

Appunti per il corso di ESERCITAZIONI LENTI OFTALMICHE

1. Lenti oftalmiche – materiali e lavorazioni

**a cura dei docenti
dell'IIS G.Galilei – Milano**

(con la collaborazione di studenti della 4OF dell'anno scolastico 2011-2012)

Luglio 2012

Lenti oftalmiche – materiali e lavorazioni

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).

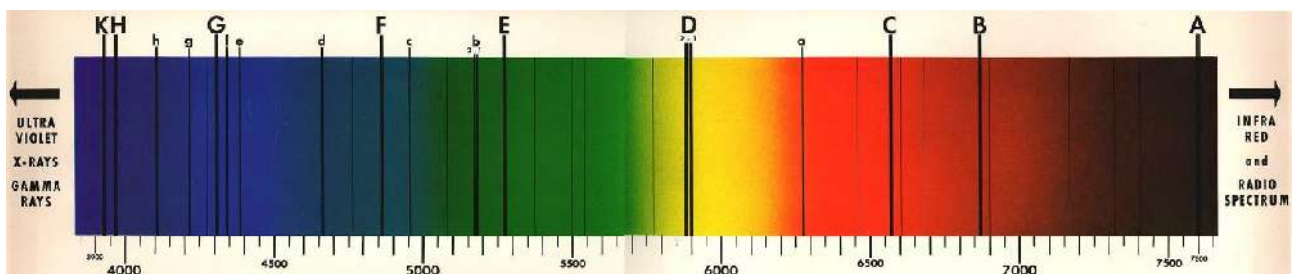


Figura 1. Spettro della luce solare con l'indicazione delle principali righe di assorbimento.

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_{α} e H_{β} 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 di 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 λ .

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;

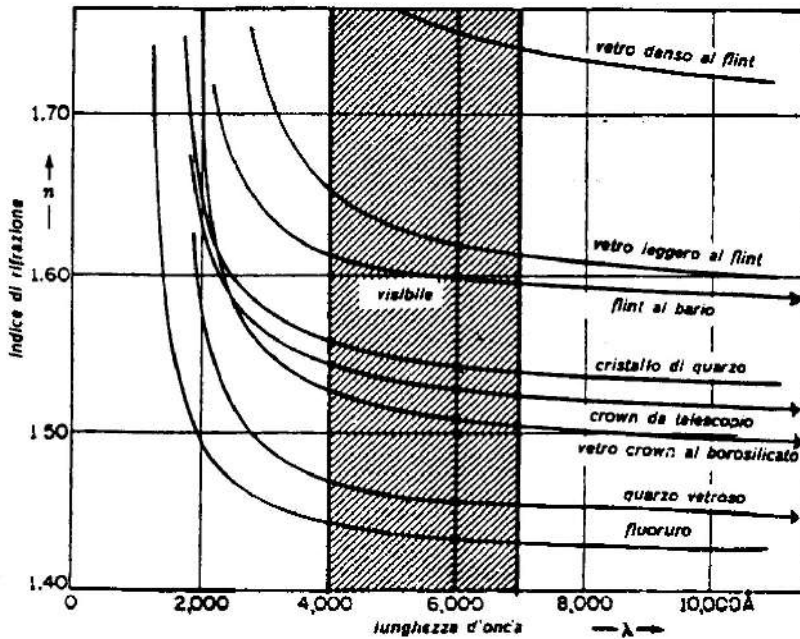


Figura 2. Indice di rifrazione in funzione della lunghezza d'onda per diversi tipi di vetro.

- **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.

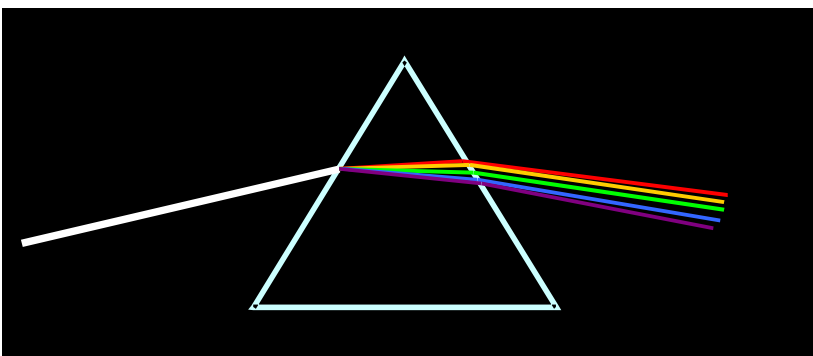


Figura 3. Nelle due rifrazioni attraverso le superfici del prisma triangolare i raggi luminosi corrispondenti ai diversi colori spettrali vengono deviati di angoli tanto più diversi quanto maggiore è la dispersione del materiale.

