etilico, trielina, acetone o diluente nitro; può quindi essere pulito con acetone o con alcol.
- Non deve essere scaldato oltre i 100 °C.

La resistenza meccanica e l'elasticità del CR-39 sono scarse, per cui non è adatto per montature a giorno se lo spessore è minore di 4-5 mm.

### **PC (policarbonato)**

Si tratta di un materiale termoplastico (inizia a rammollirsi a 150 °C e diviene fluido a 300 °C) che presenta la notevole caratteristica di avere una struttura molecolare completamente amorfa. Ciò rende tale mezzo molto resistente agli urti, 50 volte superiore alla resistenza del CR-39 e circa 250 volte quella del vetro crown non temprato, e per questo motivo è il materiale preferito per gli occhiali per bambini. Le sue caratteristiche sono le seguenti:

- Indice di rifrazione  $n = 1,587$ .
- Densità  $\rho = 1,20 \text{ g/cm}^3$ .
- Numero di Abbe  $\nu = 29$ .
- E' completamente opaco ai raggi UV: la trasmittanza si riduce bruscamente a zero a circa 400 nm.
- Resta stabile fino a 130 – 140 °C, e può quindi essere usato in qualunque condizione termica normale.
- Può essere pulito con alcol ma non con acetone.

Le prime due caratteristiche fanno sì che una lente in policarbonato, a parità di potere, risulti decisamente più leggera di una lente in CR-39 o in vetro minerale. Le qualità ottiche del policarbonato sono però mediocri, dato che per il suo numero di Abbe, che è il più basso tra quelli dei materiali utilizzati in ottica oftalmica, le lenti in policarbonato soffrono di aberrazione cromatica.

La sua resistenza meccanica risulta ridotta in corrispondenza di intagli e di fori, e per questo non è adatto all'uso in montature a giorno.



Come curiosità, si può aggiungere che il cockpit del caccia supersonico F-22 Raptor è formato da un unico blocco di policarbonato di alta qualità ottica.

### **Materiali ad alto indice di rifrazione**

Diversi produttori offrono polimeri con indice di rifrazione pari a 1,60, 1,66 o anche 1,70. Con questi materiali è possibile realizzare lenti che, a parità di potere, sono meno curve e più sottili di quelle ottenute con materiali a indice di rifrazione inferiore.

I materiali ad alto indice di rifrazione tendono però ad avere un numero di Abbe inferiore rispetto a lenti realizzate con materiali più convenzionali, e soffrono maggiormente quindi di aberrazione cromatica. Sono anche leggermente più pesanti. Una lente organica con indice di rifrazione 1,66, per esempio, ha un numero di Abbe pari a 32 e una densità di 1,35 g/cm<sup>3</sup>.

Un altro problema che si presenta con materiali ad alto indice di rifrazione è la maggiore riflettività. Un materiale con indice di rifrazione 1,66 riflette il 6,3% della luce incidente su ogni superficie, rispetto al 4,0 % del CR-39. Per questo motivo, e anche per la minore curvatura delle superfici, si possono avere con queste lenti riflessi fastidiosi. Per eliminarli sono necessari trattamenti superficiali antiriflesso.

### **Trivex**

Trivex è un materiale sviluppato nel 2001 dalla PPG, che unisce la resistenza meccanica del policarbonato con una grande qualità ottica e una grande leggerezza. Le sue caratteristiche sono:

- Indice di rifrazione 1,53 simile a quello del CR-39 e del vetro crown.
- Numero di Abbe 46, sufficientemente elevato da non dare problemi di aberrazione cromatica.
- Densità 1,11 g/cm<sup>3</sup>: è il materiale più leggero disponibile per la produzione di lenti oftalmiche.
- Opacità ai raggi UV.

Diversi produttori offrono lenti in Trivex con differenti nomi commerciali (“Phoenix” per Hoya, “Trilogy” per Younger Optics, ecc.). La struttura polimerica interna del Trivex lo rende particolarmente resistente e adatto per la realizzazione di montature a giorno, tanto che Younger Optics fornisce per le sue lenti “Trilogy” una garanzia a vita contro rotture provocate dalle montature.

### **La produzione delle lenti organiche**

Le lenti organiche vengono prodotte a partire dai componenti del materiale plastico (monomeri) che vengono colati o iniettati allo stato fuso in uno stampo nel quale avviene il processo di polimerizzazione. Lo stampo ha superfici lavorate e lucidate ad alta precisione e la lente esce dallo stampo già trasparente e lucida.

Le fasi di lavorazione sono differenti nel caso si utilizzi un materiale termoindurente (per esempio CR-39) o un materiale termoplastico (come il policarbonato).

Nel caso di materiale termoindurenti gli stampi sono costituiti da due superfici in vetro temperato assemblate mediante un giunto di materiale plastico; il tutto è bloccato da una molla. Nello stampo viene colato il monomero allo stato liquido insieme a un catalizzatore che consente l'indurimento del materiale durante il ciclo di polimerizzazione, che consiste in un'operazione di riscaldamento controllato, durante tempi compresi tra 6 e 30 ore, a temperature comprese tra 40 °C e 80 °C. Lo stampo viene quindi aperto e se ne estrae la lente finita.

Le lenti in polycarbonato vengono invece prodotte per iniezione in stampi metallici. Il materiale di partenza si presenta in forma granulare e viene riscaldato in modo da ottenere una massa viscosa che viene iniettata a forte pressione negli stampi, nei quali raffreddando solidifica producendo la lente finita. Si tratta di un processo che richiede macchine di grandi dimensioni.

Normalmente le aziende produttrici di lenti oftalmiche (in materiale organico ma anche in vetro) realizzano sia lenti finite, con un determinato assortimento di poteri, diametri e tipologie, che vengono conservate in magazzino pronte per l'uso (lenti a stock), sia "semilavorati", ossia lenti che presentano una sola superficie finita mentre l'altra superficie viene lavorata secondo le richieste pervenute dall'ottico, telefonicamente o via fax o e-mail (lenti a ricetta). Nei cataloghi delle aziende sono specificate quali lenti sono disponibili a stock e quali devono essere prodotte a ricetta.

Nella lavorazione delle lenti a ricetta la superficie già finita viene protetta con uno strato di plastica adesiva; l'altra superficie viene lavorata attraverso le fasi di sbazzatura, lappatura e lucidatura che abbiamo già descritto per la lavorazione delle lenti in vetro, senza che vi siano sostanziali differenze per la lavorazione di lenti in materiale organico, tranne per il fatto che vengono utilizzati supporti di materiale più morbido e abrasivi differenti.

### **Gli abrasivi utilizzati per la lavorazione delle lenti**

Gli **abrasivi** (dal latino ab-radere = raschiare via) sono prodotti naturali o artificiali di grande durezza, usati nella tecnica per tagliare, sbazzare, sgrassare, affilare, lucidare metalli, pietre, vetri.

Gli abrasivi vengono utilizzati, a seconda dei casi, in modi diversi:

- 1) in granuli più o meno sottili o in polveri impalpabili sia allo stato secco, sia in sospensione in acqua o olio (in questo caso sono impastati insieme);
- 2) foggiate con leganti in forme determinate nelle **mole** abrasive;
- 3) fissati su supporti flessibili, carte, tele.

Le proprietà caratteristiche degli abrasivi devono essere:

- a) **durezza elevata** (nel caso specifico del vetro, che ha una durezza intorno a 6,5-7,5 della scala di Mohs, l'abrasivo deve avere una durezza superiore);
- b) **tenacità e resistenza alla frantumazione;**
- c) **resistenza all'usura;**
- d) tendenza a dare una **frattura a spigoli vivi e taglienti;**
- e) **inalterabilità durante la lavorazione** (si sviluppa del calore che non deve alterare la composizione dell'abrasivo).

