



UNIVERSITÁ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Dipartimento di Ingegneria Industriale

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA MECCANICA E
MECCATRONICA

TESI DI LAUREA DI PRIMO LIVELLO

VETRI NELL'AUTOMOTIVE AUTOMOTIVE GLASS

Relatore: Prof. Ing. Enrico Bernardo

Laureando: Moreno Minozzo

Anno Accademico 2013–2014

INDICE

SOMMARIO	I
CAPITOLO 1: VETRO.....	1
1.1 INTRODUZIONE AL VETRO.....	1
1.2 FORMAZIONE DELLO STATO VETROSO	1
1.3 STRUTTURA DEL VETRO.....	2
1.3.1 FORMATORI DI RETICOLO	3
1.3.2 MODIFICATORI DI RETICOLO	4
1.3.3 OSSIDI INTERMEDI.....	4
1.4 PROPRIETA' DEL VETRO.....	5
1.4.1 PROPRIETA' FISICHE.....	6
1.4.2 PROPRIETA' CHIMICHE	8
1.4.3 PROPRIETA' MECCANICHE	9
1.4.4 PROPRIETA' OTTICHE	9
1.5 CLASSIFICAZIONE.....	9
1.6 LAVORAZIONE DEL VETRO.....	10
1.6.1 FUSIONE.....	11
1.6.2 FORMATURA.....	12
1.6.2.1 Vetro cavo.....	12
1.6.2.2 Vetro piano.....	12
1.6.3 RICOTTURA.....	13
1.6.4 FINITURA	13
CAPITOLO 2: VETRO IN CAMPO AUTOMOTIVE	14
2.1 INTRODUZIONE	14
2.1.1 TRA IL PASSATO E IL FUTURO	14
2.2 VETRO STRATIFICATO	15
2.2.1 FUNZIONI DELL'INTERSTRATO	16
2.2.2 COMPORTAMENTO DELL'INTERSTRATO.....	16

2.2.3 TIPI DI INTERLAYER.....	17
2.2.4 TIPI DI ACCOPPIAMENTO.....	20
2.3 VETRO TEMPRATO	22
2.3.1 FUNZIONI DEL VETRO TEMPRATO	22
2.3.2 TEMPRA TERMICA	22
2.3.2.1 Processo tradizionale	24
2.3.2.2 Condizioni di tempra	25
2.3.2.3 Problematiche.....	26
2.3.2.4 Tempra per mezzo di onde radio.....	27
2.3.3 TEMPRA CHIMICA	29
2.3.3.1 Tempra chimica a singolo scambio ionico	29
2.3.3.2 Tempra chimica a doppio scambio ionico (profilo ESP)	30
2.3.4 TEMPRA TERMICA VS TEMPRA CHIMICA	31
2.4 FORMATURA DEI VETRI NELL'INDUSTRIA AUTOMOBILISTICA	32
2.4.1 FORMAZIONE A CALDO PER VIA GRAVIMETRICA	35
2.4.2 STAMPAGGIO A CALDO	35
2.4.3 COMPUTER AIDED DESIGN (CAD) E FINITE ELEMENT METHOD (FEM)	35
CAPITOLO 3: RIVESTIMENTI E DISPOSITIVI	37
3.1 PUNTI CHIAVE DEI RIVESTIMENTI	37
3.2 TECNICHE DI DEPOSIZIONE	38
3.2.1 DEPOSIZIONE FISICA DA VAPORE (PVD)	40
3.3.3 DEPOSIZIONE CHIMICA DA VAPORE (CVD).....	41
3.2.2 SPUTTERING	41
3.3.4 SOL-GEL.....	43
3.4 RIVESTIMENTO UV E IR.....	44
3.5 RIVETIMENTO IDROFOBO.....	46
3.6 DISPOSITIVI INCORPORATI NEL VETRO	48
3.6.1 SISTEMI DI SBRINAMENTO E L'INTRODUZIONE DEL PETD.....	48

3.6.2 HEAD-UP DISPLAY	50
3.6.3 RICEZIONE SEGNALE RADIO.....	50
3.6.4 RICEZIONE SEGNALE DIGITALE (DTV).....	50
3.7 SVILUPPI FUTURI	51
CAPITOLO 4: TECNOLOGIE PER L'ALTA SICUREZZA	52
4.1 INTRODUZIONE	52
4.4.1 VETRO	55
4.4.2 VETROCERAMICA	56
4.4.3 CERAMICA CRISTALLINA	56
4.4.4 POLIMERI AMORFI	56
4.5.1 STRATO ESTERNO.....	58
4.5.2 STRATO INTERMEDIO	59
4.5.3 STRATO DI SUPPORTO	60
CONCLUSIONI	62
BIBLIOGRAFIA – SITOGRAFIA.....	63

SOMMARIO

La tesi discute le proprietà e i processi di fabbricazione dei vetri impiegati nel settore automotive. In particolare vengono analizzati i recenti sviluppi dei processi di rafforzamento e delle tecniche di rivestimento tramite la deposizione di film sottili al fine di migliorare la sicurezza e il comfort dei passeggeri.

Si studiano i principali sostitutivi del vetro minerale in campo automotive e i materiali impiegati per l'alta sicurezza, definendo le linee guida sulla scelta di tali materiali.

Vengono introdotte le principali problematiche nella produzione e nel rinforzo dei vetri, presentando le ricerche e le soluzioni adottate da molte aziende del settore per ridurre queste problematiche. Gli studi sono finalizzati al miglioramento e all'ottimizzazione del rinforzo per tempra e del processo di formatura, analizzando l'influenza dei parametri di processo.

Dopo una sintetica introduzione sulle generalità del vetro, quali la composizione, le proprietà e i principali processi di produzione (cap.1), si analizzano i metodi di rinforzo adottati per i parabrezza e finestrini laterali, descrivendo i più recenti sviluppi nel campo della tempra, con particolare attenzione ai profili ESP, ultima frontiera nel campo dei vetri rinforzanti. Successivamente vengono descritte le tipologie di formatura dei vetri in campo automotive, analizzando i parametri che lo influenzano, con un occhio di riguardo alle tecniche di simulazione agli elementi finiti (cap.2).

Nel capitolo 3 si illustrano in dettaglio i processi e i tipi di rivestimento impiegati nei parabrezza al fine di migliorarne le caratteristiche, a cui seguirà una classificazione dei dispositivi presenti all'interno del parabrezza e i sviluppi futuri.

L'ultimo capitolo (cap.4) analizza in dettaglio le problematiche e i criteri di selezione dei materiali impiegati nelle finestrature dei veicoli militari, presentate da una ricerca dell'esercito americano.

CAPITOLO 1: VETRO

1.1 INTRODUZIONE AL VETRO

Si definiscono vetri le sostanze che in opportune condizioni realizzano lo stato vetroso, oppure come un materiale solido senza ordine a lungo raggio. Tra le sostanze che soddisfano tale relazione appartengono la maggior parte dei polimeri organici quali la glicerina e il glucosio, soluzioni acquose di acidi quali il cloridrico e il perclorico, sali e elementi come lo zolfo, il selenio e il fosforo.

A volte solo ricorrendo a tecniche particolari è possibile ottenere lo stato vetroso.

I vetri tradizionali, costituiti da ossidi inorganici sono materiali amorfi ottenuti per progressivo irrigidimento di un liquido che non è stato in grado di cristallizzare durante il raffreddamento.

I liquidi vetrogeni, cioè capaci di dar luogo a vetri in condizioni normali di raffreddamento, sono sempre caratterizzati da un'elevata viscosità in prossimità del loro punto di fusione.

L'elevata viscosità è riconducibile alla grande complessità delle unità strutturali, che ne rallenta fortemente la riorganizzazione in disposizione ordinate tipica della struttura cristallina.

Per l'impossibilità pratica di riordinamento strutturale in tali condizioni si ottiene un materiale amorfo, che permane indefinitamente a temperatura ambiente. Da tali considerazioni si conclude che la realizzazione dello stato vetroso si ottiene partendo da quello liquido con una velocità di raffreddamento della sostanza considerata al di sotto della temperatura di fusione maggiore della sua velocità di cristallizzazione.

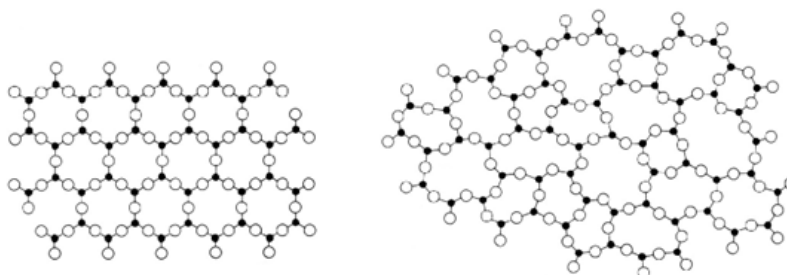


Fig. 1.1 – Strutture rispettivamente ordinata e amorfa del vetro

1.2 FORMAZIONE DELLO STATO VETROSO

Per un vetro, a differenza di un materiale cristallino, durante il raffreddamento dalla fase liquida non avviene la solidificazione (processo a T_m definita) ma si osserva la transizione vetrosa su un intervallo ampio di temperatura, durante la quale il liquido diventa sempre più viscoso fino ad assumere la consistenza di un solido.

In un materiale comune, cristallino allo stato solido, durante il raffreddamento da liquido, lo stesso si contrae, il coefficiente di dilatazione termica di un liquido è circa tre volte quello di un solido. Poi si osserva una variazione di volume a temperatura costante dovuta alla transizione solido-cristallino-liquido e quindi la contrazione legata al coefficiente di dilatazione termica del solido cristallino.

Nel caso della produzione di un vetro si passa, senza discontinuità, da liquido (poco viscoso) a liquido sottoraffreddato (sempre più viscoso al calare della temperatura) che presenta un coefficiente di dilatazione simile a quello di un solido.

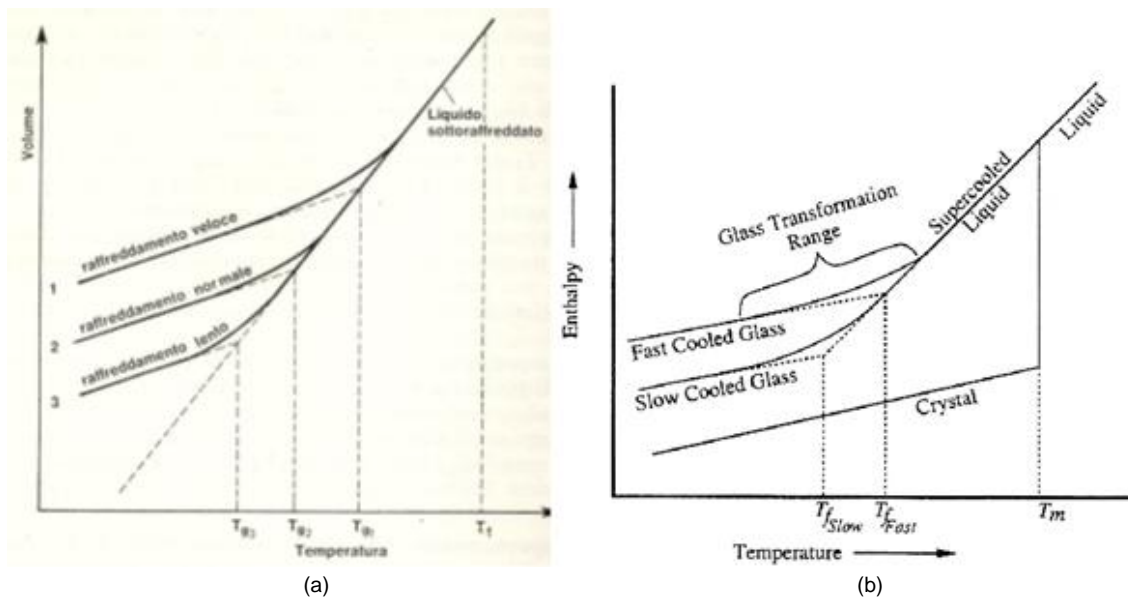


Fig.1.2 – (a) variazione della temperatura di transizione vetrosa al variare della velocità di raffreddamento; (b) Variazione dell'entalpia con la velocità di raffreddamento

Come mostrato dal diagramma se si prende uno stesso liquido e lo si raffredda con diverse velocità si ottengono invece strutture con densità diverse. Se aumento la velocità di raffreddamento aumenta T_g e aumenta il volume specifico, dunque diminuisce la densità del vetro.

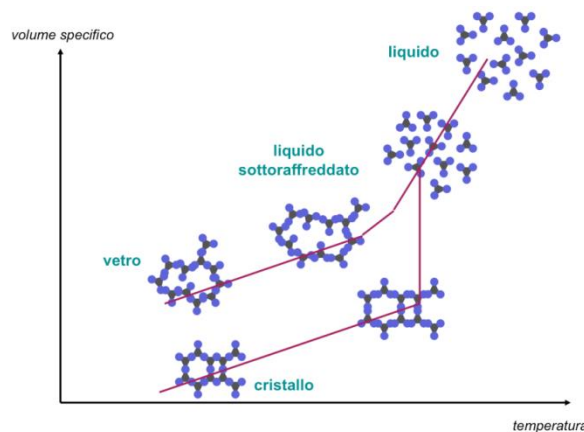


Fig.1.3 – Relazione tra gli strati vetroso, liquido e solido (cristallino)

Dalla Fig.1.3 in termini molto generici, si può immaginare che nella fase di raffreddamento le strutture costituenti il liquido possono inizialmente ruotare e avvicinarsi le une alle altre. Se avviene la vera e propria solidificazione le strutture unitarie si uniscono ordinatamente e possono poi solo avvicinarsi. Se invece si forma un vetro, si passa prima attraverso un liquido sottoraffreddato dove, in parte c'è ancora possibilità di rotazioni, e quindi al vetro vero e proprio, dove i movimenti sono simili a quelli del cristallo.

1.3 STRUTTURA DEL VETRO

Analizzando la struttura del vetro con tecniche quali la diffrazione di raggi x o di neutroni, questa presenta una struttura indistinguibile da quella di un liquido, ma a differenza di quest'ultima ha un ordine a corto raggio nelle vicinanze di qualche atomo.

Nel caso della silice vetrosa tale ordine è dovuto alla conservazione dell'unità strutturale, il tetraedro silicico.

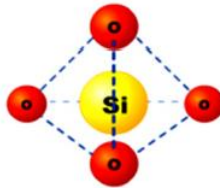


Fig.1.4 – tetraedro di silice

I tetraedri silicici sono collegati attraverso i vertici, cioè ogni atomo di ossigeno è comune a 2 tetraedri contigui sia nella forma cristallina che in quella vetrosa.

A differenza della struttura cristallina, nella struttura vetrosa l'angolo di contatto tra 2 tetraedri può variare entro limiti più ampi e la struttura formata, presenta orientazione variabile, non seguendo uno schema geometrico regolare proprio a causa della variabilità degli angoli di legame. Questo comporta che i legami interatomici siano di forza diversa da punto a punto della struttura, causando l'assenza di un preciso punto di fusione.

Modello strutturale secondo Zachariasen

Le considerazioni fatte per la silice si possono estendere ad altri ossidi. Osservazioni condotte su numerosi ossidi formatori di vetro mostrano che le proprietà meccaniche quali densità della fase vetrosa sono simili a quella possedute dal corrispettivo solido cristallino. Da questi fatti Zachariasen dedusse che la differenza di energia libera tra un vetro e il corrispettivo cristallo è limitata.

Zachariasen propose un set di regole empiriche per prevedere la capacità di un ossido a formare strutture vetrose:

- 1) Ogni atomo di ossigeno è legato a più di 2 cationi.
- 2) Il numero di ossigeni coordinati ad ogni catione deve essere piccolo (<4).
- 3) I polimeri formatori dagli atomi di ossigeno devono condividere l'uno con l'altro i vertici ma non i spigoli o le facce.
- 4) Per dar luogo ad un reticolo tridimensionale devono essere condivisi almeno 4 o tre vertici per polimero.

Sulla base delle regole di Zachariasen gli ossidi si dividono in:

- Formatori di reticolo
- Modificatori di reticolo
- Ossidi intermedi

1.3.1 FORMATORI DI RETICOLO

I formatori di reticolo senza l'introduzione di altri ossidi sono: SiO_2 , GeO_2 , P_2O_5 , B_2O_3 e As_2O_3 .

Di questi i primi tre hanno una struttura formata da tetraedri e gli ultimi da triangoli.

Se a uno o più ossidi vetrificanti vengono aggiunti altri ossidi è ancora possibile ottenere un vetro purché la percentuale di formatori di reticolo sia sufficiente elevata. Gli ossidi introdotti hanno un'influenza pesante sulle proprietà del vetro perché interrompono la continuità del reticolo causando l'indebolimento della struttura è quindi determina importanti cambiamenti nelle proprietà del vetro come la drastica riduzione della viscosità ad alta temperatura che permette di ottenere un vetro affinabile e lavorabile a temperature molto inferiori.

Gli ossidi introdotti possono avere un effetto profondo sulla struttura in quanto modificano la continuità del reticolo vetroso.

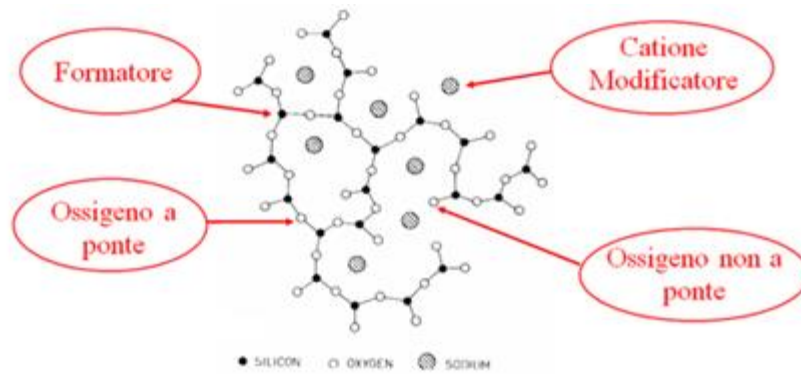


Fig.1.5 – Struttura del vetro con formatori di reticolo

1.3.2 MODIFICATORI DI RETICOLO

Questi ossidi modificano la struttura del vetro ma non sono in grado di vetrificare, sono costituiti principalmente dagli ossidi dei metalli alcalini come Na_2O , K_2O , Li_2O e alcalini terrosi come MgO , CaO , BaO e ZnO .