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 **trasmissione** e l'**assorbimento**. Il valore della trasmissione 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'assorbimento A (un tempo detta *densità ottica*) è data invece dal logaritmo decimale del reciproco della trasmissione:

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

Quando due strati di materiale trasparente vengono sovrapposti, la trasmissione risultante è data dal prodotto delle trasmissioni dei due strati. L'assorbimento risultante dalla sovrapposizione dei due strati di materiale è data invece dalla somma delle loro due assorbimenti.

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° , 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 ρ (che si legge *rho* 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. 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 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 lo deve tagliare diagonalmente, deve procedere molto più lentamente.

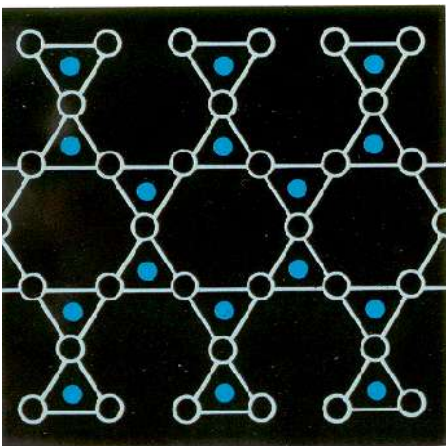


Figura 4. Struttura cristallina ordinata di un cristallo di quarzo.

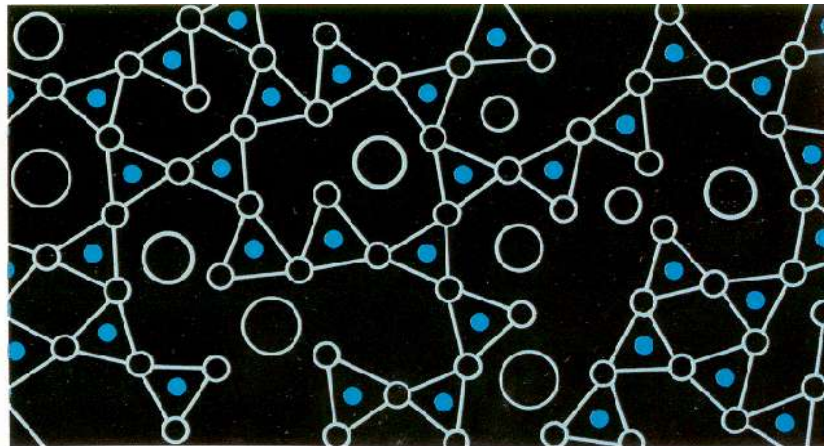


Figura 5. Struttura amorfa del vetro.

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).

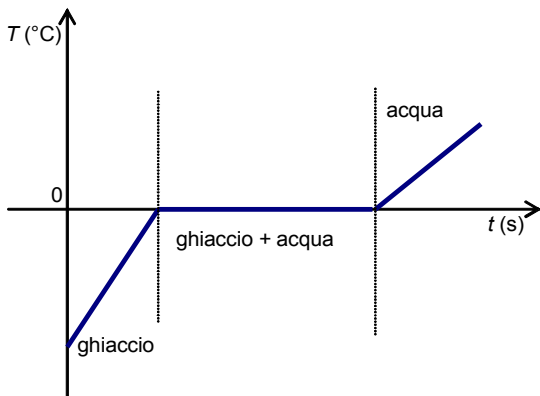


Figura 6. La fusione di una sostanza cristallina (ghiaccio).

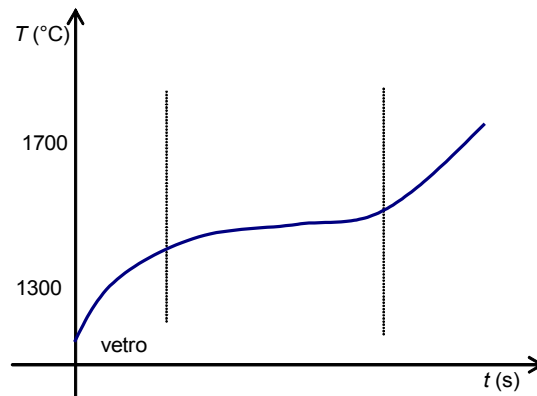


Figura 7. La fusione pastosa del vetro.