Nella lavorazione del vetro vengono utilizzati gli abrasivi elencati nel seguito.

### **Quarzo, quarziti e rocce silicatiche**

La **sabbia silicea** ( $\text{SiO}_2$ ) si usa per sgrassare il vetro, sospesa in acqua e usando come utensili patine di ghisa.

### **Corindone, smeriglio naturale e artificiale**

Il **corindone** è un sesquiossido di alluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) cristallizzato nel sistema romboedrico. Si trova in natura nelle varietà più pure (rubino, zaffiro) o in blocchi opachi spesso colorati di bruno perché impuri di ossido di ferro (corindone comune), in Canada, Sud-Africa, Madagascar e Australia. Lo **smeriglio** è corindone (30-

80%) contenente magnetite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$  - 20-50%) e silicati (1-9%); si presenta in masse compatte o granulose e si trova in Grecia nell'isola di Nasso, in Turchia e negli Stati Uniti). Il corindone occupa il penultimo posto nella scala di Mohs ed è quindi la pietra naturale più dura dopo il diamante. Ha densità  $4 \text{ g/cm}^3$ .

Gli smerigli nuovi, mai usati, sono di colore blu cupo, ma diventano di colore bruno rossiccio a causa della formazione dell'ossido di ferro che si produce a contatto con l'acqua. Gli smerigli vengono commercializzati in polveri più o meno fini; in seguito a setacciatura si classificano, a seconda della grossezza, in:

Smerigli grossi:	Triplo zero	000
	Doppio zero	00
	Zero	0

Le polveri più sottili vengono classificate in seguito a "levigazione" in acqua, e sono contraddistinte con numeri che indicano il tempo, in minuti, di decantazione (sedimentazione della sospensione delle particelle in acqua)

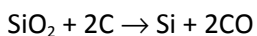
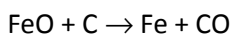
Smerigli minuti:	smerigli da 1 minuto	n.1
	smerigli da 2 minuti	n.2
	smerigli da 40 minuti	n.40
	fino a smerigli da 200 minuti	n.200

Lo smeriglio n.1-2 si ottiene per macinazione e vagliatura. Gli smerigli più fini si ricavano dagli strati acquosi decantati dopo il corrispondente tempo di riposo. Gli smerigli minutati hanno maggior pregio, perché possiedono una granulazione più uniforme. Gli smerigli di provenienza dubbia sono spesso mescolati a scopo di lucro con sostanze meno dure che ne diminuiscono il pregio.

Lo **smeriglio artificiale** si ottiene in forni elettrici fondendo bauxite, coke e trucioli di ferro. Si potrebbe ottenere per fusione di allumina pura ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), ma non è conveniente per l'alto punto di fusione ( $2040 \text{ }^\circ\text{C}$  circa).

Lo smeriglio artificiale deve assomigliare il più possibile a quello naturale sia nella composizione che nella cristallizzazione. Si parte dalla bauxite, che è una miscela di minerali: diasporo ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), idrargillite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), con quantità spesso notevoli di silice ( $\text{SiO}_2$ ) e di ossidi di ferro, titanio, vanadio e manganese. Si usano forni elettrici monofase, ad arco, a funzionamento discontinuo, nei quali viene caricato il materiale (in proporzioni di 2900 kg di bauxite, 180 kg di coke, 200 kg di trucioli di ferro), con un consumo di 3500-4000 kWh per una tonnellata di corindone-smeriglio ottenuto.

Nella fusione il coke ha la funzione di ridurre l'ossido di ferro e la silice:



L'ossido di ferro e la silice sono presenti come impurezze nella bauxite. Si deve aggiungere il coke per ridurre gli ossidi (specialmente quello di ferro più abbondante) in metalli; così pure la silice viene ridotta a silicio metallico. Il ferro e il silicio si uniscono in lega, ma affinché questa sia magnetizzabile si aggiungono dei trucioli di ferro cosicché la lega risulta più ricca di ferro e perciò attratta magneticamente durante la frantumazione del corindone artificiale dopo l'estrazione dal forno di fusione. Lo smeriglio ottenuto è perciò molto povero di ossidi estranei all'ossido di alluminio  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

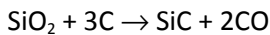
I migliori smerigli artificiali hanno la seguente composizione:  $\text{Al}_2\text{O}_3$  97-98%, meno e di 1% di  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  -  $\text{SiO}_2$  e meno di 1-2% di  $\text{TiO}_2$ . I blocchi provenienti dal forno, dopo la solidificazione, vengono spezzati al maglio, frantumati e polverizzati, cercando di fare la minor quantità possibile di polvere. Per la setacciatura si usano

36 vagli in modo da avere 36 dimensioni di granuli da 0,1 a 4 mm. Le polveri più fini vengono lavate e classificate per levigazione, come per lo smeriglio naturale.

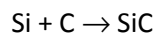
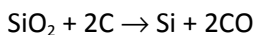
L'**alundum** è uno smeriglio fabbricato con bauxite molto purificata con aggiunta di piccole percentuali di ossidi metallici: ossido ferrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), biossido di titanio (TiO<sub>2</sub>), ossido di magnesio (MgO), ossido di calcio (CaO) e silice (SiO<sub>2</sub>). La massa fusa viene raffreddata con una giusta rapidità; le sostanze alcaline volatilizzando rendono porosa la massa variando le dimensioni dei cristalli di ossido di alluminio. Si ottiene una purezza del 99% di allumina sintetizzata.

### **Carborundum**

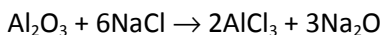
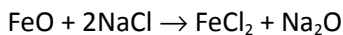
Il **carborundum** è un carburo di silicio (SiC). Si ottiene riscaldando quarzite macinata o sabbia quarzosa e coke o antracite o coke di petrolio, macinati in forni elettrici a resistenza a funzionamento continuo raggiungendo la temperatura di 2000 °C. Inoltre viene aggiunto del cloruro di sodio e della segatura di legno; il primo ha lo scopo di facilitare la volatilizzazione del ferro e dell'alluminio presenti come impurezze nella silice (si volatilizzano come cloruri); la seconda ha lo scopo di rendere porosa la massa e facilitare l'uscita dei gas. La reazione fra silice e carbone è



che avviene nei seguenti tempi:



La reazione inizia verso i 1600 °C con formazione di un prodotto amorfo che fra i 1900 °C e i 2000 °C diventa cristallino. Il carbonio prima riduce la silice in silicio metallico, che reagisce poi col carbonio per dare il carburo di silicio. L'aggiunta di cloruro di sodio NaCl si fa per separare il ferro e l'alluminio sotto forma di cloruri, che volatilizzano (alle alte temperature del forno):



Il carborundum ha un colore nero opaco con riflessi metallici (se si adopera però il coke di petrolio risulta trasparente di colore verde bottiglia). Ha densità 3,2 g/cm<sup>3</sup> e durezza 9,5 della scala di Mohs e cristallizza in tavolette esagonali. La sua struttura è simile a quella del diamante, ha cioè una simmetria tetraedrica con un atomo di silicio al centro di un tetraedro ai cui vertici sono i quattro atomi di carbonio.

Nel funzionamento del forno per la fabbricazione del carborundum si formano vari strati di materiale: si ha un nucleo centrale attorno al quale vi è uno strato di grafite, poi uno strato di carborundum ben cristallizzato, quindi vi è uno strato di carborundum semicristallizzato e amorfo, più esternamente si ha uno strato di ossicarburo di silicio contornato da una crosta più o meno compatta e da miscela inalterata che non ha reagito. Con un forno da 1000 kVA in 24 ore si ottengono circa 2 tonnellate di carborundum di prima qualità (cristallizzato) e 1,5 tonnellate di carborundum di seconda qualità (amorfo) più 3 tonnellate di ossicarburo. Il prodotto migliore ha la seguente composizione: silicio 68-69%; ferro inferiore a 0,3%; alluminio inferiore a 0,1%; il resto carbonio.