La presenza di questi ossidi comporta:

- L'aumento della mobilità e diminuzione della viscosità (diminuzione della temperatura di formazione del vetro).
- Modifica delle proprietà del vetro a seconda della composizione.

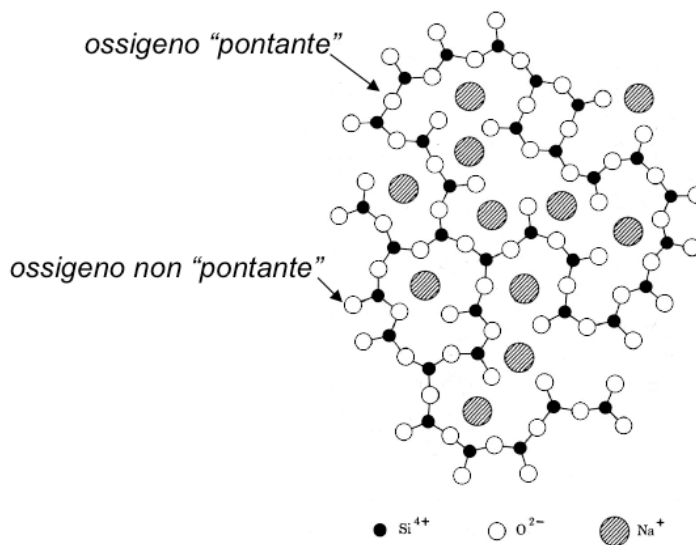


Fig.1.6 – Struttura di un vetro sodico-calcico con la presenza di modificatori di reticolo

1.3.3 OSSIDI INTERMEDI

Non formano vetri di per se, ma agiscono da formatori di reticolo se aggiunti in quantità limitata ad altri ossidi che formano vetri. Gli ossidi che rientrano in questo gruppo sono BeO , Al_2O_3 , TiO_2 e ZrO_2 .

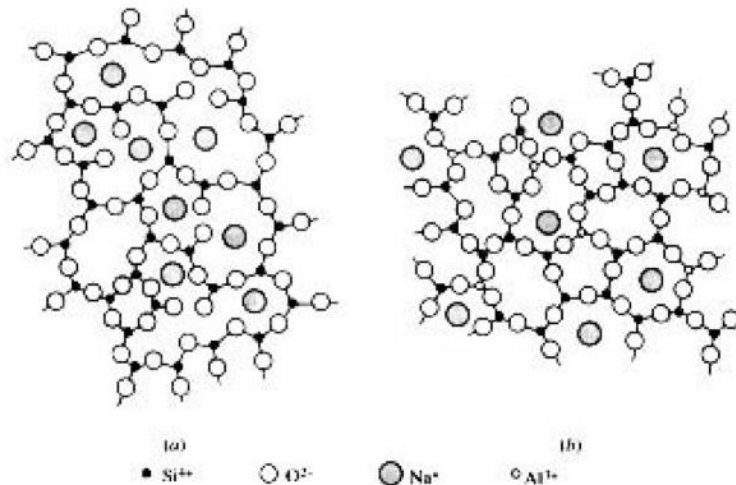


Fig.1.7 – Struttura di un vetro con la presenza di ossidi intermedi

Il modello di Zachariasen anche se valido in molti casi, presenta molti limiti e tra i maggiori si evidenzia l'applicabilità ai soli ossidi e non è invece generalizzabile ad altri sistemi vetrogeni.

Oltre agli ossidi menzionati precedentemente altre sostanze possono essere aggiunte per ottenere diverse proprietà e vengono così classificate in base alla loro funzione:

- Fondenti: abbassano la temperatura di fusione e migliorano la fluidità del vetro durante la sua produzione (ossidi di potassio e sodio);
- Stabilizzanti: migliorano le proprietà chimiche e meccaniche del vetro prodotto (ossidi di calcio, bario, magnesio e zinco);
- Affinanti: agevolano l'eliminazione di difetti (triossido d'arsenico, nitrati alcalini e nitrati d'ammonio);
- Coloranti: modificano l'aspetto cromatico del vetro prodotto (ossidi di ferro, rame, cromo e cobalto);
- Decoloranti: neutralizzano il colore impartito da altre sostanze (biossido di manganese);
- Opacizzanti: per la produzione del vetro opalino (fosfati di sodio, cloruri di sodio, fosfati di calcio, cloruri di calcio, ossidi di stagno e talco).

1.4 PROPRIETA' DEL VETRO

Le proprietà dei manufatti in vetro dipendono dalla sua composizione, dal processo produttivo e dagli eventuali trattamenti successivi. Proprio sulle proprietà fisiche e chimiche si basano i metodi di lavorazione mentre sulle proprietà meccaniche si basa la resistenza dei vari vetri agli sforzi esterni. La distinzione tra proprietà fisiche e chimiche nel caso del vetro non è mai netta, perché si assiste ad una transizione continua tra le proprietà puramente fisiche e quelle chimiche.

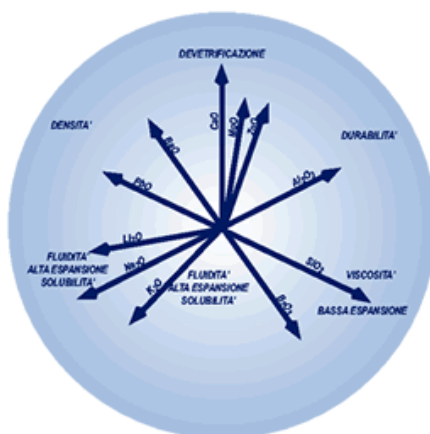


Fig.1.8 – Effetto dei diversi ossidi sulle proprietà del vetro

1.4.1 PROPRIETA' FISICHE

Densità

La densità del vetro dipende dall'elevato volume libero (spazio vuoto tra gli atomi) presenti. Questo permette per esempio una facile diffusione di altri elementi nel reticolo. Il volume libero dipende dalla composizione e dalla storia termica (a diverse valori di T_f corrispondono diversi valori di densità).

L'aggiunta di altri ossidi porta, in genere, ad un aumento di densità. La densità non dipende solo dal diverso peso atomico degli atomi costituenti ma anche dalla coordinazione degli stessi.

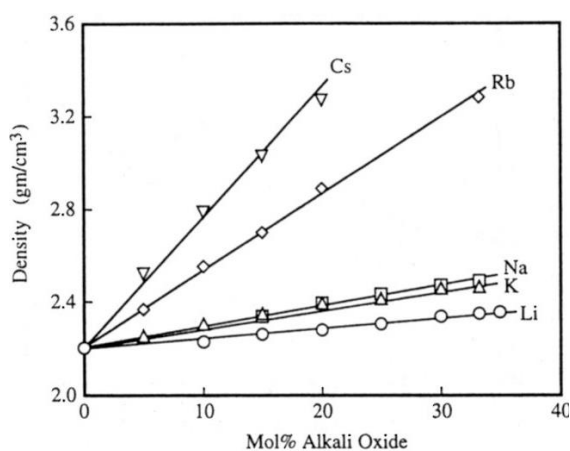


Fig.1.9 – Densità per diversi materiali

Viscosità

Nella lavorazione del vetro la viscosità è di prima importanza, la stessa formazione dello strato vetroso dipende dal fatto di possedere una certa viscosità ad una temperatura, così come la capacità di dare forma ad una massa vetrova e di poterla lavorare dipendono dall'esatta conoscenza della relazione viscosità-temperatura e di quella viscosità-composizione.

Dal punto di vista pratico, la viscosità è importante in tutte le fasi della produzione del vetro.

Inoltre sono legati alla viscosità del vetro numerosi fenomeni: gli effetti termici residui, le variazioni della conducibilità elettrica e lo smorzamento delle vibrazioni meccaniche.

Conducibilità termica

Nei vetri la conducibilità termica è dovuta interamente alle vibrazioni termiche del reticolo, data l'impossibilità da parte degli elettroni di muoversi. Le vibrazioni danno luogo a onde termoelastiche, ovvero quanti di energia vibrazionale detti fononi.

La conducibilità termica di un vetro non varia molto con la composizione e aumenta lievemente con la temperatura. Essendo i vetri solidi ad altissimo disordine strutturale, i vetri non conducono bene in quanto il cammino libero dei fononi è molto breve.

Dilatazione termica

Il coefficiente di dilatazione lineare α è legato alla asimmetria (rispetto al punto di equilibrio) della curva potenziale – distanza intratomica.

In un vetro la dilatazione termica dipende dalla forza dei legami presenti, dalla presenza di ossigeni non pontanti (formano legami meno forti – parzialmente ionici) e dal volume libero; l'allungamento di un legame non causa un aumento del volume totale, come nel caso della silice che a basse temperature viene occupato lo spazio vuoto.

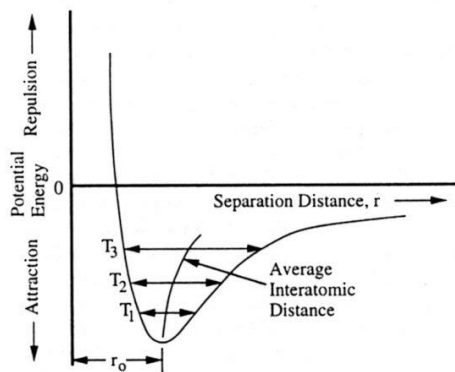


Fig.1.10 – Curva Condon-Morse per l'energia potenziale

Il coefficiente di dilatazione termica lineare influenza sostanzialmente la resistenza allo shock termico: questa è definibile come il massimo salto di temperatura in raffreddamento sopportabile dal materiale ed è direttamente proporzionale alla resistenza meccanica e inversamente proporzionale al modulo elastico e ad α .

Essendo il vetro un cattivo conduttore di calore, uno sbalzo termico provocherà in esso tensioni meccaniche di segno opposto sulle due facce tanto più è maggiore è il suo coefficiente di dilatazione, con pericolo di rottura se esse superano la resistenza meccanica del vetro.

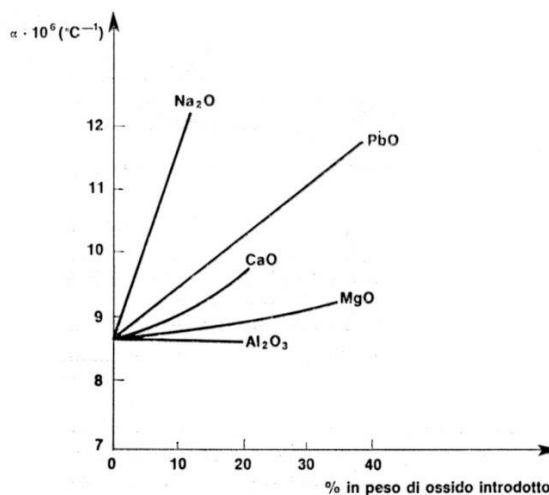


Fig.1.11 – Coefficiente di dilatazione lineare per diversi materiali

Conducibilità elettrica

Il vetro a temperatura ambiente è un isolante ma se viene riscaldato a temperatura superiore a 800°C diventa conduttore. La conduzione è di tipo ionico a differenza dei metalli dove la conduzione è di tipo elettronica. La resistività elettrica è legata in maggior modo dagli ioni alcalini litio, sodio e potassio oltre che dalla viscosità. Quindi è strettamente legata alla presenza di ossidi alcalini o alcalino-terrosi. Quest'ultimi sono maggiormente legati al reticolo e di conseguenza determinano una minore conducibilità. La conducibilità è influenzata oltre che dalla forza dei legami anche dalla mobilità degli ioni.

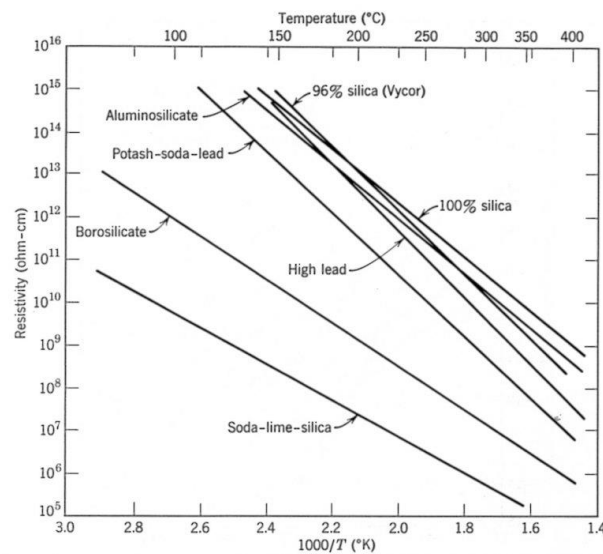


Fig. 1.12 – Conducibilità elettrica per diversi materiali

1.4.2 PROPRIETA' CHIMICHE

E' importante conoscere la resistenza chimica di un vetro per ogni sua applicazione e la resistenza chimica nei confronti degli agenti atmosferici. Il vetro presenta un'eccellente resistenza chimica nei confronti dei reagenti chimici.

L'unico reattivo che attacca i vetri rapidamente è l'acido fluoridrico, mentre l'attacco degli altri acidi consiste in un puro scambio tra gli ioni alcalini del vetro sodio potassio e gli ioni H dell'acido. La velocità dell'attacco chimico è condizionata dalla diffusione degli ioni. I vetri ad elevata resistenza chimica si possono ottenere riducendo al minimo la presenza di alcali nel vetro, ma introducendo quale formatore di reticolo B_2O_3 assieme alla silice.

Il vetro può subire attacco da parte dell'acqua. Le reazioni fondamentali sono:

- La dissoluzione, che riguarda Si-O;
- lo scambio ionico, che riguarda gli ioni alcalini o alcalino-terrosi presenti.

La dissoluzione è efficace a $pH > 9$ ovvero in ambiente basico. La velocità di dissoluzione in acqua dipende dalla composizione chimica.

Il fenomeno del weathering (ovvero resistenza all'atmosfera) è legata a reazioni di scambio ionico e carbonatazione degli idrossidi.

Questa seconda reazione genera incrostazioni sulla superficie del vetro che possiedono coefficiente di dilatazione termica diversa rispetto al vetro. Perciò durante la loro formazione le variazioni di temperatura possono generare sforzi residui che portano a microfessurazioni e all'ulteriore attacco del vetro da cui è tipico l'aspetto di sporco o di consumo.

1.4.3 PROPRIETA' MECCANICHE

Resistenza e durezza

La resistenza meccanica è indubbiamente una delle più importanti proprietà del vetro dal punto di vista tecnico.

Sotto la temperatura di trasformazione il vetro si comporta come un materiale tipicamente elastico. La sua proprietà di durezza non può essere definita con precisione, solitamente ci si serve della cosiddetta scala di Mohs, il cui vetro risulta avere una durezza compresa tra il 5° e il 7° posto e non dipende in gran misura dalla composizione, mentre la resistenza all'abrasione dipende soprattutto dalla struttura superficiale.

Il vetro è un materiale fragile e la frattura nasce da cricche microscopiche che si creano all'atto della formatura del vetro, quindi esente da deformazioni plastica.

Le cricche abbassano la resistenza del vetro in prossimità del loro apice dove si assiste ad un'enorme intensificazione degli sforzi anche di 3 ordini di grandezza dello sforzo applicato.

Da studi condotti su provini identici si dimostrò che la resistenza a trazione di un vetro era tanto minore quanto maggiore era la lunghezza di un eventuale cricca presente al suo interno.

Si può arrivare a rottura di un manufatto anche dopo un tempo molto lungo di applicazione della sollecitazione a causa di un fenomeno noto come fatica statica dovuta ad un effetto di tensocorrosione.

1.4.4 PROPRIETA' OTTICHE

Una delle proprietà più evidenti del vetro è la trasparenza alla luce visibile, ossia la capacità di trasmettere le radiazioni visibili con lunghezza d'onda λ tra 0,39 e 0,80 μm . La trasparenza è dovuta all'assenza di stati di transizione elettronici nell'intervallo energetico della luce visibile e al fatto che il vetro è omogeneo a tutte le scale di grandezza superiori alla lunghezza d'onda della luce; le disomogeneità provocherebbero infatti dispersione dei raggi luminosi e quindi un'immagine sbiadita.

Il vetro comune non è invece trasparente alle lunghezze minori di 400 nm ovvero il campo ultravioletto a causa dell'aggiunta della soda, perciò si avrà un forte assorbimento nel campo di tale radiazione e non nel campo del visibile. La presenza nella composizione di ioni dei metalli di transizione da luogo ad assorbimenti selettivo nei confronti di determinate lunghezze d'onda, in tal caso si otterrà un vetro colorato del colore complementare a quello corrispondente la radiazione assorbita.

1.5 CLASSIFICAZIONE

I vetri si suddividono in base al loro utilizzo e composizione. A causa della variabilità di quest'ultima i vetri hanno proprietà e applicazioni diverse.

Vetri di silice

Composizione chimica: $\text{SiO}_2=99\%$ si ottengono per fusione di quarzo purissimo a temperatura superiore ai 2000°C.

Proprietà: caratterizzati da una elevata resistenza alla temperatura, sono infatti utilizzabili fino a 100°C, resistività elettrica e chimica, bassissimo coefficiente di dilatazione termica e quindi un'ottima resistenza agli sbalzi termici, è trasparente alle radiazioni UV, IR molto più degli altri vetri.

Impieghi: produzioni chimiche e ottiche, per materiali elettrici isolanti nei forni o in elementi elettrici riscaldanti.

Vetri sodico-calcico

Composizione chimica: $\text{SiO}_2=71-73\%$, $\text{Na}_2\text{O}=12-14\%$, $\text{CaO}=10-12\%$, $\text{MgO}=1-4\%$ gli ossidi diminuiscono il punto di rammollimento, l'aggiunta di MgO per prevenire la devetrificazione e l'aggiunta di Al_2O_3 ne migliora la durabilità.

Proprietà: una buona resistenza e durabilità all'acqua sono comunque caratterizzati da bassa resistenza al calore e agli sbalzi termici e la loro resistenza chimica è solo discreta.

Impieghi: per il basso costo, la facile fabbricazione e lavorazione, lo rendono il vetro di gran lunga il più prodotto.