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** (SiO_2) in genere sotto forma di sabbia silicea o quarzifera;
- **carbonati alcalini** (Na_2CO_3 , K_2CO_3);
- **calcare** (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.

Proprietà ottico-fisiche del vetro

Il vetro ordinario (vetro **crow**n) 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 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 $3,0 \text{ g/cm}^3$. Con vetri al lantanio si possono ottenere indici di rifrazione ancora maggiori. 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.

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. Uno dei motivi per cui le lenti costruite con vetri flint non hanno avuto successo in 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.¹

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.

Tra i polimeri si possono distinguere:

- i polimeri termoindurenti, formati da catene di monomeri ramificate e intrecciate, che una volta prodotti non possono essere fusi senza andare incontro alla loro degradazione (carbonizzazione); un esempio è il CR-39: se una lente in CR-39 viene avvicinata a una fiamma, brucia e si consuma annerendosi, ma non fonde;
- i polimeri termoplastici, formati da catene di monomeri lineari, che riscaldati si portano allo stato viscoso, fondono, e se successivamente raffreddati mantengono la nuova forma che hanno acquistato; un esempio è il policarbonato.

CR-39

Si tratta di un polimero sintetico termoindurente appartenente alla classe dei poliesteri (carbonato di dialliglicole). È 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.

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

- 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 μm 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 temperato, 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. Della maggior parte di questi materiali non sono note le formule chimiche perché non sono state divulgate dalle aziende produttrici, che li contraddistinguono con nomi commerciali. 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/cm³.

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/cm³: 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 oftalmiche

I processi utilizzati per la produzione delle lenti oftalmiche sono differenti a seconda del materiale utilizzato: vetro, materiale organico termoindurente o materiale organico termoplastico.

La produzione del vetro

Il vetro viene ottenuto 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 zirconio) 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 raffinantrici 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.