Il prodotto, dopo la cernita e la frantumazione (cercando di lasciare gli spigoli taglienti), si sottopone a separazione magnetica del ferro e al lavaggio con acido solforico per allontanare gli ossidi e il ferro-silicio. La polvere che si è formata durante la frantumazione viene classificata per levigazione e sedimentazione come per lo smeriglio. Nella classificazione del carborundum si deve tenere presente che esso ha una densità minore dello smeriglio, perciò un carborundum da 10 minuti è più grosso di uno smeriglio da 10 minuti.

Il carborundum viene utilizzato, al posto dello smeriglio, nelle seguenti lavorazioni del vetro:

- a) per sbizzare lenticole di piccolo diametro e di piccolo raggio;
- b) per sbizzare pezzi grossi quando vi è molto da togliere;
- c) per armare le seghe invece di impiegare schegge di diamante;
- d) per confezionare delle mole che servono per sgrossare i vetri concavi. Su macchine da rettifica le mole al carborundum possono anche servire per sbizzare delle superficie ottiche piane e cilindriche.

### **Diamante**

Il diamante è carbonio purissimo cristallizzato nel sistema monometrico (esacosottaedri o adamantoedri). Le qualità non abbastanza pure per gemme, colorate in giallo (bort) o in bruno e nero (carbonato), i frammenti e le polveri vengono adoperati come abrasivi. Oltre alla durezza altissima (10 nella scala Mohs) ha grande conducibilità termica e minimo coefficiente di dilatazione termica. La densità è  $3,5 \text{ g/cm}^3$ .

Può essere usato montato nelle trivelle e nei fioretti da mina, o in polvere per la lavorazione delle gemme; la polvere di diamante incorporata con vaselina è utile nella lavorazione di cristalli duri.

### **Ossidi**

Per la lucidatura del vetro vengono usati ossidi.

Il **rosso inglese**, detto anche rossetto o colcotar, è un sesquiossido di ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); può essere naturale o artificiale (ottenuto per calcinazione del solfato di ferro). E' una polvere più o meno fine che viene lavata e trattata come gli smerigli fini. Dopo il lavaggio viene passata al setaccio di seta, gettandovi sopra un po' di "rosso", sul quale si fa colare un filo d'acqua, mentre si stempera il "rosso" con un pennello. Il rosso inglese ha molto mordente sulle superfici di vetro e di quarzo, perciò è indicato per la pulitura rapida soprattutto in occhialeria con pulitori di feltro e panno.

L'**ossido di cerio** ( $\text{Ce}_2\text{O}_3$ ) è apprezzato per la pulitura a carta e per la pulitura su macchine con pulitori alla pece o con resine poliuretaniche, perché ha molto mordente sulle superfici. E' raccomandato per lavori di precisione in ottica, in quanto è adatto a togliere pochissimi strati di materiale. L'ossido, prima dell'uso, deve subire una calcinazione e poi un lavaggio e una setacciatura. La calcinazione si fa in stufa o su una lamiera posta su un fornello finché l'ossido non è diventato rosso, poi si lascia raffreddare.

L'**ossido di zirconio** ( $\text{ZrO}_2$ ) è molto usato per la pulitura dei vetri su patine di ghisa, sia a panno che a pece.

L'**ossido di alluminio** ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) è corindone in polvere molto fine ed è usato per la pulitura dello spato-fluore ( $\text{CaF}_2$ ), dell'aragonite ( $\text{CaCO}_3$ ) e di altri cristalli della stessa durezza (4 della scala Mohs).

### **Applicazioni di lavorazione**

Gli abrasivi usati come smeriglio per le operazioni di molatura, spianatura e lucidatura vengono suddivisi in vari tipi e contraddistinti in vari modi a seconda della fabbrica fornitrice.

Hanno l'indicazione "grana n. 2" gli abrasivi usati per la sgrossatura. Sono composti da grani da 500 micron e da 250 micron di carborundum e di alundum che si separano per setacciatura e sono spesso sostituiti da lame diamantate.

Per la smerigliatura si usano abrasivi con indicazione "grana n. 240", composti da grani da 60 micron e da 30 micron di aldenite (spoltiglia lavata di corindone) separati per setacciatura e decantazione; e abrasivi con indicazione "grana n. 600" composti da grani da 15 micron (quelli di produzione inglese sono contraddistinti dall'indicazione "B.M. 302,5"), e con indicazione "grana n. 800" composti da grani da 5 micron (quelli di

produzione inglese sono contraddistinti dall'indicazione "B.M. 303"), entrambi costituiti da spoltiglia lavata di smeriglio e separata per decantazione.

### **Fabbricazione delle mole**

Nella scelta delle mole sono da tener presente i seguenti fattori:

- 1) la capacità di molatura (aumenta con mole di grado più tenero o di grana grossa);
- 2) la quantità totale di materiale asportabile da una mola (aumenta con mole di grado più duro o con la grana più fine);
- 3) il grado di finitura richiesto (migliora usando una mola di grana più fine o di impasto più compatto).

I granuli di abrasivo vengono agglomerati con svariati leganti, formando l'impasto. Esso può essere:

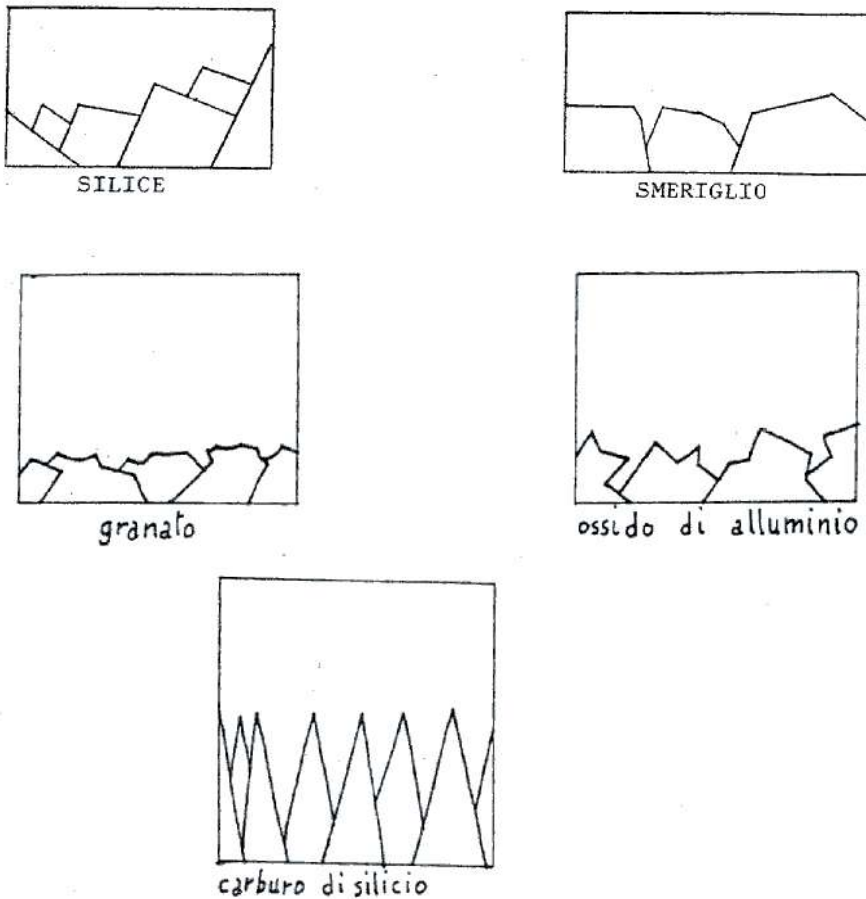
- a) impasto vetrificato (per asportazioni rapide; non serve per i vetri);
- b) impasto elastico (serve per mole molto sottili);
- c) impasto silicato (serve per operazioni di rettifica); a questo tipo appartengono gli impasti ceramici (argilla o caolino con feldspato e quarzo). I granuli di abrasivo vengono impastati con 5-25% di pasta ceramica e il tutto viene compresso a pressioni piuttosto elevate; dopo asciugamento molto lento, si cuoce in forni ceramici a 1100-1200 °C, fino a incipiente vetrificazione;
- d) impasto di resina artificiale; oggi è molto esteso l'uso di mole in cui l'abrasivo è cementato da resine artificiali (bacheliti e resine poliuretatiche), da gommalacca, da ebanite; la bachelite è un fenoplasto che si impasta a secco polverizzato con l'abrasivo unito a un po' di solvente della resina e al 4-6% di esametilentetrammina (si possono aggiungere pure dei riempitivi come ossido di ferro o polvere di alluminio); l'impasto viene formato per stampaggio a freddo con pressioni fino a 150-250 kg/cm<sup>2</sup>; dopo la formatura, le mole vengono riscaldate molto lentamente fino a 175-200 °C per rendere il fenoplasto termoidurente.