Vetri borosilicati

Composizione chimica: $\text{SiO}_2=80\%$, $\text{B}_2\text{O}_3=13\%$ e sono noti anche come vetri Pyrex. L'aggiunta di boro riduce la viscosità del fuso e la quasi totale eliminazione degli alcalini lo rendono un vetro con eccellenti doti.

Proprietà: elevata resistenza agli agenti chimici, agli shock termici e alta resistività elettrica.

Impieghi: importanti applicazioni per vetreria da laboratorio, termometri e tubi calibrati, attrezzature e tubazioni di industrie chimiche farmaceutiche, isolamento elettrico nonostante siano piuttosto costosi.

Vetro allumino-boro-silicati

Composizione chimica: $\text{Al}_2\text{O}_3=6\%$, $\text{B}_2\text{O}_3=9\%$

Proprietà: elevata resistenza chimica, maggiore dei vetri boro-silicati.

Impieghi: flaconi di farmaci, liofilizzanti, profumi, siringhe provette.

Vetro al piombo (cristallo o vetro Flint)

Composizione chimica: $\text{SiO}_2=63\%$, $\text{Na}_2\text{O}=7,1\%$, $\text{K}_2\text{O}=7\%$, $\text{PbO}=21\%$

Proprietà: indice di rifrazione maggiore di quelli del vetro comune, con l'effetto di comparire più brillante.

Impieghi: cristalleria da tavola, mentre in campo ottico si usano per lenti acromatiche. Elevati valori della costante dielettrica si ottengono con tenori di piombo del 60% e vengono perciò usati per condensatori, tubi elettronici e come schermi per radiazioni.

Vetro alluminosilicati

Composizione chimica: $\text{SiO}_2=57\%$, $\text{Al}_2\text{O}_3=20,5\%$, $\text{MgO}=12\%$

Proprietà: aumento di densità dovuta Al_2O_3 hanno un comportamento simile ai borosilicati ma possono supportare temperature più alte e il basso coefficiente di dilatazione li rende resistente agli sbalzi termici.

Impieghi: finestre nel settore aerospaziale e utensili da cucina e sono tuttavia più costosi e difficili da lavorare.

Vetro vycor

Composizione chimica: $\text{Na}_2\text{O}=10\%$, $\text{B}_2\text{O}_3=30\%$, $\text{SiO}_2=60\%$

Proprietà: resistenza elevata agli sbalzi termici e a temperature superiori i 900°C e da un ottima trasparenza.

Impieghi: dai bulbi delle lampade per radiazione ultravioletta agli oggetti da laboratorio. L'aspetto negativo risiede nell'elevato costo e lo si utilizza per ovviare alle difficoltà di fusione della silice pura.

1.6 LAVORAZIONE DEL VETRO

Nelle operazioni tecnologiche di formatura e lavorazione il vetro assume particolare importanza la relazione tra la viscosità del vetro e la temperatura che è la proprietà

fondamentale che determina i processi di formatura. Per ogni vetro determinati valori di viscosità corrispondono a temperature ben precise, funzione soprattutto della composizione. Tali temperature vengono così suddivise:

- Punto di lavorazione, temperatura corrispondente a una viscosità di $\eta=10^3$ Pa·s= 10^4 P.
- Punto di rammollimento, temperatura corrispondente a una viscosità di $\eta=10^{6.6}$ Pa·s= $10^{7.6}$ P.
- Punto di ricottura, temperatura corrispondente a una viscosità di $\eta=10^{12}$ Pa·s= 10^{13} P.
- Punto di tensione, temperatura corrispondente a una viscosità di $\eta=10^{13.5}$ Pa·s= $10^{14.5}$ P.

Nella formazione del vetro il valore di viscosità dipende dalle dimensioni dell'oggetto e dal tipo di lavorazione; si lavora nell'intervallo di temperatura che oscilla tra quella di lavorazione e quella di rammollimento in cui esso è allo stato plastico. La fabbricazione del vetro si articola in quattro fasi:

- Fusione
- Formatura
- Ricottura
- Finitura

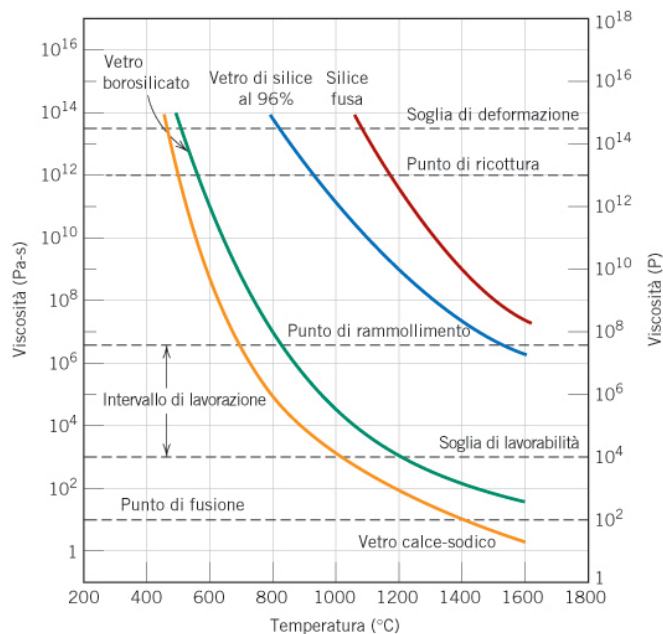


Fig. 1.13 – Effetti della composizione sulle proprietà strutturali

1.6.1 FUSIONE

La fusione è la fase iniziale, durante la quale la carica, formata da componenti diversi tra loro, viene polverizzata e mescolata a rottami di vetro che agiscono da fondente. La miscela prefusa è costituita da sabbia silicea, la cui purezza è in funzione del vetro da ottenere, la granulometria fine della miscela complessiva è di fondamentale importanza per facilitare la fusione stessa e prevenire problemi di omogeneità della miscela. L'omogeneità è importantissima e per favorirla, oltre alle dimensioni dei grani, è fondamentale l'aggiunta di piccole quantità di acqua che impediscono la separazione tra le fasi per la riuscita di una buona qualità della miscela. Gli ingredienti principali per un bagno di fusione sono tre:

- Un vetrificante siliceo introdotto sotto forma di sabbia
- Un fondente soda potassio sotto forma di solfato o carbonato
- Uno stabilizzante che conferisce al vetro insolubilità in acqua

A queste operazioni segue l'operazione di affinaggio che permette l'eliminazione delle bolle di gas formatesi per decomposizione della miscela tramite l'aggiunta di piccole percentuali di agenti affinanti. La fusione si conclude con la fase di riposo o di condizionamento, durante la quale la massa fusa viene raffreddata gradualmente fino alla temperatura di forgiatura o di formatura.

1.6.2 FORMATURA

La formatura è eseguita durante il campo di temperatura nel quale assume viscosità tale da poter essere lavorata e da conservare la forma impartita, senza alterazioni.

1.6.2.1 Vetro cavo

Le tecniche che riguardano la produzione di vetro cavo e in particolar modo, di bicchieri e di bottiglie sono:

- Colata
- Stampaggio per compressione o per soffiatura
- Centrifugazione

1.6.2.2 Vetro piano

A differenza della realizzazione del vetro cavo la produzione del vetro piano è ottenuta per laminazione o stiro. In questo tipo di tecniche, il vetro scorre attraverso rulli di acciaio interamente raffreddati, dando luogo ad un nastro continuo della larghezza massima di 4 m e dello spessore minimo di 1 mm.

Formatura per stiro

La formatura per stiro consente di produrre fogli continui. Al giorno d'oggi grazie alle nuove tecnologie, il vetro da lastre si ottiene a ciclo continuo, secondo i seguenti processi:

- Fourcault
- Libbey Owens
- Pittsburgh

Formatura per laminazione (float)

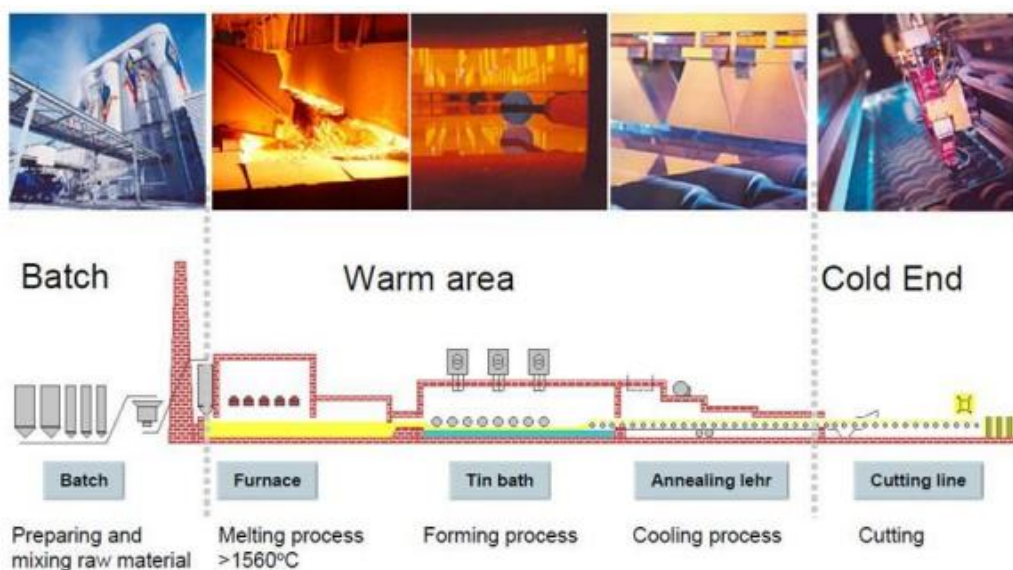


Fig.1.14 – Processo float

Introdotta nel 1959 il processo float ha soppiantato tutti gli altri metodi di formatura del vetro piano. Nel processo denominato float glass, la pasta vitrea, proveniente dal crogiolo alla temperatura di 1000°C, assume forma perfettamente piana in un forno a tunnel la cui base è formata da un letto di 7 cm di stagno fuso. Lo stagno si usa per la sua tensione superficiale, la sua densità e il basso punto di fusione; questo leviga la superficie inferiore del vetro per diretto contatto, mentre la parte superiore si appiattisce per gravità essendo ancora allo stato semifuso. Lo spessore del nastro di vetro float è dato dalla velocità di rotazione dei rulli, detti top, situati ai bordi della vasca. Raggiunta la temperatura di 600°C ormai solido, viene raffreddato seguito da una fase di taglio trasversale del vetro in lastre. Con il vetro float la fase di lucidatura è diventata superflua.

A queste tecniche se ne aggiungono ulteriori per la modellazione e la formazione del vetro, come la forgiatura impiegata in svariati componenti e la filatura per la produzione di fibre di vetro.

1.6.3 RICOTTURA

La ricottura consiste in un riscaldamento del vetro fino alla temperatura superiore del punto di ricottura e serve ad eliminare le tensioni che si generano durante la formatura e che rendono difficile le operazioni di finitura; la ricottura è una fase essenziale per eliminare le tensioni interne formatesi per irregolarità di riscaldamento e raffreddamento. La scelta della temperatura e della velocità di raffreddamento sono in funzione del tipo di vetro e del suo spessore.

Dopo aver raggiunto l'uniformità termica la temperatura viene mantenuta per un periodo sufficiente, successivamente il vetro viene raffreddato lentamente fino alla temperatura di 50°C inferiore a quella di ricottura e infine portato a temperatura ambiente.

1.6.4 FINITURA

Possono essere di vari tipi:

- Meccanica: pulitura, molatura, smerigliatura, intaglio
- Chimiche: opacificazione ottenuta tramite acido fluoridrico

La finitura superficiale di vetro piano è realizzata tramite mole abrasive che levigano ambedue le facce, generalmente è effettuata con abrasivi sottili, quali ossido di cerio (Ce_2O_3) o ferro (Fe), al fine di eliminare ogni distorsione ottica superficiale dovuta a un non perfetto parallelismo delle lastre.

CAPITOLO 2: VETRO IN CAMPO AUTOMOTIVE

2.1 INTRODUZIONE

Al giorno d'oggi il vetro è diventato una parte integrante nel disegno di una vettura. Quando si parla di sicurezza del veicolo raramente vengono menzionati il parabrezza e i finestrini laterali, anche se il vetro di una vettura è stato progettato pensando prima di tutto alla sicurezza del passeggero.

Sebbene scontato, il requisito fondamentale del vetro è anche quello di fornire una visione chiara e senza distorsioni della strada. Al giorno d'oggi con la continua ricerca da parte dei designer nel disegno dalle forme più esasperate dei veicoli si richiede ai produttori di vetri sempre più un alto livello tecnologico nella formatura dei vetri.

Anche se il vetro per automobili sembra lo stesso di qualsiasi altro tipo di vetro, il comportamento e la loro funzione sono molto diverse.

In sostanza i vetri possono essere classificati in due differenti tipi:

- vetro temprato
- vetro laminato

Il primo viene utilizzato per la realizzazione del parabrezza mentre il secondo per i vetri laterali. Questa differenza risiede nel fatto che in caso di emergenza il vetro temprato è più facile da tagliare perché si sgretola in piccoli pezzi granulari rispetto al vetro stratificato, quest'ultimo resta unito anche dopo rottura in quanto i frammenti restano uniti per mezzo di uno strato intermedio intercalato tra i suoi o più strati di vetro.

Senza questi due differenti approcci di rafforzamento i vetri per auto sarebbero poco più di una semplice barriera tra i passeggeri e gli elementi esterni.

Il parabrezza oltre a garantire la funzione principale per il quale è stato inventato, cioè di proteggere gli occupanti del veicolo dall'impatto dell'aria durante la marcia, dalle condizioni atmosferiche e da oggetti volatili come sassi, insetti e polvere, assorbe anche una funzione aerodinamica e strutturale di rigidità dell'intero veicolo.

Grazie ai recenti sviluppi tecnologici, i produttori di vetri hanno apportato numerose novità, nel rispondere alle continue innovazioni e dinamiche del mercato dell'automotive. L'utilizzo di nuovi materiali nel vetro stratificato, nuovi trattamenti e rivestimenti superficiali hanno permesso di soddisfare i comfort dei passeggeri, così tra i nuovi ruoli che un vetro deve soddisfare ci sono:

- protezione dai raggi UV e IR
- assorbimento sonoro
- riduzione trasmissione energia termica
- funzione idrorepellente
- sistemi di sbrinamento e antiappannamento
- ricezione del segnale radio
- head-up display
- supporto della struttura del tettuccio e resistenza all'esplosione dell'airbag

Ricordando che la sicurezza dei passeggeri non risiede solo sulle proprietà intrinseche del vetro ma è di fondamentale importanza anche una corretta installazione del parabrezza fissato perimetralmente alla carrozzeria mediante guarnizioni e collanti.

2.1.1 TRA IL PASSATO E IL FUTURO

Nel corso del ventesimo secolo, le carrozze avevano iniziato a utilizzare il vetro per proteggere i conducenti dai venti forti, tuttavia però non gli proteggeva adeguatamente dai detriti. Solo quando nel 1903, il chimico francese Edouard Benedictus incappato per sbaglio in un incidente in laboratorio, si iniziò a parlare di vetro multistrato. Una fiala di vetro era stata rivestita in materiale plastico che una volta caduta a terra si

frantumò senza dividersi in parti. Nonostante questo, il vetro stratificato non trovò applicazione nelle auto fino al 1920.

Le case automobilistiche lo iniziarono a utilizzarlo nella realizzazione del parabrezza per migliorare la sicurezza degli occupanti in caso di incidente ed eventualmente per proteggere i passeggeri da proiettili. Per tutti i suoi benefici, però i primi tipi di vetro offrivano una resistenza limitata.

Oltre al vetro stratificato, le case automobilistiche iniziarono a utilizzare il vetro temprato alla fine del 1930.

Al giorno d'oggi ci sono di più di 80 aziende in tutto il mondo che producono vetri per auto. Secondo indagini di mercato il 25% per cento della produzione di vetro piano è consumata nell'industria automobilistica.

Alcuni costruttori stanno prendendo in considerazione l'installazione del vetro stratificato in tutte le aree dell'auto, a partire dai vetri laterali e in alcuni veicoli è già in uso. Ad esempio nel segmento delle concept car, il parabrezza si estende fino dietro la testa del conducente, convertendo l'intero tetto in unico pezzo di vetro stratificato.

La necessità da parte dei costruttori di vetri nella realizzazione di vetri sempre più leggeri, non trova solo risposta alle domande dei compratori che esigono avere un veicolo prestazionale e di minor consumo, ma hanno uno risvolto ancora più importante se pensato nel rispetto dell'ambiente, la cosiddetta "green economy" per contribuire alla riduzione di carbonio nell'atmosfera.

L'ottimizzazione del vetro nell'utilizzo per l'automotive del futuro comprende i seguenti obiettivi:

- Ridurre il suono trasmesso, ricercando sia l'utilizzo di materiali fonoassorbenti e sia quello di nuovi accoppiamenti nel vetro stratificato (vetro by-layer).
- Mantenere l'integrità strutturale, riducendo lo spessore del vetro attraverso la combinazione di accoppiamenti di materiali.
- Ridurre il calore trasmesso riducendo il consumo di carburante, utilizzando substrati assorbenti e rivestimenti riflettenti.
- Studiare sia l'uso di nanoparticelle per migliorare le proprietà meccaniche e sia di utilizzare laminati non simmetrici e strati ultra sottili per la riduzione del peso.

Inoltre stanno cercando di trovare il modo di riciclare il vetro, perché una volta realizzato il vetro per auto diventa sempre più difficile da riciclarlo a causa degli elementi presenti internamente al vetro stratificato e ai suoi rivestimenti.

2.2 VETRO STRATIFICATO

Il vetro stratificato come suggerisce il nome comprende due o più pannelli di vetro che vengono stratificati insieme tramite un interstrato polimerico che aderisce saldamente al vetro. Il risultato è un vetro molto trasparente, resistente ad agenti atmosferici, esplosioni e altri rischi per la sicurezza. Come già spiegato precedentemente in caso di rottura i frammenti di vetro rimangono saldamente attaccati all'interstrato senza danneggiare le persone. Proprio per questo motivo il vetro stratificato viene utilizzato per la realizzazione dei parabrezza.