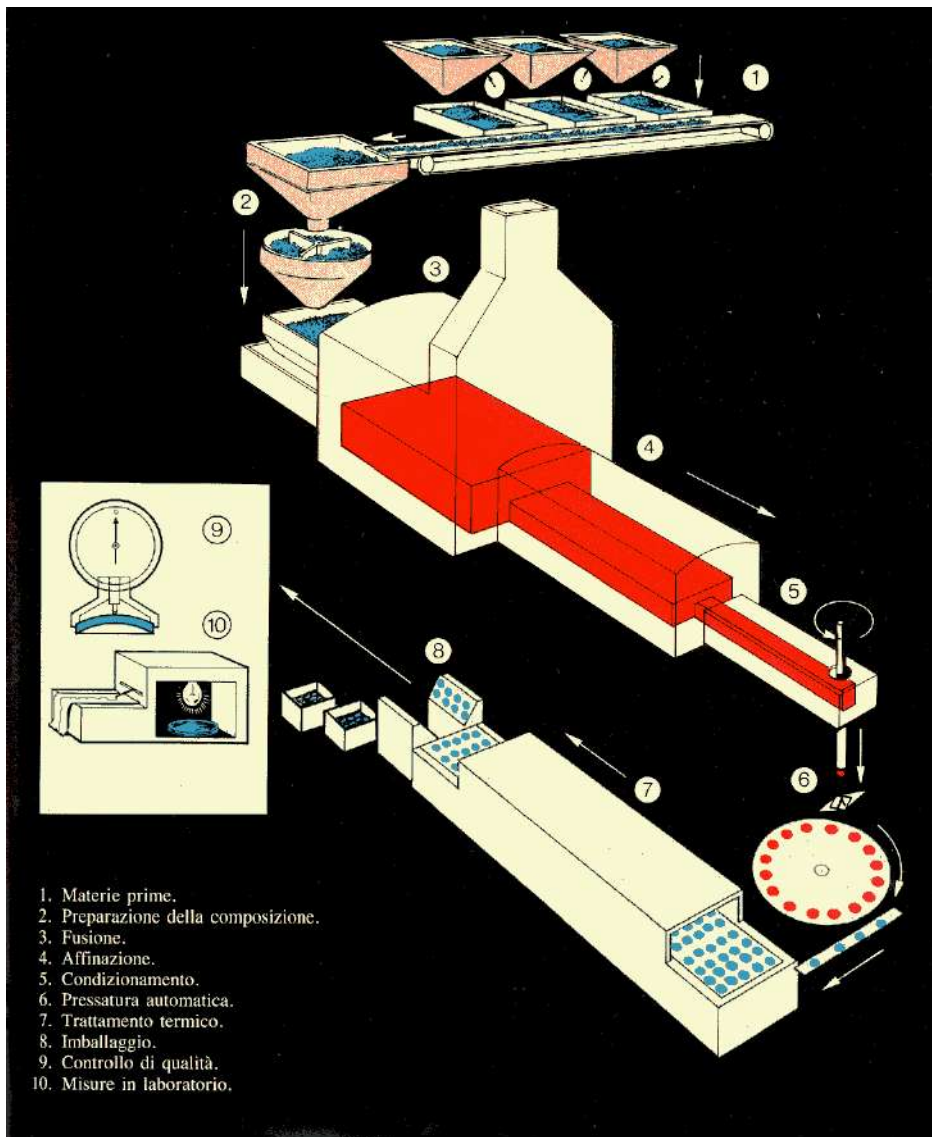


Figura 8. Schema della linea di produzione degli sbocchi grezzi di vetro per occhialeria.

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 sbozzi 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 (figura 8). 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:

- a) piastre quadrate o rettangolari (di dimensioni 70×70 cm o 120×120 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 sbazzatura, prodotti con il metodo automatico.

La lavorazione del vetro

Il vetro che deve essere 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 essere 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 α che dipende dal raggio di curvatura R della superficie da realizzare (figura 10).

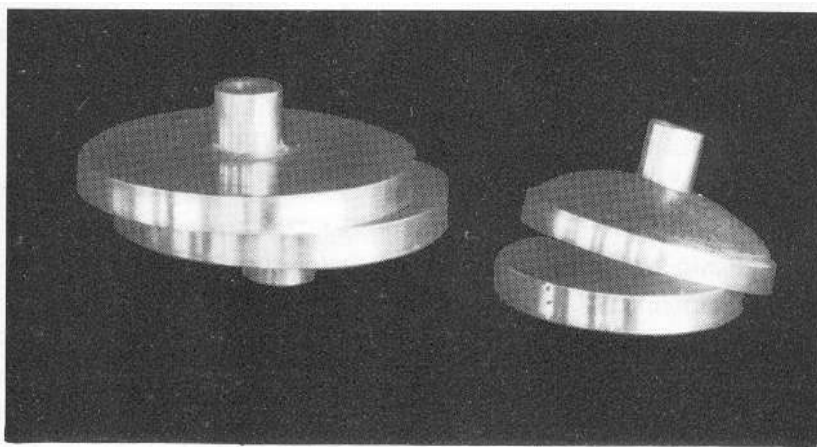


Figura 9. Coppie di pàtine in ghisa utilizzate per lavorazione manuale delle lenti.

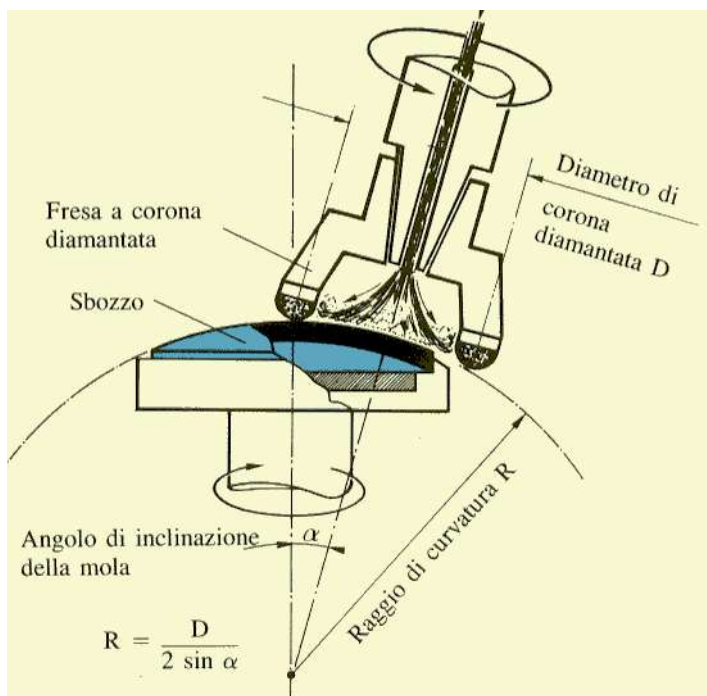


Figura 10. Sbozzatura di una superficie convessa.