### **Il meccanismo dell'azione abrasiva**

L'azione dell'abrasivo è di tagliare, sgrossare e lucidare il pezzo da lavorare. Gli abrasivi si possono applicare sulle mole nelle operazioni più grossolane, mentre per la spianatura e la lucidatura vengono mantenuti compressi contro la superficie su cui devono agire per mezzo di utensili di ghisa, talvolta rivestiti di panno o di pelle.

Lo studio dell'azione abrasiva dei granuli di una mola dipende dal variare di due proprietà dell'abrasivo: la **durezza** e la **tenacità**, poiché esse contribuiscono a stabilire la "resistenza alla molatura" ossia la capacità di disgregare la superficie della mola. La durezza dell'abrasivo permette la penetrazione del granulo tagliente nel materiale in lavorazione e la conseguente asportazione di parte del materiale. La facilità di penetrazione e quindi la maggiore capacità abrasiva dei granuli, a parità di durezza, dipende pure dalla forma degli spigoli di taglio che si producono al momento della frattura, come pure dalla loro resistenza all'usura. Nella figura 15 sono riportate le rappresentazioni degli spigoli di frattura di diversi tipi di abrasivi.

Le **mole** lavorano come frese con numerosissimi denti in cui i granuli di abrasivo sono serrati all'impasto. Essi devono essere a spigoli taglienti; appena questi si smussano per usura e l'azione abrasiva diminuisce, lo sfregamento del granulo crea un attrito contro la superficie di lavorazione, che vince la coesione del cemento che lega l'abrasivo al supporto e lo stacca, portando a nudo nuovi granuli a spigoli vivi.



**Figura 15.** Rappresentazioni degli spigoli di frattura di diversi tipi di abrasivi.

Perciò quando il materiale in lavorazione è duro, conviene che il cemento della mola sia relativamente tenero perché il distacco dei granuli di abrasivo avvenga facilmente appena essi hanno cessato di essere taglienti. Per materiali teneri si usano invece mole più dure. A parità di legante, i granuli si staccano tanto più difficilmente quanto più essi sono minuti. Sulla giusta scelta della durezza della mola e della sua grana influenza la velocità periferica della mola e l'avanzamento e la profondità del lavoro che si vuole ottenere. Come regola generale è bene ricordare che maggiore è la resistenza alla penetrazione, più fine dovrebbe essere la grana, più tenero il grado di durezza e più fragile il granulo abrasivo.

La profondità di taglio varia da 0,02 a 0,15 mm per giro di mola secondo che si tratti di lavoro di finitura o di sgrossatura. Le mole possono lavorare a secco o a umido, ma la pulitura a umido riesce migliore.

Nelle operazioni di **lucidatura** l'azione dell'abrasivo è quella di aderire e di incorporarsi nel giusto modo (né troppo, né troppo poco) alla superficie del pezzo da lavorare. Si dice che l'abrasivo ha "mordente". La temperatura ideale è circa 25 °C ed è bene che questa temperatura rimanga costante; a temperature più basse l'abrasivo avrebbe poco mordente, a temperature più alte ne avrebbe troppo.

Si può pensare che l'abrasivo agisca in modo da asportare gli spigoli taglienti del vetro, che sulla superficie sono disposti disordinatamente (la superficie è opaca diffondendo la luce in tutte le direzioni), mentre quando la superficie è diventata lucida le molecole hanno subito un avvicinamento e un orientamento, come è mostrato nella figura 16.



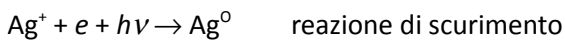
**Figura 16.** Rappresentazione schematica della superficie del vetro prima della lucidatura (a sinistra) e dopo la lucidatura (a destra).

## I trattamenti del vetro

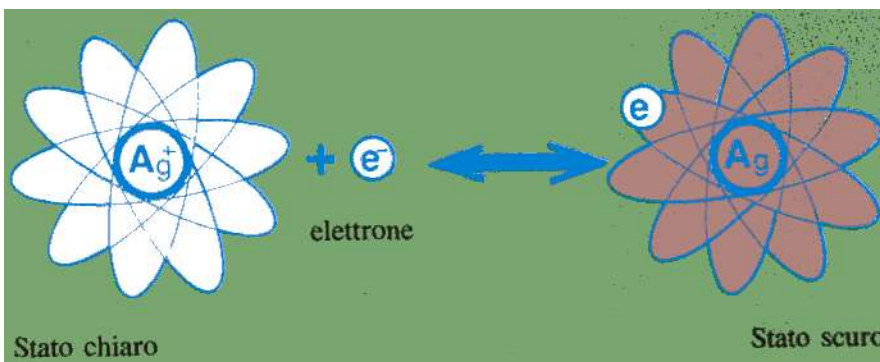
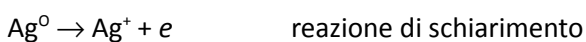
### Fotocromatismo

I vetri fotocromatici godono della proprietà di modificare in modo reversibile la capacità di assorbimento della radiazione in funzione dell'irraggiamento luminoso incidente. Tale capacità di assorbimento è proporzionale all'intensità della radiazione luminosa. In termini più semplici, quando la luce incidente è più intensa i vetri fotocromatici assorbono di più la radiazione luminosa e si scuriscono mentre quando l'intensità luminosa si attenua tali vetri ritornano allo stato chiaro.

Tale proprietà del vetro fotocromatico si basa sul modo in cui gli atomi di argento reagiscono alla luce: sotto l'azione dei raggi UVA o della luce a bassa lunghezza d'onda (la porzione più energetica dello spettro visibile, dato che l'energia del fotone è  $h\nu$ ), gli atomi d'argento modificano la loro struttura elettronica esterna, utilizzando gli elettroni liberi presenti nella struttura del vetro secondo la reazione (figura 17):



In assenza della radiazione UVA o di quella a ridotta lunghezza d'onda compresa nello spettro visibile, il processo si inverte secondo la reazione:



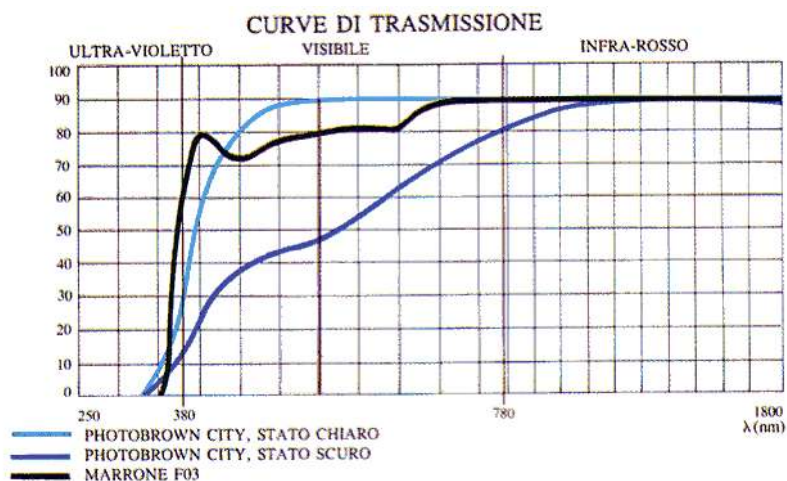
**Figura 17.** Reazione chimica di scurimento di un vetro fotocromatico.