Ad esempio nel caso dell'utilizzo di polivinilbutirrale come interlayer, l'accoppiamento con il vetro avviene per mezzo della pressione esercitata da una serie di rulli riscaldati. Questa combinazione di calore e pressione sigillano meccanicamente e chimicamente lo strato ai strati di vetro. Il legame meccanico avviene attraverso l'adesivo del PVB, mentre il legame chimico è creato tramite legame idrogeno del PVB al vetro.

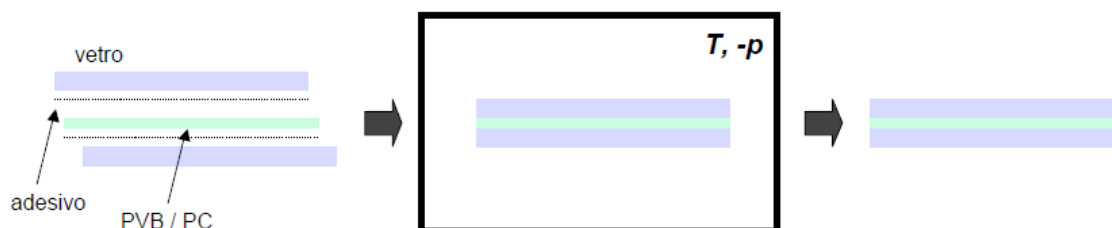


Fig.2.1 – Accoppiamento delle lastre di vetro e dei fogli polimerici

2.2.1 FUNZIONI DELL'INTERSTRATO

Lo strato inserito permette al vetro di assorbire l'energia durante un impatto e al contempo conferire resistenza all'impatto. Questo permette di svolgere due funzioni molto importanti nelle auto. In primo luogo il parabrezza assorbe la forza dell'airbag che si dispiega con incredibile velocità a protezione dei passeggeri, in secondo luogo, contribuisce a evitare lo schiacciamento del tetto dell'auto. In caso di ribaltamento del veicolo, il parabrezza fornisce una forza a resistere al carico di punta del tetto, contribuendo alla rigidità dell'intero veicolo.

L'interstrato fornisce un modo per applicare diverse tecnologie e benefici, come la colorazione, l'assorbimento sonoro, filtro ultravioletti e altre tecnologie che possono essere incorporate insieme all'intercalare, come l'antenna e dispositivi di sbrinamento.

Riassumendo le proprietà principali, sono:

- Sicurezza
- Assorbimento sonoro
- Riduzione del carico termico
- Assorbimento della radiazione ultravioletta
- Protezione da agenti atmosferici
- Durata
- Bassa distorsione visiva

2.2.2 COMPORTAMENTO DELL'INTERSTRATO

Per studiare il comportamento meccanico del parabrezza, molti studi sperimentali sono stati effettuati servendosi di analisi ai modelli FEM agli elementi finiti utilizzando diverse combinazioni e modellazioni del vetro stratificato. In genere l'impatto è studiato in termini di diversa velocità di deformazione: quasi statico o dinamico. L'analisi di deformazione del vetro è ancora una sfida, soprattutto per quanto riguarda un modello di simulazione in grado di studiare il comportamento della propagazione delle cricche e della fessurazione del vetro in condizioni di carico dinamico. Le difficoltà che si incontrano principalmente in sede sperimentale non si limitano solo alla velocità d'impatto, ma riguardano anche l'influenza della curvatura.

Come accennato precedentemente, al fine di ridurre il rischio in caso di rottura è quello di unire due o più strati di vetro con strati di termoplastica. L'accoppiamento che si instaura è molto forte perché è anche di tipo chimico, determinato dall'unione tra gruppi ossidrilici lungo i gruppi polimerici e silanilici sulla superficie del vetro. La funzione dell'intercalare riguarda anche la risposta del vetro alla rottura, perché permette il trasferimento delle tensioni tra i vari strati del vetro stratificato. La valutazione del grado di scorrimento offerta dal polimero è cruciale per la progettazione ed è per questo fenomeno di numerosi studi.

Nella fase di pre-rottura gli interstrati polimerici sono troppo morbidi e sottili per fornire la rigidità flessionale, ma durante la rottura forniscono tensioni tangenziali che ne vincono lo scorrimento. Ciò viene spiegato di seguito.

Se due lastre poste una sull'altra vengono sottoposte ad un carico, inizieranno a piegarsi separatamente. Lo scorrimento si verifica tra le due superfici più interne a

contatto diretto tra di loro, perché una delle due superfici è stata allungata mentre l'altra è stata compressa. Se entrambe le lastre fossero stratificate con interstrato adesivo polimerico, questo dovrebbe poter compensare internamente le differenze di spostamento, in altre parole, dovrebbe poter assorbire le forze tangenziali (Fig.2.2).

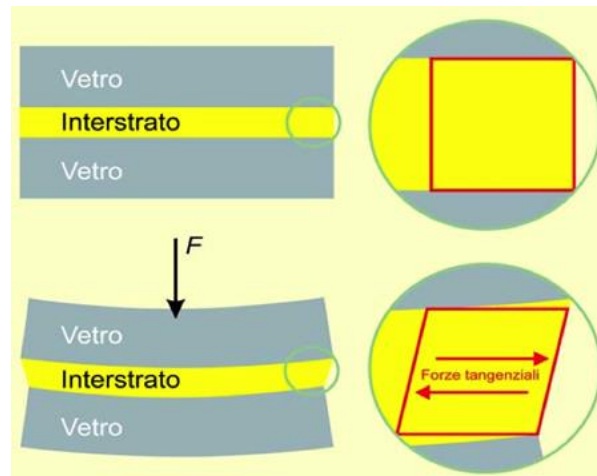


Fig.2.2 – Effetto sotto carico flettente

Se la risposta del vetro è lineare elastica fino a rottura, la risposta del interstrato polimerico è altamente non lineare, in quanto è viscoelastica dipendente dalla temperatura.

Per piccole deformazioni del composito il comportamento elastico è determinato dal vetro, invece per grandi deformazioni, l'interstrato svolge un ruolo dominante proprio perché il vetro fragile non le può sopportare. Quando il vetro non riesce più a sopportarle, si è osservato sperimentalmente che l'energia assorbita dal vetro stratificato è dissipata dall'interstrato a conseguenza della deformazione viscoelastica.

2.2.3 TIPI DI INTERLAYER

Con il passare degli anni i produttori di vetro perfezionando le proprietà dell'interstrato ne hanno portato alla nascita di nuovi. La prima generazione di vetro stratificato era costituita da due lastre di vetro ricotto con inserita uno strato di cellulosa, ma presentava due grossi problemi, uno la decolorazione della cellulosa, e due, la facilità con la quale la cellulosa poteva essere perforata. Questi problemi sono stati risolti con l'introduzione del polivinilbutirrale, che attualmente occupa il 95% del mercato degli interstrati. I materiali dell'interstrato utilizzati per la stratificazione del vetro, più comuni sono:

- polivinilbutirrale (PVB)
- policarbonato (PC)
- poliuretano (TPU)
- etilenevinilacetato (EVA)
- sentryglas (SG)

Polivinilbutirrale

Inventato nel 1930 si forma per reazione di alcool polivinilico con butirraldeide condotta sotto calore e pressione. L'interstrato ha uno spessore di 0,76 mm di spessore, nel caso dei parabrezza. Il polivinilbutirrale è rigido e fragile ma l'aggiunta di ammorbidenti conferiscono plasticità e tenacità anche se questo, influenza l'elasticità, l'assorbimento dell'acqua, la relazione resistenza-adesiva e la dipendenza dalla temperatura. Il PVB è un polimero gommoso, trasparente, con indice di rifrazione simile a quello del vetro sodico-calcico e pertanto non provoca distorsione dell'immagine. Il PVB presenta anche eccellenti adesioni con molti materiali.

Policarbonato

Assorbe energia meccanica aumentando la tenacità globale del manufatto. Possiede però indice di rifrazione inferiore al vetro e quindi può dare problemi di visione.

Poliuretano

Offre alcuni vantaggi rispetto agli altri, come la vasta gamma di temperature operative, ed eccellente resistenza. Viene usato anche come adesivo per favorire l'adesione tra i strati di vetro e i relativi strati polimerici.

Etilenevinilacetato

Copolimero costituito da etilene e monomeri di vinile di acetato. A seconda della composizione spazia da parzialmente cristallino e termoplastico ad amorfo simile a gomma, ma con un aumento della quantità di acetato di vinile migliora la forza e allungamento finale anche se comporta un calo della temperatura di fusione. Il materiale possiede caratteristiche di elevata resistenza alla trazione, eccellente trasparenza, sufficiente coesione, tenacità a bassa temperatura, resistenza alla fessurazione sotto sforzo, proprietà di impermeabilità e resistenza alle radiazioni UV. Grazie alle doti di resistenza alle radiazioni e umidità sta sostituendo e trovando sempre maggior impiego come pannello nel vetro stratificato.

SentryGlas

È un polimero termoplastico prodotto in fogli semicristallini, sviluppato dalla DuPont Company. Questo materiale è più rigido del PVB e può pertanto sopportare carichi maggiori e a parità di peso, può avere uno spessore minore senza compromettere la sicurezza.

Il PVB e gli altri materiali utilizzati come interstrati offrono eccellenti comportamenti quando vengono esposti a carichi improvvisi e di breve durata, ma essendo un polimero plastico a lungo termine, sotto carico, tende a flettersi. Di conseguenza due lastre di vetro stratificate utilizzando PVB ed esposte ad un carico flettente a lungo termine, si comportano esattamente come due lastre che non siano state unite tra di loro.

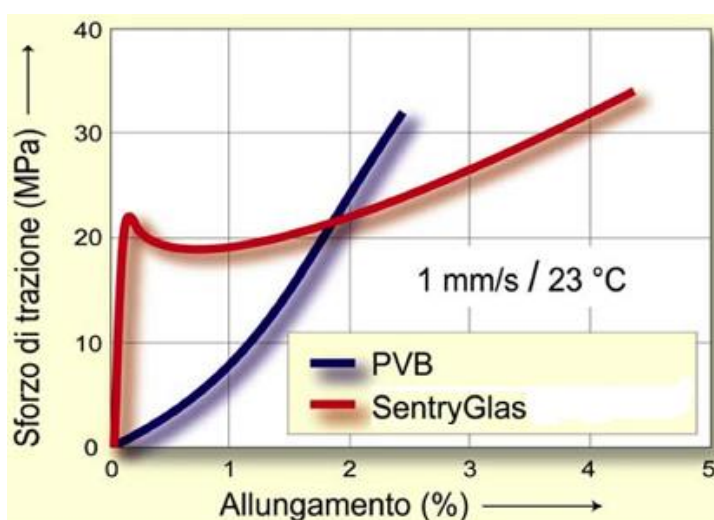


Fig.2.3 – Confronto tra PVB e interstrato SentryGlas su rigidità e sforzo a breve termine

Pertanto, recenti calcoli considerano solamente le proprietà dei componenti del vetro stratificato e non l'effetto globale dell'unione tramite l'intercalare polimerico dell'intero vetro stratificato di sicurezza. L'interstrato SG invece, reagisce in maniera nettamente differente. La sua resistenza durante il test di trazione è molto più elevata rispetto al

PVB e la sua rigidità a temperatura ambiente è 100 volte maggiore e le prestazioni sono analoghe anche a temperatura elevata (Fig.2.4).

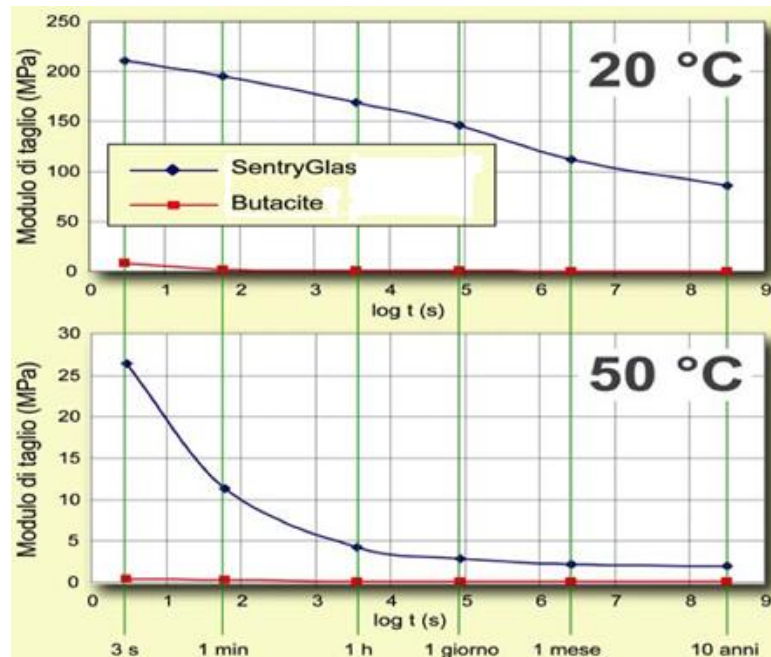


Fig.2.4 – Rigidità (modulo di taglio) del PVB e dell'interstrato SentryGlas a temperatura ambiente e a temperature elevate

Dai test effettuati si traggono le seguenti conclusioni: la freccia del vetro di sicurezza stratificato SG è meno della metà rispetto all'interstrato in PVB e la rigidità è così elevata che il trasferimento di carico tra le lastre di vetro è quasi perfetta. In un test, entrambi i vetri (SG e PVB) sono stati caricati con 3,300 N, successivamente il vetro è stato frantumato lasciando il carico e la deformazione è stata registrata nel tempo. La deformazione dell'intercalare in PVB è stata maggiore rispetto all'interstrato SG, in più, il PVB si è lacerato dopo circa 7 minuti mentre SG è rimasto intatto.

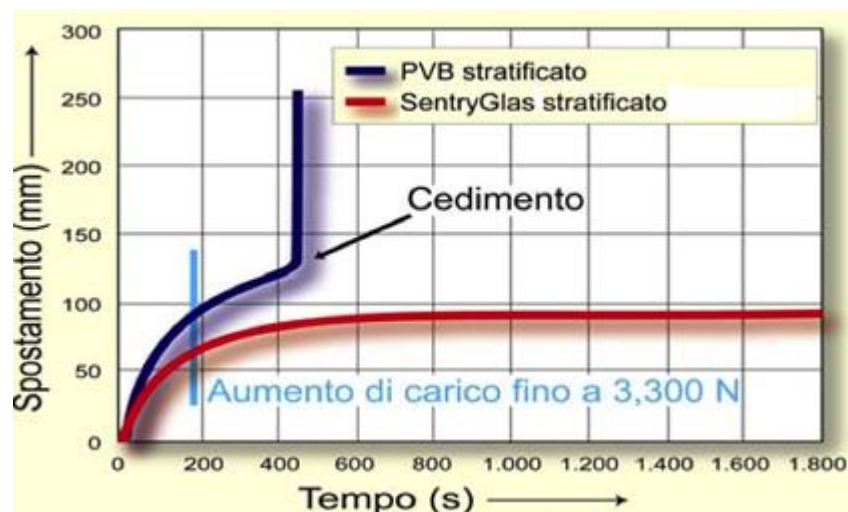


Fig.2.5 – Confronto post-rottura sullo scorrimento plastico (creep) nei vetri stratificati con PVB e in quelli con SentryGlas

Se paragonato con gli interstrati standard, SG è inoltre più resistente all'umidità, agli agenti atmosferici e alle temperature che vanno da -30°C a +70°C. Inoltre i bordi presentano una elevata stabilità e non sono stati riscontrati effetti indesiderati come la delaminazione, lo scolorimento né altre forme di danni sui bordi, restando un vetro estremamente trasparente.

Questi sono gli impressionanti risultati dei test condotti in laboratorio e ricerche effettuate per le applicazioni esistenti.

La possibilità di produrre vetri con eccezionale rapporto prestazioni/peso, permette che da un lato una certa riduzione dei costi, dall'altro una riduzione del peso complessivo particolarmente apprezzato nel settore automotive.

Altri materiali: nanoparticelle e PDLC

Un approccio di recente sviluppo e ancora in fase di studio prevede l'utilizzo di nanoparticelle miscelate con il polimero dell'interstrato al fine di aumentare la stabilità termica, la durezza e la resistenza alla trazione del composito. Proprietà elettriche come la conduttività su alcuni sistemi potrebbero essere sfruttate per lo sbrinamento e altri usi desiderabili.

Vetri di variabile trasparenza sono ottenuti con i "polymer-dispersed liquid crystal (PDLC)", elettricamente commutabili basati su tecnologie cromatiche. I film PDLC sono composti da microgocce di cristalli liquidi dispersi in una matrice polimerica, e possono essere commutati attraverso un campo elettrico dallo stato OFF ad uno stato trasparente ON. Nello stato inattivo, le particelle sono orientate casualmente nel film bloccando oltre il 99% della luce visibile, mentre quando viene applicato una tensione elettrica le particelle bloccano il passaggio della luce.

Ci sono essenzialmente due tecnologie per realizzare i film PDLC: la microemulsione e il metodo di separazione.

Il metodo di emulsione inizia con l'emulsione del liquido cristallo in una soluzione acquosa di un polimero che forma la pellicola. Questa emulsione è rivestita su un substrato conduttore e lasciato asciugare formando una fase solida. La laminazione di un secondo substrato conduttivo porta alla formazione finale della pellicola PDLC.

Nel metodo di separazione PIPS (photopolymerization induced phase separation), una soluzione omogenea di cristallo liquido e prepolimero è rivestita e laminata tra due substrati conduttivi. La separazione delle microgocce si verifica durante l'indurimento del prepolimero. Il metodo PIPS è preferibile al metodo di emulsione in quanto quest'ultimo richiede molto tempo per l'evaporazione dell'acqua e l'essiccazione.

Recentemente nel vetro stratificato i PDLC sono stati sviluppati su grandi superfici con una buona uniformità di dispersione, stabilità alla temperatura e durata nel tempo.