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 12 e 13).

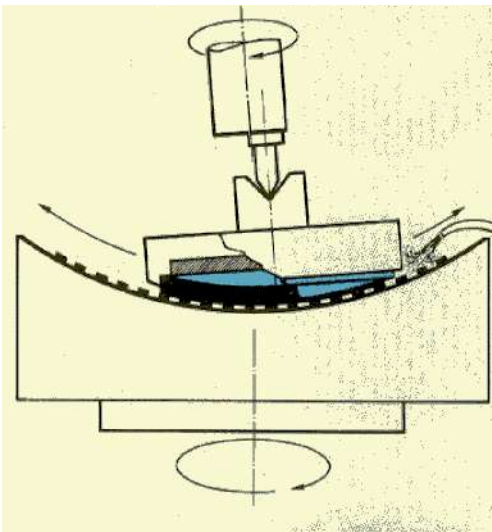


Figura 11. Lappatura di una superficie concava.

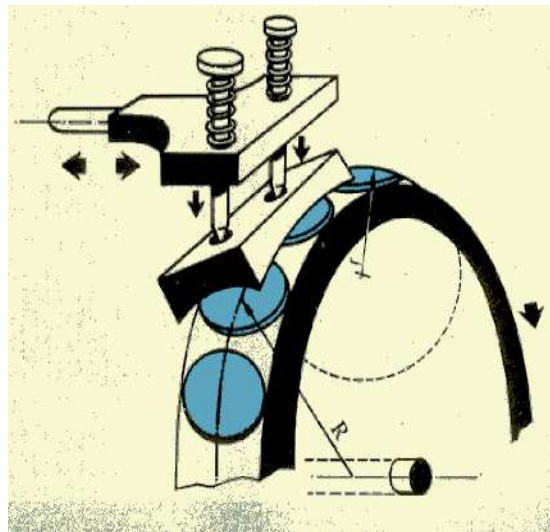


Figura 12. Lappatura di lenti toriche su un anello rotante.



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 poliuretana.

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 poliuretana.

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.

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.

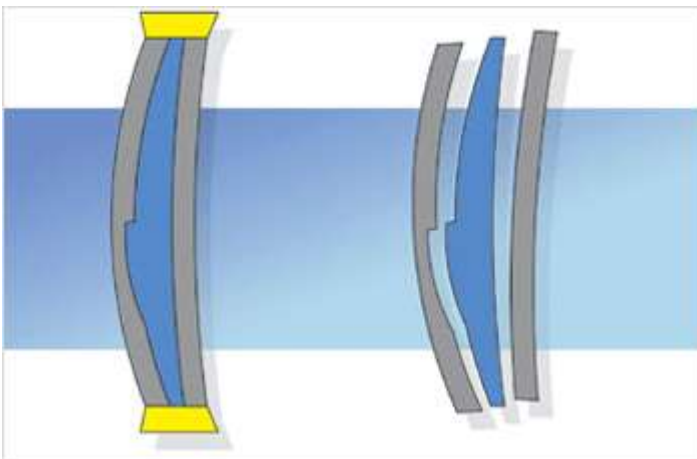


Figura 15. Le lenti organiche in materiale termoindurente sono prodotte da due matrici dello stampo (in grigio nella figura) che rappresentano le superfici delle lenti in negativo. Queste due forme sono tenute insieme da un apposito anello rotondo (in giallo nella figura). L'anello assicura che le due forme rimangano a distanza definita fra di loro. Il monomero liquido viene iniettato all'interno dello stampo e dopo il processo di polimerizzazione diventa una lente organica.

Le lenti in policarbonato 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.



Figura 16. Produzione di lenti in materiale termoindurente: iniezione del monomero negli stampi. Normalmente le aziende realizzano produzioni in serie lavorando contemporaneamente un grande numero di lenti.



Figura 17. Impianto per stampaggio ad alta pressione di materiale termoplastico.

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 sbozzatura, 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, sbozzare, sgrossare, 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).

Tra gli abrasivi più utilizzati nella lavorazione delle lenti oftalmiche vi sono:

- il **corindone** (sesquiossido di alluminio Al_2O_3 cristallizzato nel sistema romboedrico; ha durezza 9 della scala di Mohs ed è quindi la pietra naturale più dura dopo il diamante);
- lo **smeriglio** (corindone al 30-80% contenente magnetite Fe_3O_4 e silicati);
- il **carborundum** (carburo di silicio SiC cristallizzato in tavolette esagonali; 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; ha durezza 9,5 della scala di Mohs);
- Il **diamante**, che è carbonio purissimo cristallizzato nel sistema monometrico; oltre alla durezza altissima (10 nella scala Mohs) ha grande conducibilità termica e minimo coefficiente di dilatazione termica.