La realizzazione dei primi vetri fotocromatici è del 1964 e si basa su studi effettuati negli anni Quaranta dallo scienziato americano S. Donald Stookey della Corning Glass Works (oggi Corning Inc. di New York). Detto in



parole semplici, il fotocromatismo è la proprietà di un vetro di modificare in modo reversibile la sua capacità di assorbimento in funzione dell'intensità dell'irraggiamento luminoso cui è sottoposto. Il risultato finale, ben visibile e di utile applicazione, è che il vetro fotocromatico si scurisce se sottoposto a un'intensa radiazione e viceversa si schiarisce quando l'irraggiamento si attenua. Volendo dire le stesse cose in modo più rigorosamente scientifico, la trasparenza di un vetro fotocromatico, intesa come rapporto tra la luce da esso trasmessa e la luce incidente, diventa una funzione della luminosità ambientale. Pertanto la capacità protettiva e filtrante di un vetro fotocromatico, tanto apprezzata negli occhiali da sole, è superiore alla capacità delle lenti semplicemente colorate. Queste ultime presentano una sola curva di trasmissione della luce alle diverse lunghezze d'onda e la percentuale di luce trasmessa non può variare in funzione dell'intensità luminosa ambientale. Nei grafici della figura 18 sono messi a confronto il comportamento di un vetro colorato (classificato come un marrone F03) e di un vetro fotocromatico (classificato con la sigla Photobrown City).

Il vetro colorato ha una sola curva di trasmissione e per una lunghezza d'onda intermedia presenta una trasmissione dell'80% circa. Alla stessa lunghezza d'onda e in ambienti a forte irraggiamento solare (dove c'è bisogno di protezione agli occhi) il vetro fotocromatico reagisce alla luce e si scurisce (stato scuro) presentando una trasmissione del 47% circa. Quando invece l'irraggiamento si attenua (per esempio in locali chiusi) e c'è maggior bisogno di luce che arrivi agli occhi, mentre il vetro colorato rimane sempre al fattore 80%, il vetro fotocromatico assume una trasmissione del 90% circa.



**Figura 18.** Confronto tra le curve di trasmissione di un vetro colorato permanentemente (marrone F03) e un vetro fotocromatico tipo Photobrown City della Corning Glass.

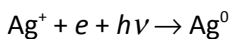
Per comprendere come il vetro fotocromatico assuma un comportamento diverso in funzione dell'intensità della luce bisogna risalire alla sua composizione chimica e ad alcuni processi fotochimici che avvengono in esso.

Come il vetro comune, il vetro fotocromatico ha come costituente base il biossido di silicio (silice), il componente principale della sabbia, con l'aggiunta di metalli alcalini e alcalino-terrosi per ridurre la temperatura di fusione e ossidi di alluminio, boro, titanio per dosare l'indice di rifrazione e altre proprietà fisiche quali la resistenza meccanica e la resistenza agli agenti superficiali.

Al vetro base così preparato vengono aggiunti degli additivi speciali che gli conferiscono le proprietà fotocromatiche. Si tratta di alogenuri di argento e rame (nitrati o cloruri).

La carica viene portata fino alla temperatura di 1200 °C prossima al punto di fusione e assume la consistenza di un fluido molto viscoso (come uno sciroppo). La massa vetrosa viene colata in stampi di forma opportuna dai quali si ricaveranno i cosiddetti sbocchi di vetro che verranno successivamente molati per realizzare le lenti. Nella fase di raffreddamento negli stampi avvengono le reazioni chimiche che danno origine al fotocromatismo. Man mano che lo sbocco si raffredda nello stampo, gli alogeni presenti (fluoro, cloro, bromo o iodio) reagiscono con gli atomi di argento e rame. La reazione produce cristalliti di alogenuro di argento contenenti piccole quantità di alogenuro di rame che precipitano sul fondo. Per far sì che la precipitazione avvenga in tempi ragionevoli (a temperatura ambiente occorrerebbero molte migliaia di anni!) lo sbocco viene portato a una temperatura poco al di sotto di quella di rammollimento (circa 600 °C). Con questo trattamento termico si ottiene la precipitazione dei cristalliti in circa 30 minuti. La dimensione dei cristallini è di circa 10 nm ovvero molto inferiore alla banda di lunghezza d'onda del visibile (350-700 nm) e ciò giustifica il fatto che la loro presenza non altera la trasparenza del vetro in quanto non si hanno fenomeni di diffusione o assorbimento interni. Tuttavia i cristalliti sono in grado di reagire chimicamente alle lunghezze d'onda più corte, come la radiazione UV presente nella luce solare. Precisamente, un fotone della radiazione UV presente nella luce solare ha energia  $h\nu$  sufficiente per strappare un elettrone a uno ione rame. L'elettrone viene catturato dallo ione argento positivo  $Ag^+$  che in questo modo passa allo stato neutro  $Ag^0$ .

La reazione chimica (già nella figura 17) che chiameremo di scurimento è dunque:



Migliaia di atomi di argento allo stato neutro formano degli agglomerati in grado di produrre un rilevabile assorbimento della luce. Di solito l'assorbimento della luce avviene in modo selettivo ovvero le particolari lunghezze d'onda assorbite dipendono dalla dimensione dell'oggetto che assorbe. Siccome la dimensione degli agglomerati di argento neutro è la più varia, avviene che l'assorbimento della luce incidente si verifica per tutta la gamma del visibile. Il vetro scurisce e diventa grigio (figura 19 in alto).

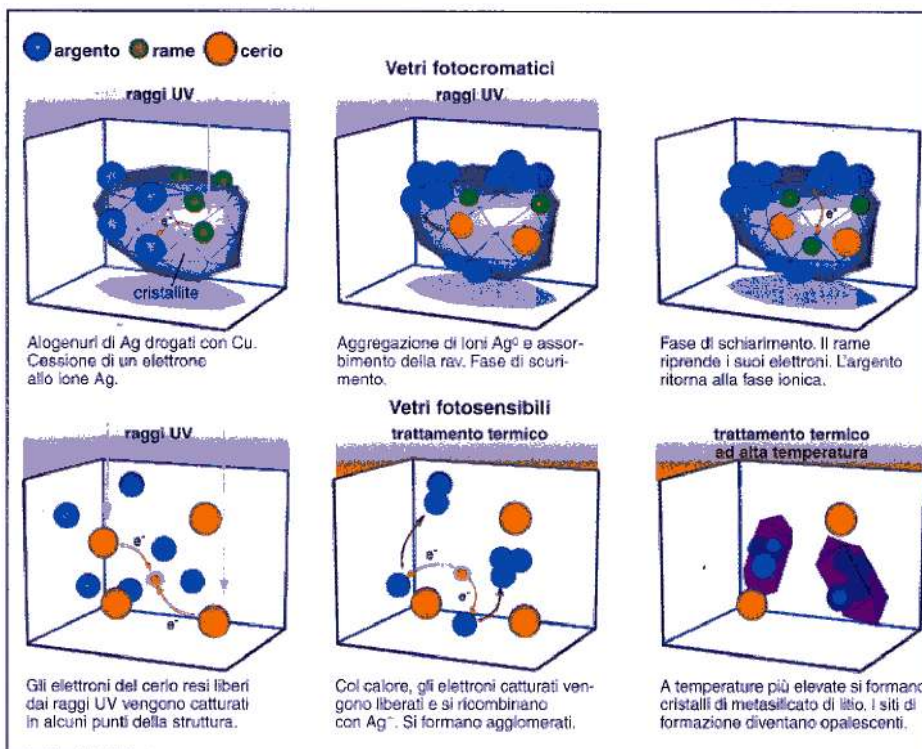
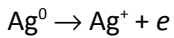
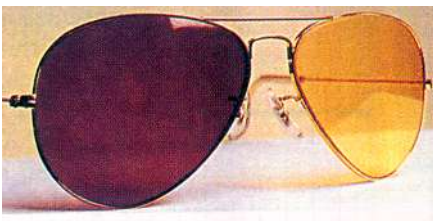


Figura 19. I principi di funzionamento dei vetri fotoreattivi.