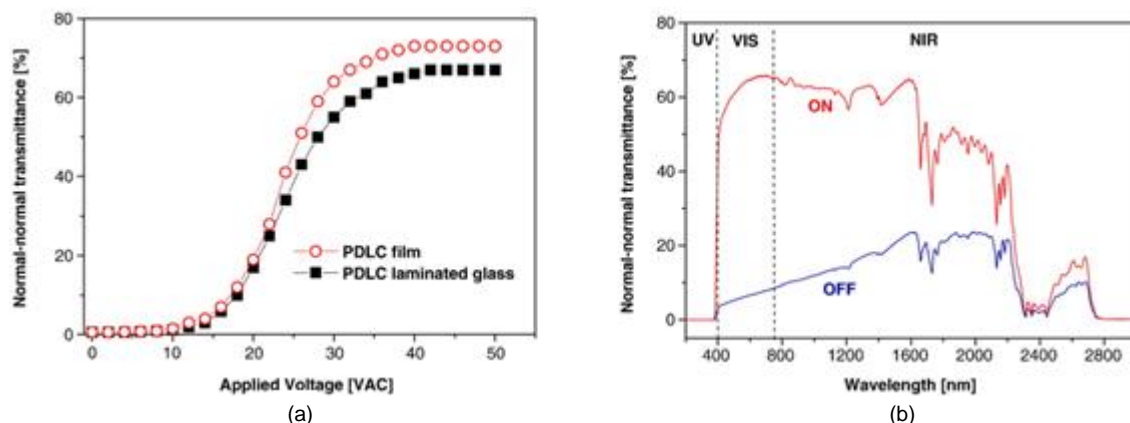


Fig.2.6 – (a) spettro di trasmissione (a 500 nm, temperatura ambiente) in funzione del voltaggio per un film di PDLC e di un vetro laminato; (b) spettro di trasmissione di vetro laminato PDLC allo stato OFF e ON (voltaggio 50 VAC, 60Hz).

2.2.4 TIPI DI ACCOPPIAMENTO

Il vetro stratificato in senso generale comprende due strati di vetro con interposto uno strato polimerico, ma attualmente il mercato degli autoveicoli richiede sempre maggiori ruoli.

La nascita di materiali multistrato costituiti da più pannelli di vetro intervallati da più strati polimerici sono diventati in uso nel settore dell'alta sicurezza come, nel settore militare.

Accoppiamenti vetri stratificati organico-inorganici e accoppiamenti composti solo da strati di materiale organico sono sempre più utilizzati.

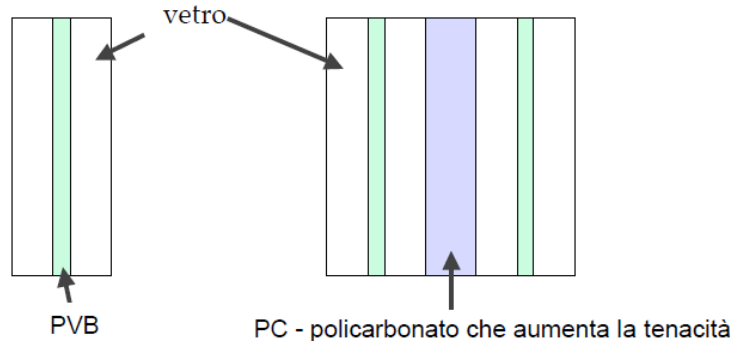


Fig.2.7 – Tipologie di vetri stratificati

L'accoppiamento organico-inorganico può essere costituito da due pannelli di vetro inorganico sostenuto da uno strato polimetilmetacrilato (PMMA) con sottile interstrato adesivo trasparente (ad esempio poliuretano) in mezzo. Tuttavia, è causa di cattiva compatibilità organico-inorganico sono suscettibili di frattura laminare durante il servizio e la lavorazione. La crescita della delaminazione può causare gravi fratture.

Molti metodi sono stati sviluppati per aumentare la resistenza alla delaminazione e prevenire la frattura, attraverso i rivestimenti e la modifica della morfologia superficiale con l'attacco da parte dell'acido fluoridrico, considerato molto efficace per prevenire queste problematiche.

Molte ricerche sono state condotte per indagare sperimentalmente l'effetto dell'acido sul vetro, sulle prestazioni ottiche, energia d'impatto, frattura, sforzo/deformazione e l'accoppiamento.

Si nota che l'attacco dell'acido fluoridrico quando il tempo di incisione è inferiore a 30 min, raramente influenza le proprietà ottiche. La resistenza alla frattura da stress in primo luogo aumenta e poi diminuisce all'aumentare del tempo di incisione, ed è massima a 30 min dall'inizio dell'attacco acido.

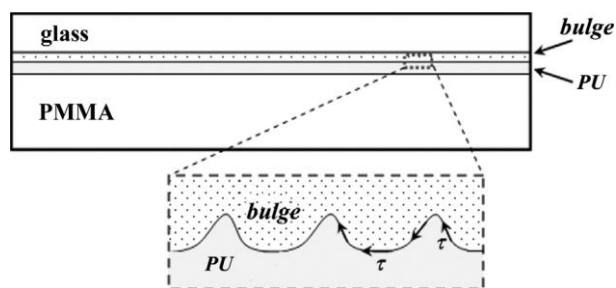


Fig.2.8 - Struttura di interfaccia tridimensionale e distribuzione degli sforzi di laminati

L'attacco crea un rigonfiamento del vetro, che provoca la formazione di un'interfaccia tridimensionale. Questo non solo aumenta notevolmente l'area di contatto tra il vetro e l'interstrato ma, modifica la distribuzione dello stress all'interfaccia e previene la frattura dei laminati.

Per quanto riguarda la produzione di parabrezza si stanno sviluppando nuovi vetri stratificati. Il parabrezza by-layer ancora in fase di sperimentazione richiede solo un foglio esterno di vetro (2-4 mm), uniti ad un foglio (1mm) di poliuretano. Il foglio di poliuretano consiste in due strati, uno avente proprietà di assorbimento e l'altro di elevata resistenza superficiale.

2.3 VETRO TEMPRATO

Il vetro temprato è altrettanto importante per la sicurezza di un veicolo come il vetro stratificato, ma si differenzia notevolmente nelle funzioni. Il processo è condotto per generare sforzi residui di compressione in superficie con il vantaggio che in fase di rottura si ha la frammentazione del vetro.

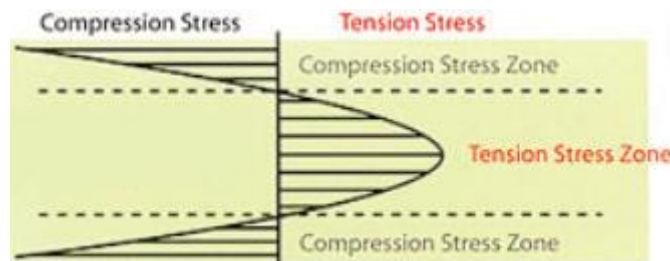


Fig.2.9 – Profilo di tensione in un vetro temprato

Questo tipo di vetro come già detto precedentemente viene utilizzato per i finestrini laterali e per il lunotto posteriore. Vengono sfruttate allo scopo diverse metodologie:

- tempra termica
- tempra chimica
- tempra chimica con doppio scambio ionico

2.3.1 FUNZIONI DEL VETRO TEMPRATO

Il vetro temprato rispetto a un normale vetro evidenzia molti vantaggi con le seguenti proprietà principali, che sono:

- *Forza*: un vetro temprato è in genere 5-10 volte più resistente di un vetro ricotto.
- *Sicurezza*: in caso di rottura per impatto, il vetro si disintegra in piccoli pezzi in modo da ridurre la probabilità di ferite.
- *Resistenza del bordo*: il vetro temprato ha un'elevata resistenza del bordo rispetto a un normale vetro ricotto.
- *Rottura termica*: in caso di un riscaldamento non uniforme della superficie del vetro da parte della luce solare potrebbero sorgere tensioni differenti tra bordo e la zona centrale. Un vetro temprato grazie alla maggiore forza del bordo supporta maggiormente questi stress termici.

2.3.2 TEMPRA TERMICA

La tempra termica consiste in una precompressione degli strati superficiali del vetro dopo un rapido raffreddamento del componente una volta portato a temperature superiori alla T_g . Riassumendo brevemente, consiste in due fasi chiave:

- *Fase 1*: riscaldando la lastra si crea un Δt superficie-cuore che non crea alcun problema (superficie in trazione).
- *Fase 2*: raffreddando velocemente la lastra (per esempio con getti di aria compressa) su entrambi i lati si crea un Δt inverso superficie-cuore.

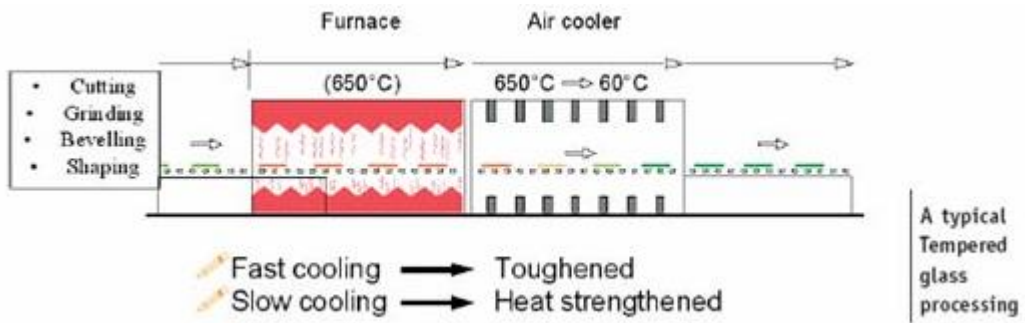


Fig.2.10 – Processo di tempra termica

Questo rapido raffreddamento genera un gradiente di temperatura tra cuore e superficie provocando un ritiro differenziale, causando l'insorgere di sforzi residui. Lo stato di sforzo tra cuore e superficie dipende dal coefficiente di scambio termico, dalla temperatura di tempra e dallo spessore del vetro.

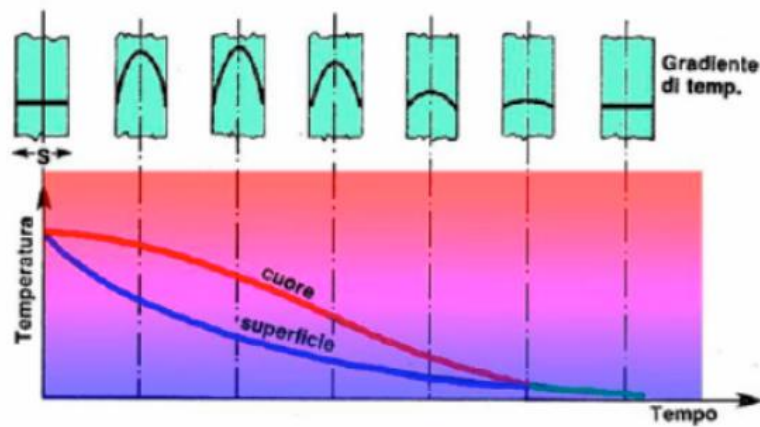


Fig.2.11 – Genesi dello sforzo residuo

La superficie di un vetro temprato è sensibile ai graffi di più di un semplice vetro ricotto e l'elevata tensione residua può portare in caso di eventuali danni ad una frantumazione del vetro in molti piccoli frammenti. Questo è il motivo per cui il taglio e altre operazioni vanno effettuate prima della tempra.

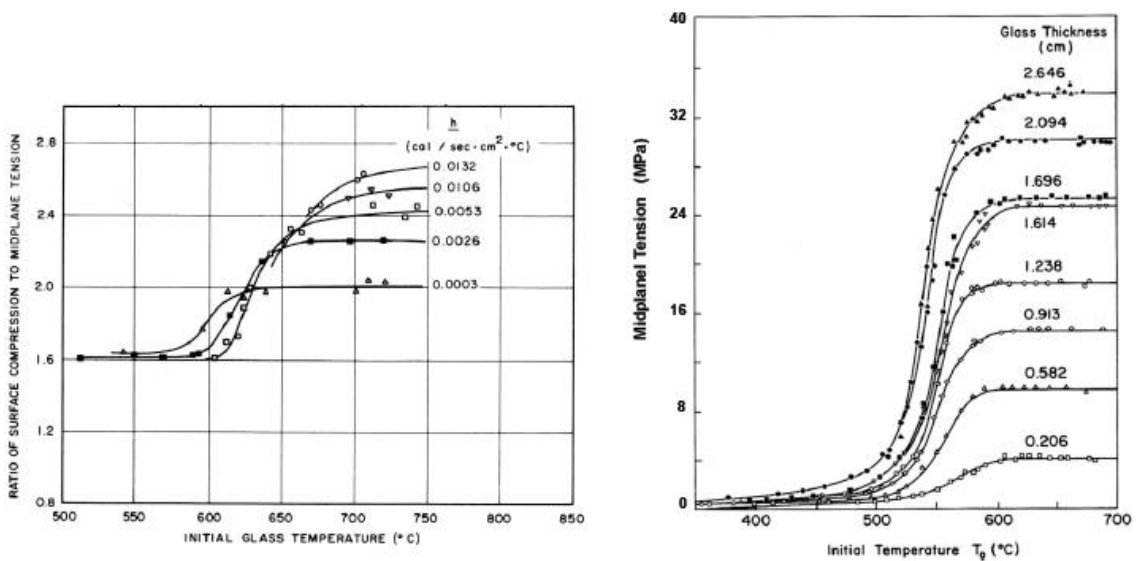


Fig.2.12 – Andamento dello sforzo residuo

La presenza di uno sforzo di compressione superficiale aumenta la resistenza media (dai 200 ai 500 MPa) del vetro in quanto per raggiungere la rottura bisogna prima riportare a zero lo sforzo residuo agente sui difetti superficiali. In realtà, i difetti più grandi (e profondi), associati a resistenze inferiori, sono meno schermati di quelli piccoli. Per questo motivo la tempra causa in genere un aumento della dispersione della resistenza.

Considerando un vetro temprato dal punto di vista del modello di Griffith, la presenza di uno stato di trazione nel cuore determina un contributo superiore alla crack driving force nel momento in cui inizia la propagazione della frattura. In pratica c'è la necessità di scaricare l'eccesso di energia congelato nel cuore e questo comporta un'elevatissima frammentazione del manufatto al momento della rottura.

Attraverso modelli come ad esempio quello di Inglis è possibile calcolare l'energia cinetica in funzione della lunghezza iniziale del difetto e l'andamento della velocità del difetto.

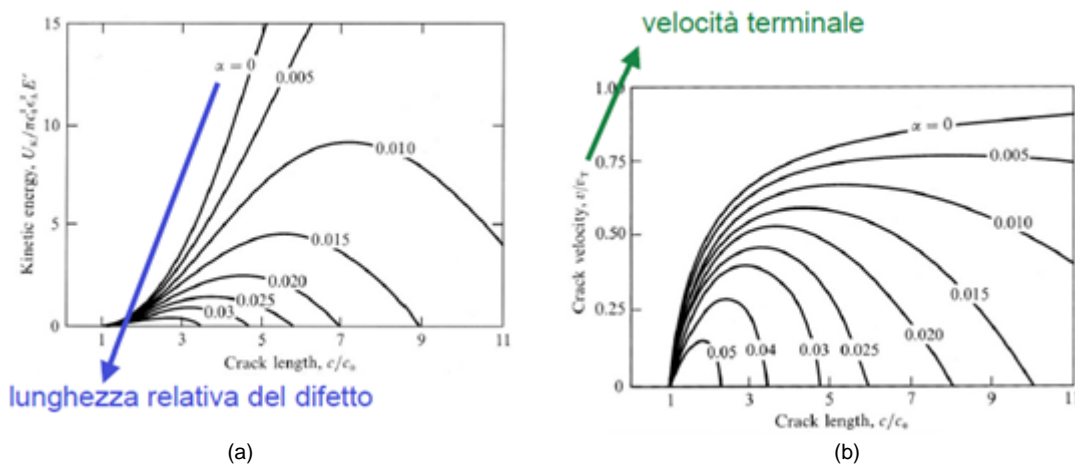


Fig.2.13 – (a) variazione dell'energia in funzione della lunghezza della cricca;
(b) variazione della velocità della frattura in funzione della lunghezza della cricca

Ci sono due tipi principali di trattamenti termici del vetro, vetro indurito termicamente e vetro completamente temperato, distinzione basata sul grado di tensione residua indotta nella superficie del vetro. Hanno lo stesso processo di produzione, ma variano in base alla regolazione di vari parametri come la temperatura e il tempo. Un vetro indurito termicamente è due volte più resistente del vetro ricotto mentre quello temprato lo è dalle quattro alle sei volte e, secondo gli Stati Uniti per il primo la tensione residua deve essere compresa tra i 40 e 55 MPa, mentre per il secondo essa deve superare i 65 MPa.

2.3.2.1 Processo tradizionale

Attraverso l'illustrazione della Fig.2.14, viene mostrato la tipica sequenza di un processo di tempra.

Dopo aver prodotto il pannello con le giuste composizioni richieste il vetro viene tagliato a misura, i suoi bordi vengono trattati e infine lavato con acqua deionizzata e posto su un piano mobile dove subirà le seguenti fasi:

Sezione 1: il vetro viene preriscaldato in forno tradizionale fino al suo punto di rammollimento, approssimativamente intorno ai 660°C per un pannello sodico-calcico.

Sezione 2: il vetro viene ulteriormente aumentato di temperatura (50-100°C), surriscaldando l'ultima parte del forno di preriscaldamento, necessaria a compensare la perdita di calore durante il trasferimento verso l'area di raffreddamento. Questa procedura sfrutta le proprietà del vetro per cui, in presenza di un rapido aumento della temperatura, esso è in grado di restare viscoso per un periodo più lungo.

Sezione 3: si può osservare l'effettivo calo di temperatura del pannello di vetro prima dell'inizio del raffreddamento nella fase successiva.

Sezione 4: il vetro viene raffreddato rapidamente con corrente di aria forzata sulla superficie del vetro.

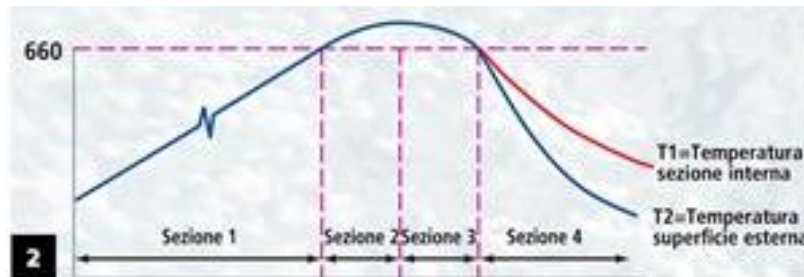


Fig.2.14 – Temperatura del vetro nel processo tradizionale

La rapida fuoriuscita del calore consente di raffreddare la superficie esterna mentre quella interna rimane ancora molle. Mano a mano che il raffreddamento continua, la contrazione termica della parte interna genera una tensione di sollecitazione sulla superficie esterna raffreddata, mentre, una sollecitazione di trazione viene indotta nella parte interna. Si ottiene così un pannello temprato termicamente.