Per la lucidatura del vetro vengono usati ossidi:

- Il **rosso inglese** (sesquiossido di ferro Fe_2O_3), l'**ossido di cerio** (Ce_2O_3) e l'**ossido di zirconio** (ZrO_2), utilizzati per la lucidatura di lenti in vetro minerale;
- l'**ossido di alluminio** (Al_2O_3) è corindone in polvere molto fine ed è usato per la pulitura di superfici più tenere come quelle delle lenti in materiale organico.

Gli abrasivi nelle mole

Per le operazioni di sgrezzatura e lucidatura delle lenti gli abrasivi sono usati normalmente in forma di polvere, a secco o in impasto ad acqua a seconda del materiale da lavorare. Vengono mantenuti compressi contro la superficie su cui devono agire per mezzo di utensili di ghisa, talvolta rivestiti di panno o di

materiale plastici teneri.

Per le operazioni di sagomatura delle lenti per il montaggio degli occhiali gli abrasivi vengono invece incorporati nei dischi rotanti delle mole (manuali o automatiche). Questi dischi sono realizzati utilizzando particolari materiali plastici o ceramici nei quali vengono immerse e cementate le particelle dei materiali abrasivi.

Sia il tipo di abrasivo da utilizzare, sia l'impasto con cui vengono realizzati i dischi abrasivi delle mole devono essere scelti in funzione del materiale da lavorare e del tipo di lavorazione. Si devono tenere presenti i seguenti fattori:

- la capacità di molatura (aumenta con mole impasto più tenero o con abrasivo con grana grossa);
- la quantità totale di materiale asportabile da una mola (aumenta con mole di impasto più duro o con abrasivo di grana più fine); 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. E' molto esteso l'uso di mole in cui l'abrasivo è cementato da resine artificiali (bacheliti e resine poliuretaniche), da gommalacca, da ebanite.



Figura 18. Mola manuale con due dischi abrasivi, uno a grana grossa per la lavorazione più grossolana e uno a grana fine per finitura



Figura 19. Mola automatica.



Figura 20. Dischi abrasivi per mola automatica, con diversi materiali utilizzati come abrasivi e come leganti a seconda del materiale da lavorare.

Il meccanismo dell'azione abrasiva

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 e quindi la durata del disco abrasivo. 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 21 sono riportate le rappresentazioni degli spigoli di frattura di diversi tipi di abrasivi.

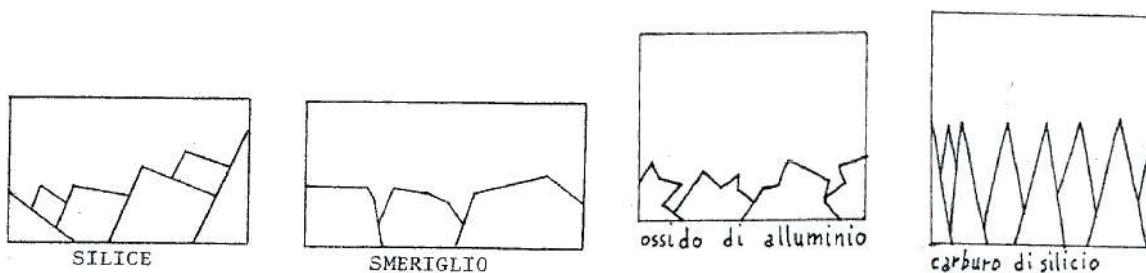


Figura 21. Rappresentazioni degli spigoli di frattura di diversi tipi di abrasivi.

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.

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 grossatura. Le mole possono lavorare a secco o a umido, a seconda del materiale da lavorare.

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 22. Nelle operazioni di montaggio delle lenti oftalmiche si ricorre alla lucidatura dei bordi delle lenti da destinare a montature a giorno (nylon o glasant). Per questa operazione si utilizzano lucidatrici dotate di dischi rivestiti di tela soffice su cui viene caricata una pasta abrasiva (figura 23).



Figura 22. Rappresentazione schematica della superficie del vetro prima della lucidatura (a sinistra) e dopo la lucidatura (a destra).



Figura 23. Lucidatrice per la finitura del bordo delle lenti.