Al cessare della causa esterna che ha prodotto il fenomeno, cioè in pratica al cessare o all'attenuarsi dell'illuminazione, la reazione chimica procede in senso inverso: gli elettroni vengono riacquistati dal rame e l'argento ritorna nel suo stato di ione positivo. In questo stato chimico gli agglomerati di argento positivo non assorbono più la luce. La reazione di schiarimento si può scrivere:



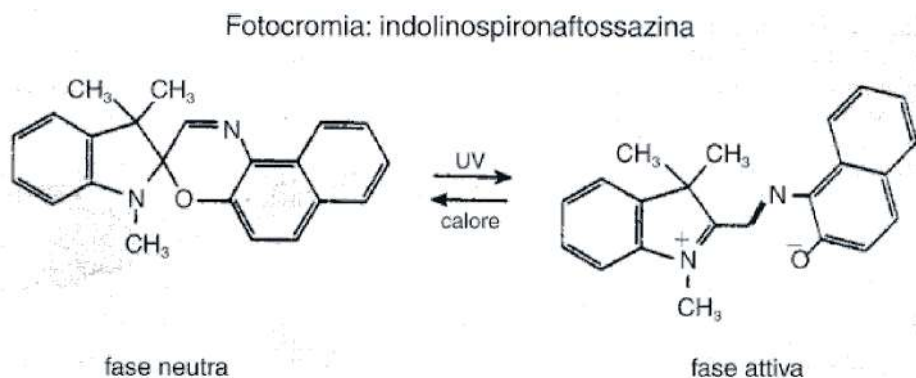
Poiché nelle reazioni di scurimento e schiarimento i cristalliti di alogenuro di argento non subiscono alterazioni, il processo può essere ripetuto praticamente all'infinito senza deterioramenti. La velocità con la quale il vetro fotocromatico passa dallo stato chiaro a quello scuro e viceversa dipende dalla composizione di base del vetro stesso, cioè dai dosaggi con i quali è preparata la carica. Oggi i tempi di reazione chiaro-scuro sono dell'ordine di qualche minuto (figura 20).



**Figura 20.** Applicazioni del fotocromatismo all'ottica oftalmica: nella fotografia solo una delle due lenti dell'occhiale ha subito l'esposizione alla radiazione UV.

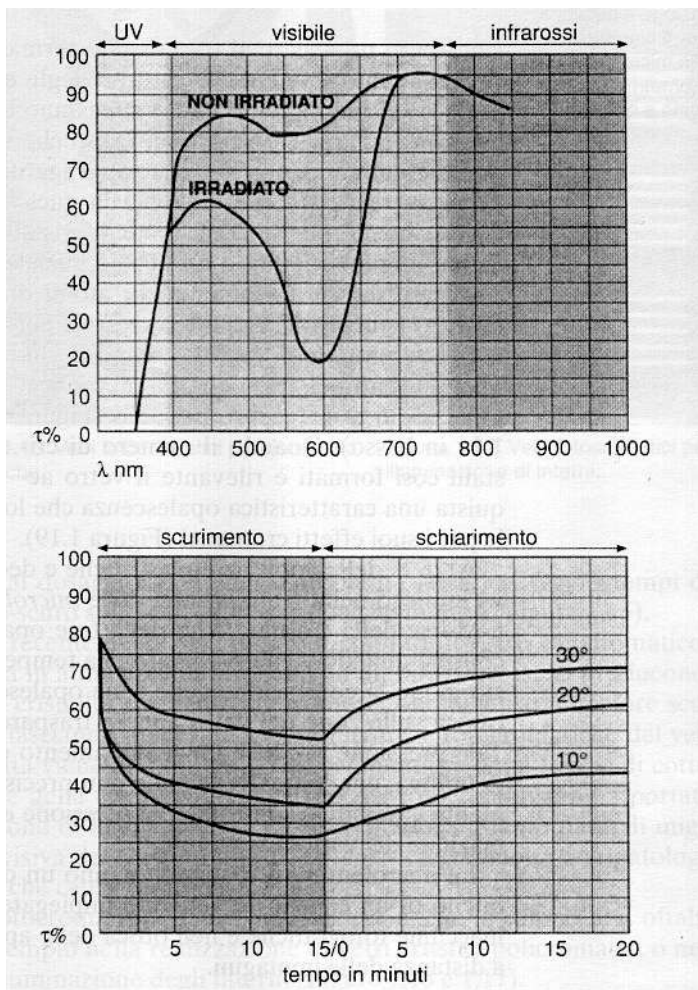
### Vetri fotocromatici organici

In anni recenti sono state realizzate lenti fotocromatiche in materiale organico. Il comportamento fotoreattivo è del tutto simile a quello dei vetri minerali fotocromatici, ma i processi subiti dal mezzo ottico quando interagisce con la luce sono completamente diversi. Il fotocromatismo organico si basa sulle variazioni di struttura della macromolecola ISN (indolinospiro-naftossazina, spessore del trattamento 150  $\mu\text{m}$ ). Sottoposta a intenso irraggiamento, i suoi legami si aprono e la nuova conformazione assunta è quella di un isomero a catena aperta che presenta un forte assorbimento della banda del visibile, con un picco a 600 nm circa. Tale assorbimento provoca lo scurimento del materiale che così assume un colore grigio-blu. Quando l'irraggiamento si attenua (in ambienti chiusi), avviene il fenomeno inverso: i legami si richiudono e la lente si schiarisce.



**Figura 21.** Reazione chimica della molecola ISN.

Il fotocromatismo organico è fortemente condizionato dalla temperatura (figura 22): quando la temperatura ambientale è elevata, il ciclo scurimento-schiarimento si compie in tempi più lunghi, oppure, nello stesso intervallo di tempo, la percentuale di scurimento è minore a temperature più elevate. Per esempio, nel tempo di 15 minuti una lente fotocromatica alla temperatura esterna di 30 °C passa da una trasmittanza iniziale dell'80% a una finale del 55%, mentre la stessa lente, nello stesso tempo ma alla temperatura di 10 °C, passa dall'80% al 25%, con un potere filtrante circa doppio del precedente. Pertanto le lenti organiche fotocromatiche sono poco indicate come lenti protettive nel periodo estivo. Oltre a ciò, va anche segnalato il fenomeno dell'affaticamento (vita media circa tre anni), ovvero il ciclo scurimento-schiarimento non ha una reversibilità illimitata nel tempo, come per i vetri minerali.