2.3.2.2 Condizioni di tempra

Attraverso la genesi degli sforzi residui si evidenzia che al di sotto dello Strain point (temperatura alla quale gli stress sono rilasciati in 4h) eventuali sforzi non vengono rimossi dal rilassamento del vetro. Il rilassamento è in funzione del tempo e della temperatura ed è importante sapere a che temperatura si deve riscaldare il vetro prima di raffreddarlo. Ad esempio per un vetro sodico-calcico per T troppo basse (600°C, troppo vicino allo Strain point) raffreddandosi velocemente si rompe per shock termico (limite sopportabile 30 MPa). Per T troppo alte (660°C), il vetro si rilassa sotto il proprio peso, perdendo la proprio forma geometrica.

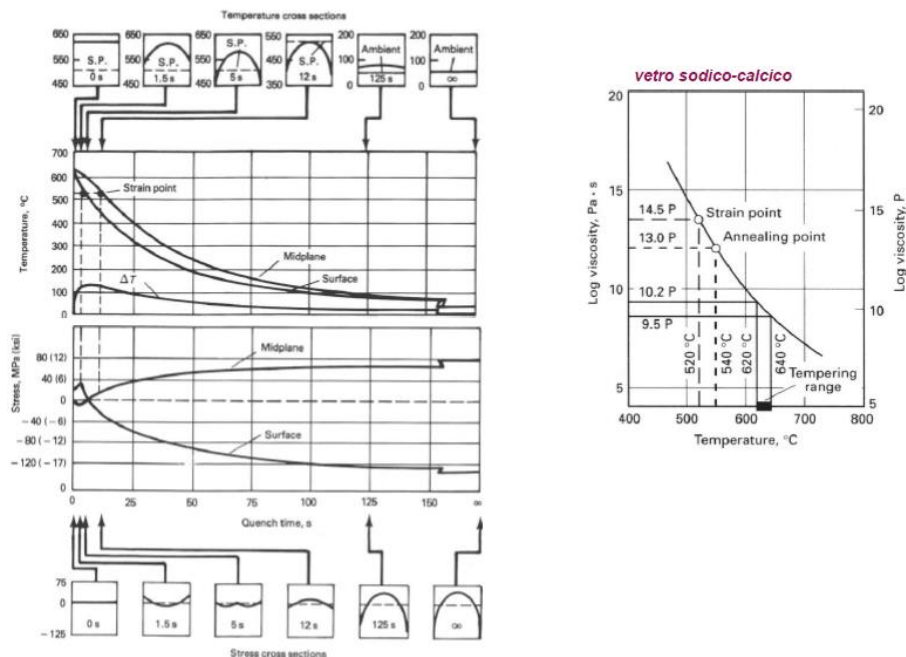


Fig.2.15 – Genesi dello sforzo residuo

Lo sforzo di trazione massimo in superficie una volta definita la temperatura di partenza, è in funzione del coefficiente di scambio termico e dello spessore della lastra. Per temperature di partenza troppo elevate la tempra è possibile (vengono generati sforzi di trazione nel cuore e di compressione in superficie), tuttavia la lastra risulta distorta. Per temperature troppo basse l'effetto è quello dello shock termico con conseguenza che gli shock termici non sono rilassati dal cuore. Quindi non esiste una linea operativa ideale, in quanto dipende principalmente dallo spessore e dalla temperatura di tempra.

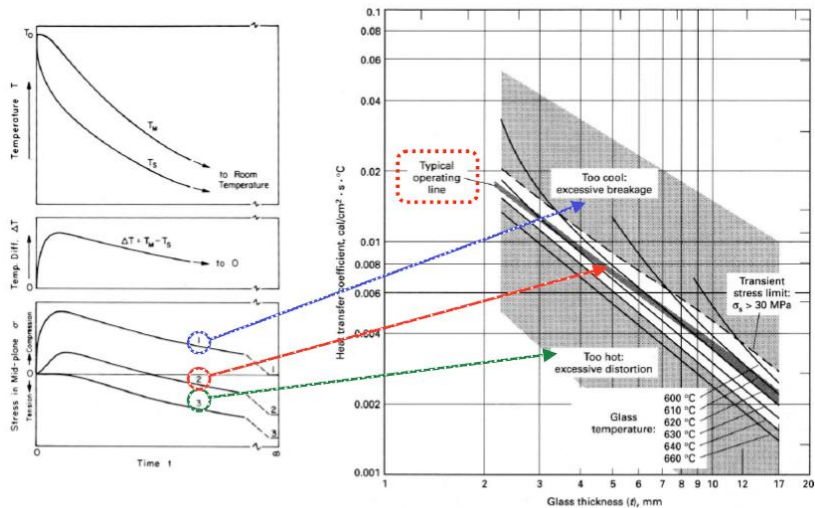


Fig.2.16 – Condizioni di tempra

2.3.2.3 Problematiche

In corrispondenza delle sezioni 2 e 3, si presentano le difficoltà fisiche maggiori nella buona riuscita del trattamento. La viscosità del vetro diminuisce molto rapidamente e il pannello di vetro tende a subire deformazioni in sede di movimentazione. Questo problema può divenire ancora più grave in presenza di pannelli sottili, ossia con spessore inferiore a 3,0 mm.

In Fig.2.17 viene evidenziata la diminuzione di viscosità in scala logaritmica di ben tre punti nell'intervallo di temperatura compresa tra 600 e 660°C.

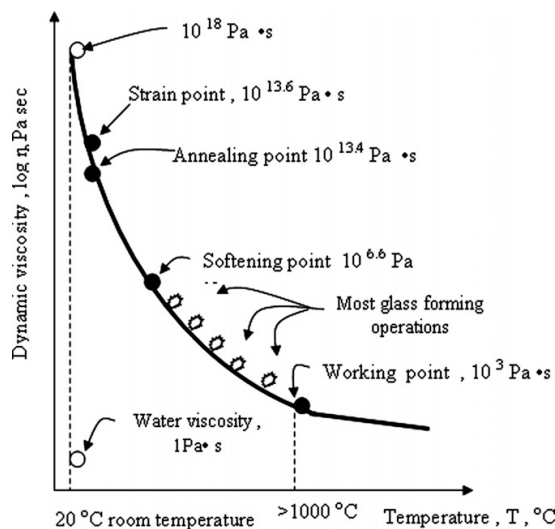


Fig.2.17 – Viscosità in funzione della temperatura

Proprio questa flessione vertiginosa costituisce un serio problema in sede di lavorazione, dal momento che il vetro deve essere trasportato dalla zona di riscaldamento a quella di raffreddamento in maniera tale da evitare l'insorgere di difetti ottici.

2.3.2.4 Tempra per mezzo di onde radio

Nel caso di vetri con un spessore inferiore a 3,0 mm la tempra tradizionale risulta inadeguata, allora si cerca di ricorrere a un nuovo procedimento innovativo che per mezzo di onde radio permette di temprare pannelli di spessore sottile.

Tale processo si compone delle seguenti fasi:

sezione 1: il vetro viene preriscaldato in forno tradizionale fino al suo punto di rammollimento.

sezione 2: processo di formatura del vetro; viene portato a una temperatura al di sotto della soglia di rammollimento circa 650°C sufficientemente flessibile da consentire la sagomatura, ma al contempo sufficientemente rigido da resistere alla deformazione provocate dalle normali procedure di movimentazione.

sezione 3: fase di riscaldamento del vetro fino alla temperatura di 660°C mediante l'energia delle onde radio. In linea di massima l'energia viene applicata a una frequenza di circa 20 MHz.

sezione 4: il vetro viene raffreddato rapidamente con corrente di aria forzata sulla superficie del vetro.

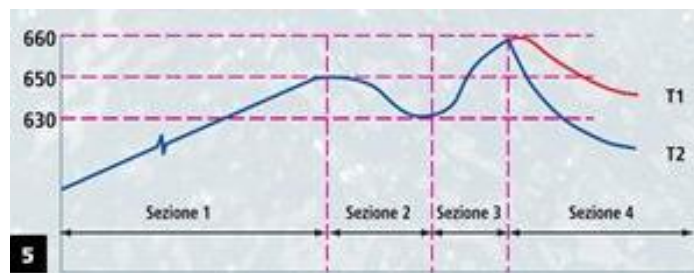


Fig.2.18 – Temperatura del vetro nel processo di tempra a onde radio

La configurazione tipica degli elettrodi all'interno della camera a onde radio comprende di due fasci di elettrodi, uno positivo e uno negativo disposti trasversalmente accanto al vetro per garantire la massima esposizione al campo delle onde radio. Sopra e sotto il vetro sono presenti delle ventole che raffreddano il vetro una volta raggiunta la temperatura necessaria. I tempi vengono regolati con una precisione nell'ordine di frazione di secondo. Il vetro poggia su rulli e anelli realizzati appositamente in materiale ceramico che permettono la libera circolazione dell'aria.

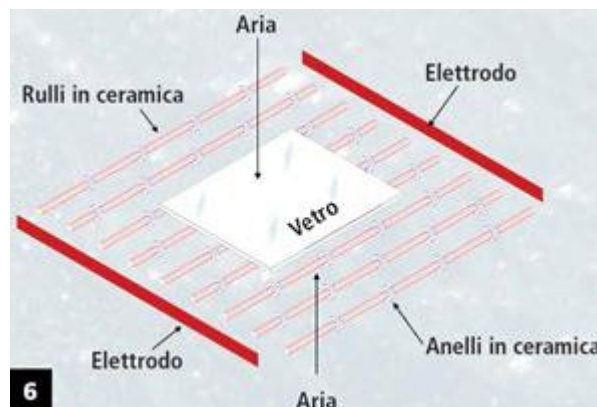


Fig.2.19 – Gli elettrodi di piegatura sono disposti lungo il pannello di vetro, il più vicino possibile ai margini

I rulli sono disposti ad arco, in modo da rappresentare il raggio a cui deve aderire il vetro formato e temprato. Il vetro proveniente dalla sezione di preriscaldamento (630°C) raggiunge la rulliera che per mezzo delle onde radio viene portato a 660°C e a tale temperatura, il vetro inizia a incurvarsi seguendo l'arco formato dai rulli, dopo di che viene raffreddato.

Il vetro tende a incurvarsi quasi immediatamente quando raggiunge la temperatura di rammollimento, a differenza dei metodi tradizionali. Esso si spiega attraverso la variazione di viscosità che segue parallelamente l'aumento di temperatura, anche quando il riscaldamento avviene rapidamente.

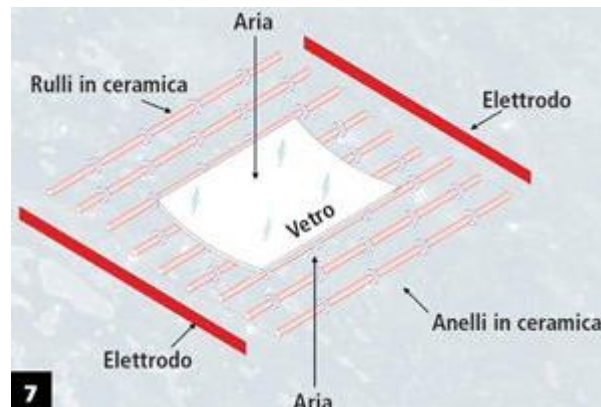


Fig.2.20- Note sugli assi dei rulli

Anche questi pannelli non sono esenti da problemi, dal momento che viene applicato un elevato gradiente di tempra lungo il pannello durante il trasferimento dalla camera di preriscaldamento a quella di raffreddamento. La temperatura dell'estremità anteriore, cala rapidamente prima che l'estremità posteriore sia fuoriuscita dal forno di preriscaldamento.

Una delle tecniche per ovviare a questo problema oltre quella di innalzare la temperatura che può causare deformazione della superficie, è quella di modificare la disposizione degli elettrodi. Variando la distanza degli elettrodi, varia anche l'intensità del campo delle onde radio applicata al vetro, allora vengono posizionate in modo da riscaldare selettivamente la parte anteriore di vetro più rapidamente della parte posteriore. Di conseguenza la parte anteriore riceve più energia e la sua temperatura si avvicina maggiormente a quella della parte posteriore.

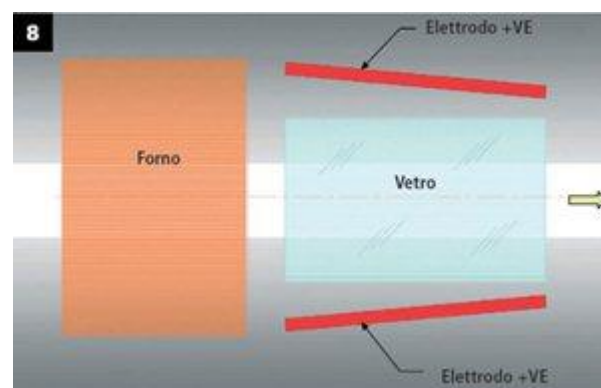


Fig.2.21 – Gli elettrodi di piegatura si trovano più vicini al margine anteriore, al fine di apportare maggior calore in quest'area

In conclusione, ricorrendo a sistemi adeguati per esporre il vetro preriscaldato a un'elevata densità di flusso di energia di onde radio, è possibile temprare pannelli di vetro molto sottili inferiori ai 2 mm a differenza dei sistemi tradizionali.

2.3.3 TEMPRA CHIMICA

La tempra chimica è un processo di tempra alternativa a quella termica. Consiste in una compressione dello strato superficiale di vetro, mediante scambio ionico tra gli ioni del sodio della superficie del vetro con quelli di potassio, attraverso l'immersione del vetro in un bagno di nitrato di potassio. Il maggiore raggio ionico porta ad una dilatazione della parte superficiale del pezzo, contrastata dalla parte interna, di conseguenza la parte esterna viene posta in compressione e quella interna in trazione.



Fig.2.22 – Processo di scambio ionico

2.3.3.1 Tempra chimica a singolo scambio ionico

Il rinforzo del vetro mediante processi chimici può avvenire mediante diversi metodi:

Scambio ionico a $T > T_g$: consiste nella creazione di uno stato superficiale con coefficiente di dilatazione inferiore. Questo può essere ottenuto mediante scambio ionico per immersione del componente in un bagno di sale allo stato fuso o favorendo la cristallizzazione superficiale per riscaldamento controllato della superficie del componente. Tali processi sono scarsamente utilizzati, poiché con il processo a scambio ionico si verificano possibili distorsioni e anche perdite della forma, mentre con la cristallizzazione superficiale si ha perdita della trasparenza.

Scambio ionico a $T < T_g$: questo processo chimico viene definito tempra chimica. Il pezzo da temprare contiene uno ione A immerso in un bagno di sale fuso contenente uno ione B più grande. Lo scambio ionico portano alla nascita di uno stato di compressione nello strato superficiale.

Il processo diffusivo è in funzione della temperatura, dalla durata e dalla contrazione degli ioni coinvolti nello scambio. La profondità di penetrazione degli ioni non dipende dalle dimensioni dell'oggetto, perché la concentrazione dello ione scambiato varia con il tempo, ripercuotendosi sul profilo dello sforzo di compressione superficiale. Lo sforzo massimo di compressione ottenibile dipende dalla differenza tra i raggi degli ioni coinvolti nello scambio.

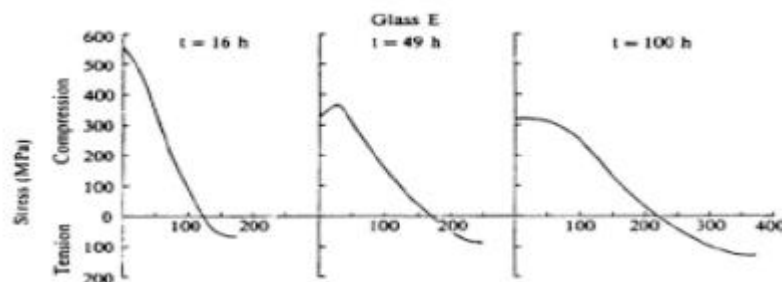


Fig.2.23 – Profili di sollecitazione al variare del tempo di trattamento

Il processo di tempra chimica consiste nell'immersione degli oggetti in una vasca in acciaio inox contenente il sale fuso o KNO_3 nel caso di vetri sodico-calcico, al termine tutto viene raffreddato e pulito con acqua. I parametri di processo possono variare a seconda del tipo di vetro e delle specifiche di tempra richieste, ricordando che non sono temprabili vetri rivestiti e vetri con composizione chimica diversa dai tipi di vetro tradizionale.

Dai risultati condotti su numerosi campioni in vetro di differenti tipi si è dimostrato che in realtà non ha senso fare trattamenti sostanzialmente lunghi in quanto la resistenza non cresce più dopo un certo valore.

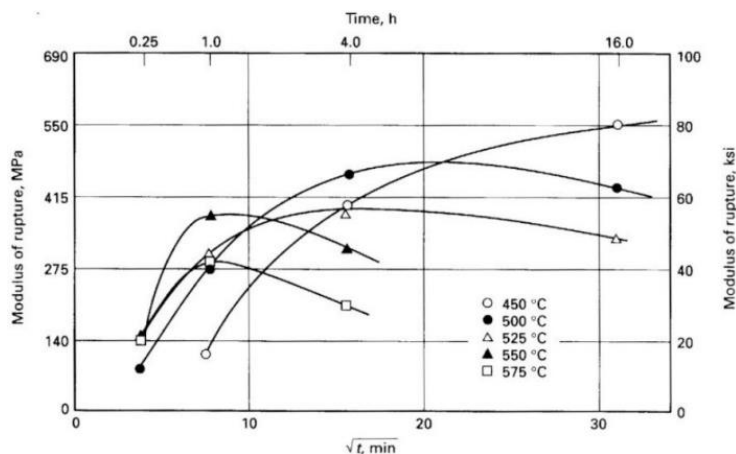


Fig.2.24 – Tempra chimica su un vetro alluminosilicato

Sempre dall'analisi del comportamento si può notare che per un vetro temprato lo sforzo di compressione superficiale varia in genere tra 100 e 500 MPa. Come ricordato precedentemente lo sforzo di trazione è basso nel cuore del pezzo, comportando al momento della rottura frammenti grossolani.

La resistenza all'urto è circa 2 volte superiore rispetto a un vetro temprato e arriva fino a 5 volte tanto rispetto a un vetro normale.

Un'altra peculiarità di questo trattamento è quella di non presentare distorsioni ottiche a differenza degli altri trattamenti.

2.3.3.2 Tempra chimica a doppio scambio ionico (profilo ESP)

Per migliorare l'affidabilità del vetro, sono stati studiati nuovi profili di sollecitazione al fine di programmare la frattura. I profili di stress sono prodotti da molti anni sui vetri attraverso processi termici e chimici ma solo recentemente si è cercato di produrre profili di tensione in grado di ottenere comportamenti desiderati che resistano a condizioni di sforzo specifiche. Agli inizi degli anni novanta due ricercatori hanno proposto un nuovo approccio teorico che prevedeva di controllare la variabilità di resistenza di un vetro temprato termicamente e chimicamente attraverso un controllo dei profili di tensione, producendo la massima sollecitazione a compressione sotto la superficie, invece che in superficie, arrestando così la propagazione della cricca.

Un metodo utilizzato per ottenere il profilo di sollecitazione desiderato è l'utilizzo del doppio scambio ionico che permette appunto di ottenere un'elevata sollecitazione compressionale appena sotto la superficie. Il materiale presenta un comportamento insolito proprio per via della sua fragilità in quanto la frattura è multipla cioè vengono generate delle crepe prima che avvenga una rottura catastrofica. Questo comportamento chiamato "sail safe" fa sì che si abbia un allarme visivo, perché le cricche possono essere viste accrescersi sulla superficie del vetro e quindi arrestate. Esse riprenderanno a propagarsi solo successivamente in presenza di un carico maggiore.

Il processo diffusivo si compone di due fasi. Nella prima fase, gli ioni di potassio si scambiano con gli ioni di sodio del vetro attraverso un bagno di sali fusi, analogo al processo della tempra a singolo scambio ionico. Nella seconda fase, alcuni degli ioni di potassio introdotti vengono rimossi dalla superficie attraverso uno scambio con gli ioni di sodio.

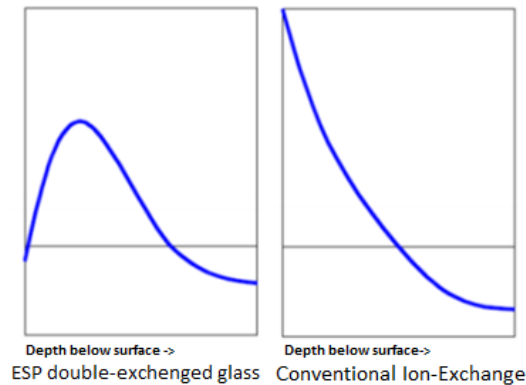


Fig.2.25 – Confronto profili di tensione tra tempra chimica convenzionale e ESP

Le due fasi di scambio ionico garantiscono un'ampia flessibilità in termini di ingegnerizzazione del profilo di sollecitazione, dimostrando una serie di effetti benefici e ottimizzazione in termini di robustezza, affidabilità e di comportamento a frattura. La probabilità di sopravvivere o no ad un dato carico aumenta in modo significativo assieme al modulo di Weibull, che in questo caso presenta valori molto elevati dell'ordine $m=60$, garantendo un'ottima affidabilità e resistenze di 4-5 volte superiori di un vetro normale. Come avviene nel caso della tempra a singolo scambio ionico anche in questo caso la frattura comporta la frammentazione in piccoli pezzi, meno letali delle schegge di grandi dimensioni prodotte da un vetro normale.

Le ricerche sono state focalizzate per la maggior parte sulla creazione di profili ESP in vetri soda-alluminosilicato, che avendo un tasso di diffusione più elevato per gli ioni alcalini offrono un più rapido e profondo scambio. Purtroppo questi vetri sono limitati all'utilizzo per applicazioni speciali in quanto costosi.

Solo attraverso tecniche particolari come l'impiantazione ionica o scambio ionico assistito si deve ricorrere nei vetri SLS a causa dei bassi coefficienti di diffusione degli ioni e la loro difficoltà nell'intercambiabilità nel bagno di sali fusi. Va tenuta in considerazione l'effetto di carico valutando la corretta intensità e velocità di applicazione del carico. Inoltre le superfici contengono numerosi difetti e il loro effetto sul comportamento del vetro e l'interazione con il campo di tensione residua dovrà essere attentamente studiato.

Lo sviluppo di un processo ESP largamente utilizzato per vetri SLS, consentirebbe l'ingresso nei grandi mercati a basso costo.

In generale la ricerca sui profili ESP non si può dire ancora conclusa perché ulteriori studi sono necessari al fine di comprendere meglio la relazione tra tempo di scambio ionico, composizione del bagno e temperatura.

L'impiego dei vetri ESP come per gli altri processi di tempra è molto richiesta in diversi campi a partire da quello automotive a quello architettonico, ma l'assenza della variabilità tipica del vetro comune offrirà opportunità di progettazione uniche in numerose applicazioni.

2.3.4 TEMPRA TERMICA VS TEMPRA CHIMICA

Per cogliere le differenze tra un vetro temprato chimicamente e uno termicamente temprato non c'è miglior modo che confrontare il profilo di tensione lungo l'intero spessore del vetro temprato. Lo strato superficiale in compressione in una tempra chimica ha in genere uno spessore attorno al 20% di quello dell'intera lastra.

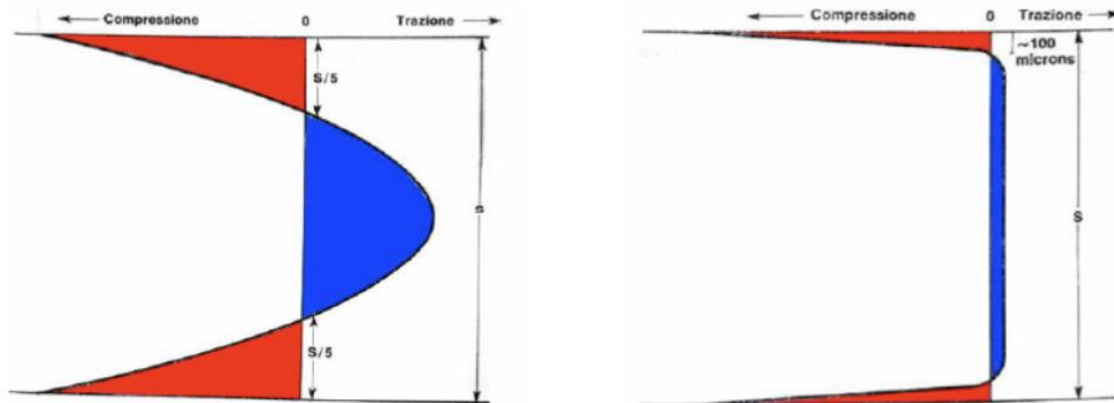


Fig.2.26 – Profilo di tensione lungo lo spessore di un vetro temprato termicamente e chimicamente

Vantaggi rispetto alla tempra termica sono:

- Non richiede temperature elevate
- Assenza di distorsione della lastra
- Applicabile a oggetti di forma complessa
- Resistenza ai carichi concentrati e all'abrasione

Svantaggi rispetto alla tempra chimica sono:

- Trazione all'interno è modesta
- Limitatezza dello spessore interessato
- Non adeguati all'impiego di vetri di sicurezza per via della frammentazione grossolana
- Condizionata dai tempi di diffusione

2.4 FORMATURA DEI VETRI NELL'INDUSTRIA AUTOMOBILISTICA

La procedura di formatura dei vetri per automobili è un processo complesso che prevede la piegatura dei vari strati di vetro che compongono lo stratificato seguito da eventuali processi di tempra e infine l'assemblaggio con l'intercalare polimerico.

La formazione del parabrezza si compone delle seguenti fasi:

- 1) Miscelazione delle materie prime. Il vetro per parabrezza contiene di solito ossidi quali K_2O , MgO e Al_2O_3 .
- 2) Formatura del vetro piano per mezzo del processo di vetro float.
- 3) Il vetro viene trasportato per mezzo dei rulli nel forno di ricottura e poi lasciato raffreddare. Ora è molto duro e forte ed è pronto per essere tagliato.
- 4) Il vetro viene tagliato nelle dimensioni volute. Questo processo è di solito automatizzato ed è controllato da telecamere e sistemi di misura optoelettronici. Successivamente il pezzo tagliato deve essere piegato. La lastra di vetro riscaldata viene inserita in una forma o in uno stampo di metallo (o refrattario).
- 5) Dopo la fase di formatura, il vetro deve essere indurito in una fase di tempra.
- 6) Dopo che il vetro è temprato e pulito, passa attraverso un processo di laminazione dove l'intercalare viene posto tra due lastre di vetro. Diventa trasparente solo al termine del processo di laminazione che consiste nella rimozione delle sacche d'aria intrappolate nello stratificato. La laminazione avviene all'interno di un'autoclave, attraverso un processo meccanico e termico per completare il legame tra i vari strati.
- 7) L'assemblaggio del parabrezza avviene prima per mezzo della formazione in uno stampo della cornice in plastica e successivamente attraverso il poliuretano, legato alla carrozzeria dell'automobile.

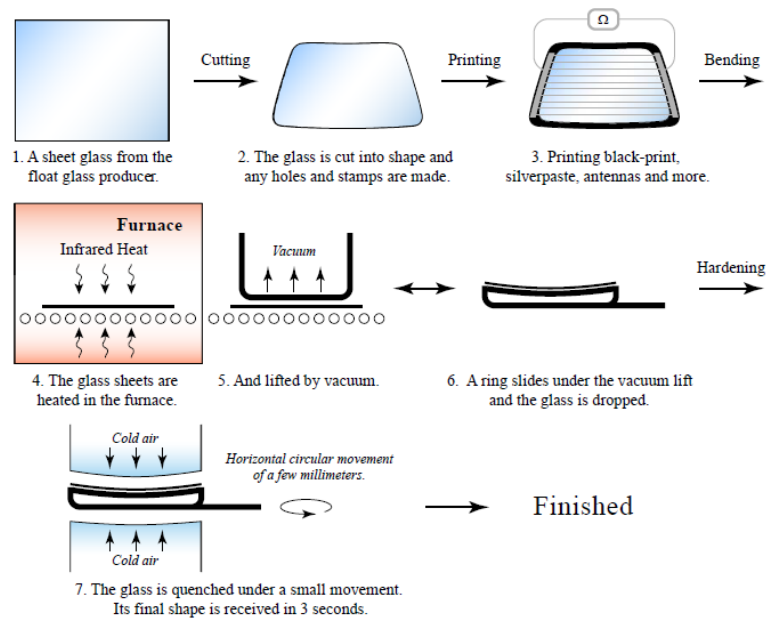


Fig.2.27 – Una variante del processo di tempratura

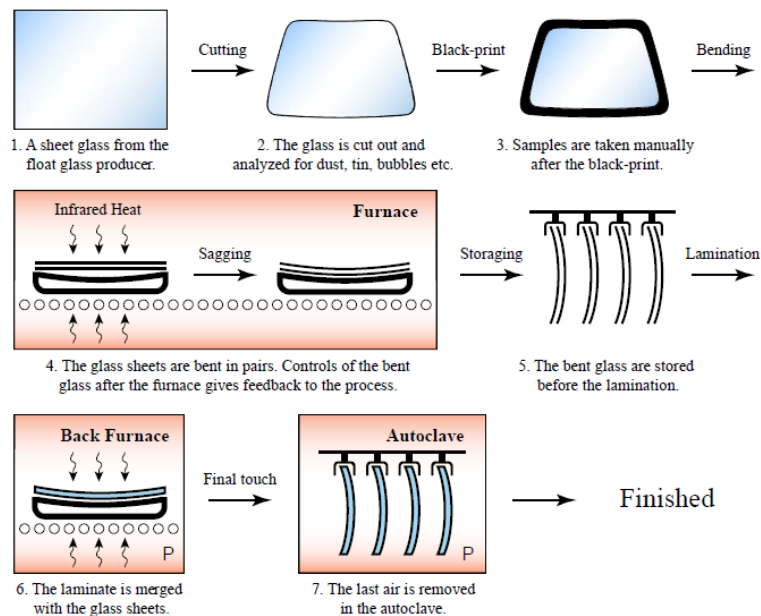


Fig.2.28 – Una variante del processo di laminazione

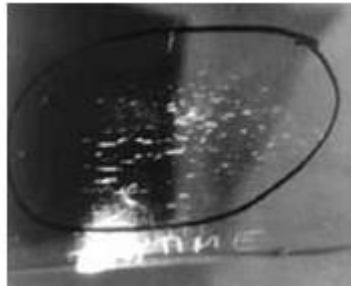
L'ottenimento di un idoneo parabrezza non può però fermarsi solo nel rispetto delle sequenze delle fasi, ma necessita di un controllo qualità lungo l'intero processo. Esso rappresenta una fase fondamentale e comprende il controllo della qualità delle materie prime e il controllo di variabili di processo come la temperatura di fusione, l'atmosfera del forno e altre ancora. Dispositivi automatici come le cellule fotoelettriche sono utilizzate per la verifica di eventuali difetti. Altri processi sono stati sviluppati per misurare le dimensioni e il raggio di curvatura dopo che il parabrezza è stato formato. La formatura di componenti vetriari nel settore automotive può essere ottenuta principalmente secondo due tipologie di processo:

- Formazione a caldo per via gravimetrica
- Stampaggio a caldo

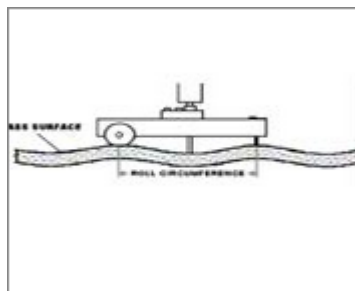
Al fine di soddisfare le sempre più stringenti tolleranze produttive e le complessità di forma dei nuovi prodotti, in entrambe le tipologie di processo, è richiesta un'accurata conoscenza delle problematiche termotecniche. In tale contesto, assumono sempre

maggior rilevanza le tecniche numeriche di simulazione che costituiscono per rapidità, capacità di previsione ed economicità, una valida alternativa alle tradizionali indagini. Le variabili che influenzano l'ottenimento di un idoneo parabrezza sono legati alla deformazione. Questa fase condiziona la qualità del componente sia in termini di proprietà ottiche che geometriche, ad esempio nel processo di formatura dei vetri laterali, lo stampo conferisce la forma desiderata al vetro e il problema in questo caso coinvolge principalmente la deformazione dello stampo. Infatti, quando soprattutto le dimensioni dello stampo sono rilevanti ed elevati sono i gradienti termici a cui è sottoposto, porta talvolta il prodotto al di fuori delle specifiche dimensionali ed ottiche. Ulteriori problematiche incontrabili lungo la realizzazione del parabrezza possono essere riassunte di seguito:

- *Distorsione ottica*: il vetro può contenere lievi onde superficiali causate dal contatto con i rulli. Queste ondulazioni possono essere notate visivamente dal riflesso. Quindi è di fondamentale importanza minimizzare le distorsioni garantendo un perfetto parallelismo tra rullo e superficie del vetro.
- *Segni dei rulli*: questi provocano dei segni di tonalità biancastra lungo la direzione di movimento del vetro. La ragione risiede nella scarsa manutenzione e pulizia del forno e dei rulli, dove piccoli frammenti rimangono attaccati alla superficie dei rulli a seguito di precedenti rotture di vetri.



- *Ondulazione e flessione*: poiché il vetro temprato è riscaldato e immediatamente seguito da un brusco raffreddamento possono sorgere dei stress residui dovuti ad una differente gradazione termica lungo l'intero pezzo.



- *Qualità del bordo*: nonostante i bordi di un vetro temprato siano molto più resistenti rispetto a un vetro ricotto, rappresentano ugualmente un punto debole. La qualità del bordo è un nodo cruciale nell'evitare rotture. Le operazioni di riscaldamento, raffreddamento e principalmente di rettifica da parte degli operatori sono fondamentali.

Nella realizzazione dei vetri per i veicoli, sono stati sviluppati stampi di nuova concezione dalle forme complesse per i finestrini laterali. Per la produzione in scala dei finestrini si ricorre al metodo di iniezione, riducendo l'umidità e la delaminazione. La corretta realizzazione del vetro laterale attraverso l'iniezione comporta uno studio sul comportamento del flusso, del tempo di riempimento e nell'impedire formazioni di vuoti che causerebbero distorsione ottiche del laminato.



Fig.2.29 – Processo di iniezione nella forma

La Fig.2.29 mostra la procedura di iniezione nella forma. I componenti esterni servono a vincolare i strati di vetro. I due o-ring interni sono per il corretto serraggio del vetro nello stampo e impedire la fuoriuscita del materiale iniettato. Le due metà vengono serrate insieme e il materiale viene iniettato da un angolo e ventilato da un altro.

Ulteriori sforzi sono stati compiuti per correlare la modellazione ai risultati sperimentali ottenuti da test e da simulazione software.

I nuovi strati di vetro multistrato leggeri sono fabbricati utilizzando 2,3 mm di spessore, rispetto ai spessori convenzionali che si trovano nell'industria automobilistica compresi tra 2,4 e 2,6 mm.

2.4.1 FORMAZIONE A CALDO PER VIA GRAVIMETRICA

La formazione a caldo per via gravimetrica viene utilizzata sia per vetri stratificati, sia su vetri temprati. La lastra di vetro (laminata o temprata), viene posta su uno stampo, dove poggia attraverso i suoi bordi. Lo stampo è usato per impartire la voluta forma al vetro, il quale si incurva sotto il proprio peso. Tale incurvatura richiede che la lastra venga riscaldata ad una temperatura di circa 620-650 gradi Celsius, che è leggermente superiore alla temperatura di transizione vetrosa.

Alcuni vantaggi della formazione per via gravimetrica sono l'utilizzo di semplici utensili e la buona qualità ottica a basso costo. I svantaggi sono la capacità di non controllare la forma all'abbassamento e la non riuscita di uno stretto raggio. Questo processo è utilizzato per la realizzazione dei parabrezza.