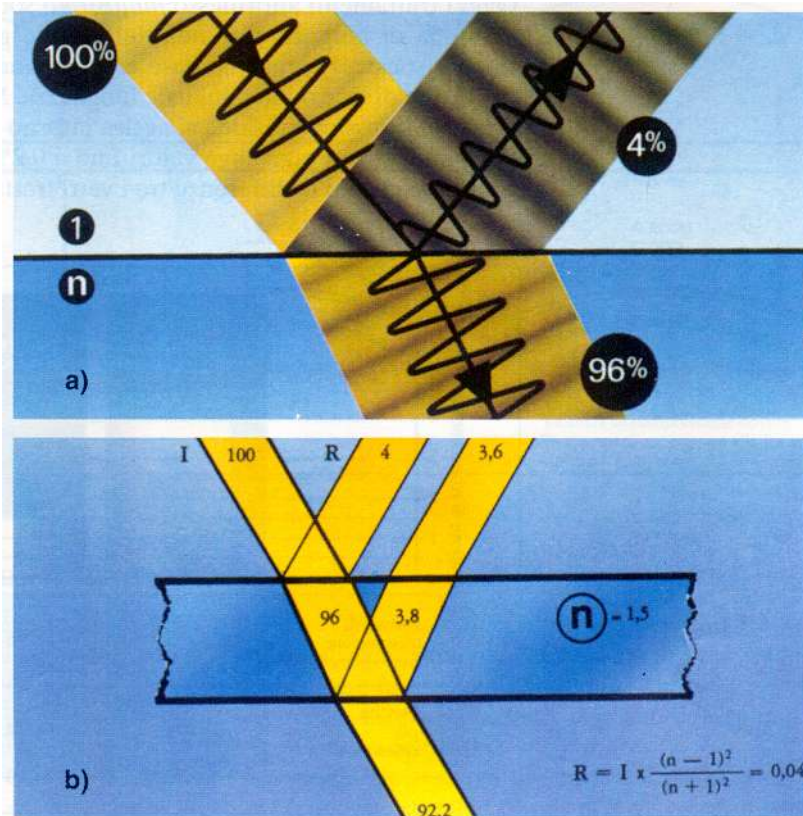
**Figura 22.** Nel grafico in alto, la curva di trasmissione di una lente fotocromatica organica alle diverse lunghezze d'onda. Nel grafico in basso, la velocità del ciclo scurimento-schiarimento a diverse temperature.

### Trattamenti antiriflesso

Il trattamento antiriflesso si basa sulla natura ondulatoria della luce e sfrutta il fenomeno dell'interferenza delle onde luminose per riflessione multipla nelle pellicole sottili. Nei vetri non trattati la percentuale di luce riflessa da una superficie aria-vetro, per incidenza normale, si aggira sul 4%. Tale valore si ricava direttamente dalla formula della riflettività, che si riferisce a un mezzo trasparente con indice di rifrazione  $n$  immerso in aria (indice di rifrazione pari a 1):

$$\rho = \frac{(n - 1)^2}{(n + 1)^2}$$

Nelle lenti si hanno due superfici di separazione aria-vetro e quindi la percentuale di intensità luminosa che si perde per riflessione sale al valore 7,6% (figura 23).



**Figura 23.** Perdita di intensità luminosa per riflessione attraverso una lastra di vetro con indice di rifrazione 1,5.

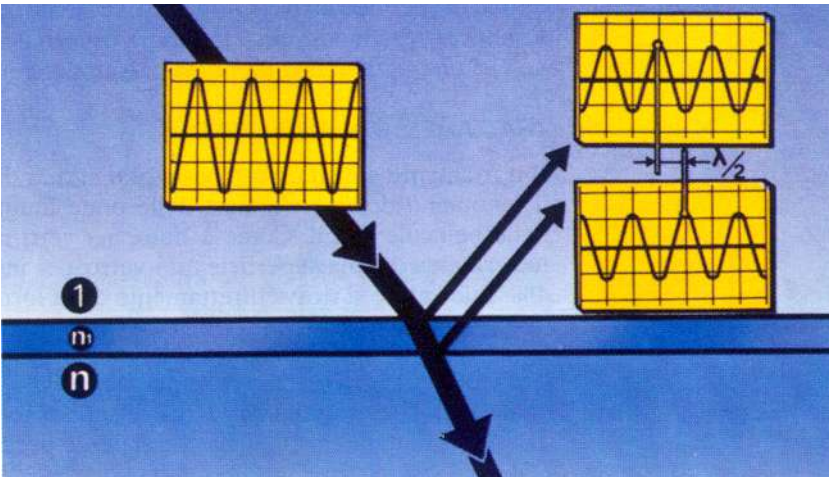
Per ottenere una maggiore quantità di luce trasmessa si lascia depositare sotto vuoto molto spinto ( $10^{-4}$ - $10^{-6}$  torr) un sottilissimo strato di materiale trasparente il cui spessore è un multiplo dispari di  $\lambda/4$ , essendo  $\lambda$  la lunghezza d'onda dello spettro visibile che si vuol trasmettere interamente attraverso la lente.

Il materiale antiriflesso viene scelto principalmente in base alla sua elevata resistenza all'abrasione e al suo indice di rifrazione. Dal punto di vista strettamente teorico l'indice di rifrazione dello strato antiriflesso è legato all'indice di rifrazione del vetro dalla relazione:

$$n_1 = \sqrt{n}$$

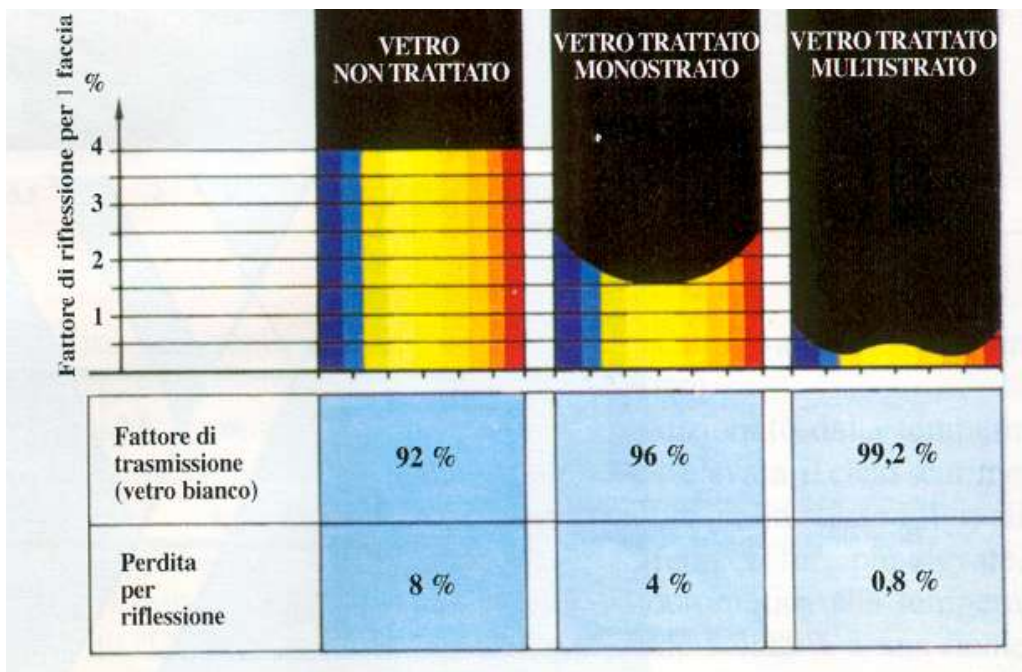
Se il vetro ha indice  $n = 1,523$  (vetro crown) lo strato antiriflesso dovrebbe avere indice  $n_1 = \sqrt{1,523} = 1,234$ .

In pratica il fluoruro di magnesio di indice 1,38 presenta le proprietà più adeguate per realizzare lo scopo. Lo spessore del trattamento (monostrato) è calcolato in modo che l'onda riflessa dall'interfaccia aria-trattamento interferisca distruttivamente (sia cioè in opposizione di fase) con l'onda riflessa dall'interfaccia trattamento-vetro (figura 24).



**Figura 24.** Principio dell'opposizione di fase delle onde riflesse dopo la deposizione di uno strato sottile.

Oggi i trattamenti antiriflesso multistrato sono in grado di coprire una vasta gamma di lunghezze d'onda del visibile grazie all'impiego di tecniche molto sofisticate. Il principio base è comunque sempre quello di mettere in opposizione di fase onde di uguale lunghezza. Mentre in un trattamento monostrato la riflessione residua si aggira intorno al 2,5%, nel trattamento antiriflesso multistrato raggiunge valori fino a 0,2%. La figura 25 permette di visualizzare meglio le differenze tra i vetri trattati e quelli non trattati.



**Figura 25.** Confronto della riflettività a diverse lunghezze d'onda per un vetro non trattato, un vetro trattato monostrato e un vetro trattato multistrato.

### Tempra chimica

La tempra chimica è un trattamento mediante il quale il vetro acquista una maggiore resistenza agli urti. Si realizza immergendo il vetro in un bagno chimico contenente sali di potassio. Alla superficie del vetro avviene uno scambio di ioni e precisamente gli ioni sodio  $\text{Na}^+$  presenti nel vetro passano in soluzione, mentre gli ioni potassio  $\text{K}^+$  dalla soluzione passano al vetro prendendo il posto degli ioni sodio (figura 26).

Poiché gli ioni potassio hanno dimensioni maggiori degli ioni sodio, il loro inserimento nella struttura molecolare del vetro determina una compressione del vetro a livello superficiale che conferisce al vetro una particolare tensione interna atta a renderlo più resistente in presenza di carichi meccanici esterni (figura 27).

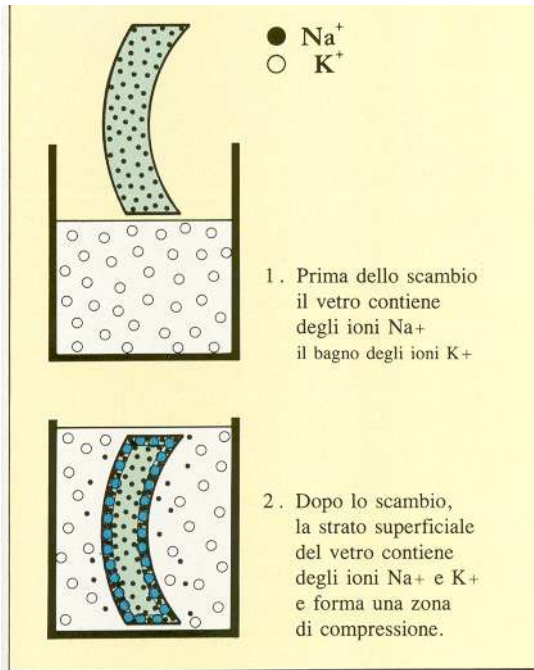


Figura 26. Processo di scambio di ioni nella tempra chimica del vetro.

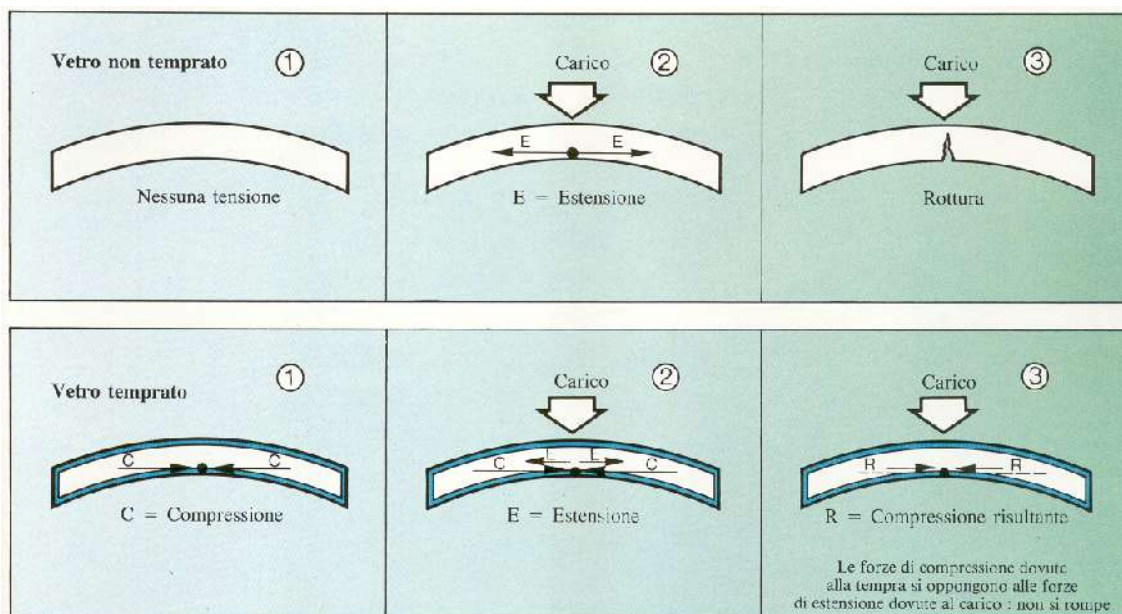
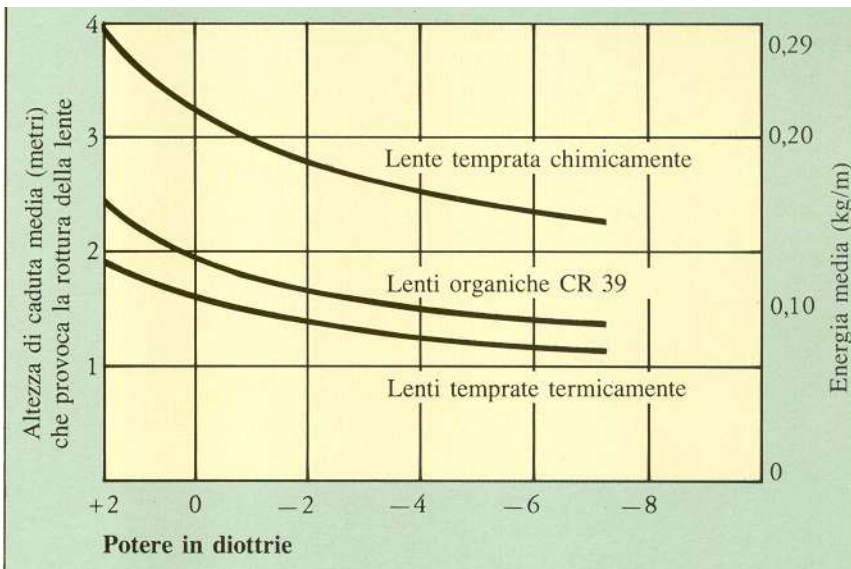


Figura 27. Tensioni interne del vetro temprato che ne aumentano la resistenza ai carichi meccanici.

### Tempra termica

Nella tempra termica il vetro viene scaldato fin quasi a raggiungere la temperatura di rammollimento e successivamente raffreddato molto rapidamente (per esempio con aria soffiata o in un bagno di olio di silicone). In questo modo la superficie esterna del vetro si raffredda prima della parte interna che invece continua a contrarsi.

Questo trattamento provoca delle tensioni di compressione proprio sotto la superficie del vetro che contribuiscono a dargli maggiore resistenza agli urti. Nella figura 28 è mostrato un grafico comparativo tra un vetro minerale temprato chimicamente, un vetro minerale temprato termicamente e un vetro organico (CR-39) non temprato.



**Figura 28.** Resistenza di diversi vetri all'impatto di una biglia di acciaio di 68 g.