2.4.2 STAMPAGGIO A CALDO

Questo processo di formatura viene utilizzato per ottenere un maggiore controllo della forma finale da ottenere. Può essere usato sia per forme semplici, così per forme complesse. Il vetro viene semplicemente riscaldato e pressato tra un stampo maschio e uno femmina. A differenza della formazione per via gravimetrica, nel vetro stratificato la piegatura avviene strato per strato.

La capacità di impartire al vetro un raggio stretto, ottenere angoli particolari sulla forma, sono i vantaggi dello stampaggio, che è un metodo migliore per controllare con maggiore efficacia la piegatura. Il principale svantaggio sono i relativi alti costi di manutenzione e investimenti per queste apparecchiature.

2.4.3 COMPUTER AIDED DESIGN (CAD) E FINITE ELEMENT METHOD (FEM)

Per computer Aided Design (CAD) si intendono programmi come Catia, Solid Works, ProEngineer e altri software utilizzati nello sviluppo di prodotti in quasi tutti i settori industriali. Quindi anche nella progettazione di vetri per auto il computer è un ottimo aiuto.

Di solito i disegni sono realizzati attraverso il CAD e con l'implementazione di programmi agli elementi finiti in grado di creare un progetto fattibile ancora prima di essere realizzato. Prevedere come il vetro agirà sul processo di piegatura, prevedere come appariranno le distorsioni ottiche in un vetro automobilistico è molto difficile. Il metodo agli elementi finiti (FEM) basato su algoritmi numerici è stato sviluppato per simulare la trasmissione della luce e la riflessione per prevenire le distorsioni ottiche. Questo metodo viene utilizzato per analizzare e per definire le condizioni e i relativi parametri di processo ottimali, dalla sagomatura alla temperatura. Usando questo metodo ancora prima della produzione si ha il notevole vantaggio di ridurre i tempi di sviluppo e il costo.

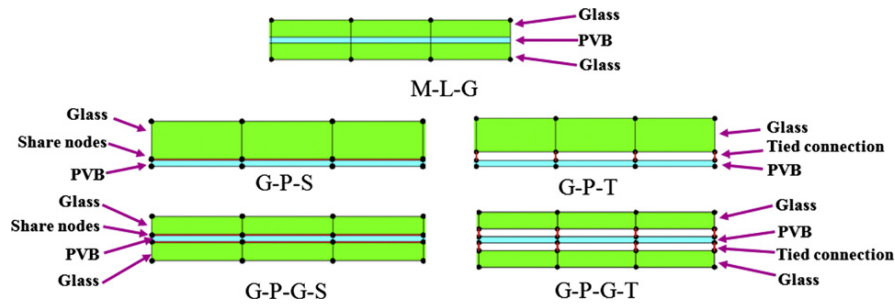


Fig.2.30 – Cinque modelli di studio di simulazione applicati ad un parabrezza laminato.

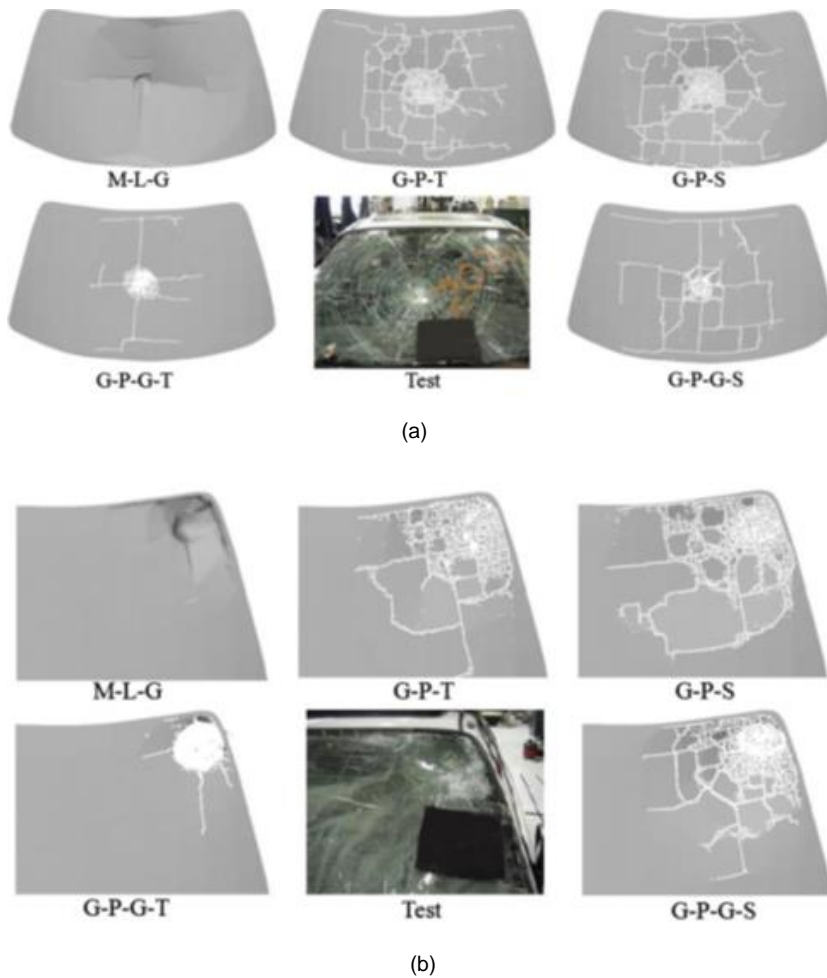


Fig.2.31- Confronto della frattura di un parabrezza per differenti modelli di simulazione (5mm mesh), in posizione centrale (a) e in posizione angolare (b), includendo il risultato sperimentale

CAPITOLO 3: RIVESTIMENTI E DISPOSITIVI

3.1 PUNTI CHIAVE DEI RIVESTIMENTI

Un grande sforzo è stato dedicato al miglioramento delle prestazioni delle finestrature delle automobili, permettendo l'implementazione di dispositivi multifunzionali mirati alla protezione contro la pioggia, il vento e i carichi termici. Le tecnologie di rivestimento e di superficie sono quelle di maggiore rilievo, proprio funzioni come quella di confort, sicurezza, controllo solare, sbrinamento, antiriflesso sono realizzate con rivestimenti funzionali, i quali sono depositati utilizzando le più avanzate tecnologie a film sottile.

Ci sono 4 fattori che disturbano la visione del conducente e che possono arrecare gravi problemi:

- riflessione della luce tra le gocce d'acqua durante la pioggia
- riflessione della luce sul cruscotto
- riflessione della luce sugli specchietti
- surriscaldamento termico a causa del carico solare

Questi fattori negativi possono essere ridotti con l'utilizzo di adeguati rivestimenti.

Per film sottile si intende uno strato di materiale avente spessore che può variare dalle decine di nanometri a qualche micrometro, il quale viene ottenuto, tramite un processo di deposizione su di una superficie, detta substrato.

I film vanno spesso a modificare e migliorare le caratteristiche e le prestazioni del materiale costituente il substrato sul quale vengono depositati. Inoltre presentano proprietà uniche, differenti da quelle dello stesso materiale nella sua forma massiva.

I fattori che influenzano la crescita e le proprietà del film sono:

- condizione della superficie del substrato (morfologia e composizione chimica)
- caratteristiche del processo di deposizione (angolo di incidenza e temperatura)
- reazioni e processi post-deposizione (reazione del film con l'ambiente)

Le nuove frontiere dei rivestimenti stanno studiando la deposizione di rivestimenti funzionali sul lato esterno con funzioni nuove, contro la condensa e la formazione di acqua e ghiaccio, permettendo una minor spesa di riscaldamento.

Un aspetto importante dei rivestimenti è rappresentato dalla loro durata che in molti casi rappresenta un limite. È frequente che le proprietà ottiche variano in maniera imprevedibile e irreversibile, in base alle condizioni atmosferiche, come la temperatura e l'umidità. Per superare questi problemi, recenti sviluppi hanno introdotto nuovi rivestimenti e nuovi processi tecnologici di rivestimento portando eccellenti caratteristiche come la resistenza ai graffi, alla temperatura e allungandone la durata. In fase di studio c'è l'utilizzo di nanocompositi inorganico-organici per le buone proprietà di adesione e resistenza ai graffi. La resistenza all'abrasione è stata aumentata del 16% dopo 1000 cicli di prova Taber-Abraser.

Questi materiali utilizzati sono applicabili sia come rivestimenti interni e sia come rivestimenti esterni del parabrezza, per quest'ultimi è consentito un aumento dell'appannamento in misura massima del 2% dopo 1000 cicli Taber-Abraser.

I rivestimenti si distinguono in base alle modalità di applicazione e in base allo spessore.

I rivestimenti sono applicabili come morbidi o duri (la distinzione si basa secondo la scala Mohs). I rivestimenti morbidi sono sulla base di pellicole metalliche sottili incorporate in strati dielettrici per ragioni ottiche. Questi film morbidi e sensibili devono essere protetti e pertanto, essi sono integrati in vetrate laminate.

I rivestimenti duri d'altra parte sono costituiti da più resistenti materiali metallici e ceramici o in film più spessi, essi resistono a usura meccanica e, in una certa misura, anche da attacco corrosivo, e possono essere applicati all'interno e all'esterno delle finestrature.

Si parla invece di tecnologia a film spesso per film di spessori superiori a 10 μm e di tecnologia a film sottile per spessori compresi tra 0,1 nm e 10 μm .

Le tecniche di rivestimento vengono valutate sotto vari aspetti, dalle proprietà, alla durata e infine il costo. Tra i principali requisiti ci sono:

- Protezione dalla radiazione solare UV e IR
- Ridurre il bagliore degli specchietti
- Funzioni di display
- Controllo della bagnabilità del vetro superficiale

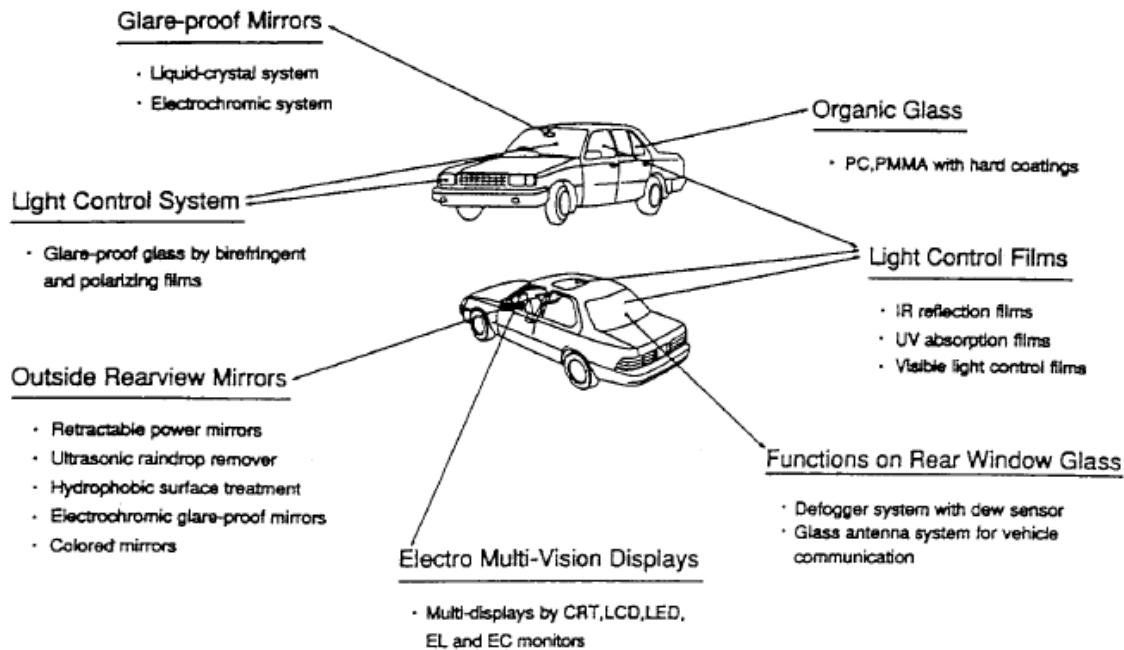


Fig.3.1 – Applicazione di rivestimenti di film sottili nelle automobili

3.2 TECNICHE DI DEPOSIZIONE

I rivestimenti di un determinato substrato di vetro, possono essere realizzati utilizzando una grande varietà di tecnologie di rivestimenti. Parecchie di queste hanno trovato un'applicazione nei processi di produzione commerciale, mentre altre sono ancora allo stadio di sperimentazione.

La scelta della tecnica di deposizione da utilizzare è influenzata da diversi fattori, come:

- materiale da depositare e le sue caratteristiche chimiche e fisiche
- materiale costituente il substrato e i suoi limiti
- caratteristiche del film che si desidera ottenere
- velocità di deposizione chimica
- la capacità di formare pellicole con spessore uniforme su grandi aree e di variare con precisione lo spessore dei film
- la capacità di produrre il prodotto finale a tassi che lo rendono economico
- Rispetto dell'ambiente

Ciò che ne consegue è il numero limitato di tecnologie usufruibili. Per realizzare i film sottili esistono varie tecniche, le quali sono state sviluppate e migliorate negli anni. Molte delle tecniche per ottenere i film si basano su processi di deposizione che hanno luogo partendo da materiale in fase solida, liquida oppure gassosa e avvengono principalmente con evaporazione sotto vuoto.

La maggior parte delle aziende si avvale ad oggi, dei seguenti processi:

- Deposizione fisica da vapore (Physical Vapor Deposition, PVB)

- Deposizione chimica da vapore (Chemical vapour deposition, CVD)
- Sputtering
- Metodo Sol-Gel e le tecniche di rivestimento ad esso collegate

Le tecnologie che utilizzano il plasma in vuoto, permettono di realizzare rivestimenti e trattamenti funzionali ad alte prestazioni come l'elevata durezza, la resistenza all'usura e funzioni idrofobiche. Le tecniche sono altamente riproducibili, affidabili per processi industriali, ecocompatibili e a bassa temperatura.

Indipendentemente dalla modalità di preparazione del film sottile (come l'utilizzo del plasma per la deposizione fisica di vapore o chimica) il processo ha tre elementari fasi: trasporto, nucleazione e meccanismo di crescita.

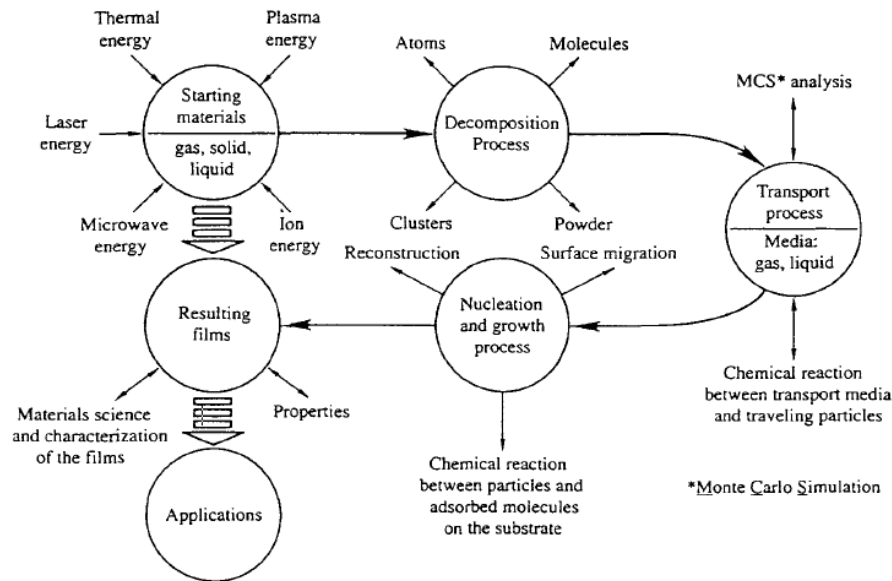


Fig.3.2 – Fasi principali di un processo di deposizione di film sottili

Esistono diversi processi di rivestimento sotto vuoto di deposizione, ma il loro uso è focalizzato principalmente sulle più piccole applicazioni. Il processo di rivestimento al plasma è necessario per mantenere bassi i costi di produzione, ha brevi tempi di processo, un elevato tasso di deposizione e la capacità di deposizione su grande superficie.

Due promettenti processi di rivestimento ancora in fase di studio e sperimentazione per colmare il vuoto sono il sistema plasma array e il sistema di deposizione "plasma enhanced chemical deposition (PECVD)", illustrato nella Fig.3.3.

Il nuovo sistema di rivestimento PECVD a differenza del PVD dove il materiale da depositare è ottenuto per sublimazione di un target solido, nel PECVD il composto necessario per il rivestimento è allo stato di vapore e per la deposizione ad uno stato solido sul substrato viene reso disponibile dall'azione di un plasma. Garantisce elevati tassi di deposizione di materiale organico e inorganico utilizzando una bassa pressione e una bassa energia. Il sistema limita la zona termicamente alterata al substrato. Gas differenti possono essere utilizzati dal sistema, compreso l'idrogeno, ossigeno, argon o azoto. La ricerca sta cercando di ridurre o eliminare le microfessurazioni durante i cicli termici e di ottenere una protezione UV.

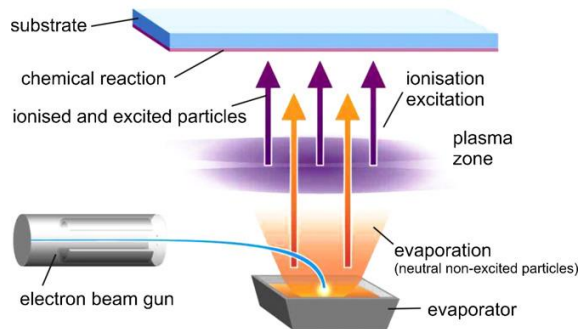


Fig.3.3 – Processo di deposizione PECVD

Il nuovo sistema plasma array svolge il vuoto depositando una dura e trasparente pellicola, utilizzando il quarzo sui PC ed è privo di solventi. Con il rivestimento bagnato (Sol-Gel) è facile incorporare la protezione UV ma a volte è difficile ottenere buone prestazioni di durezza. Per migliorare la durezza si passa dalle resine organiche a basso costo come i silossani ai più costosi rivestimenti contenenti nanoparticelle. Inoltre i rivestimenti umidi implicano solventi che aggiungono costi per la protezione ambientale.

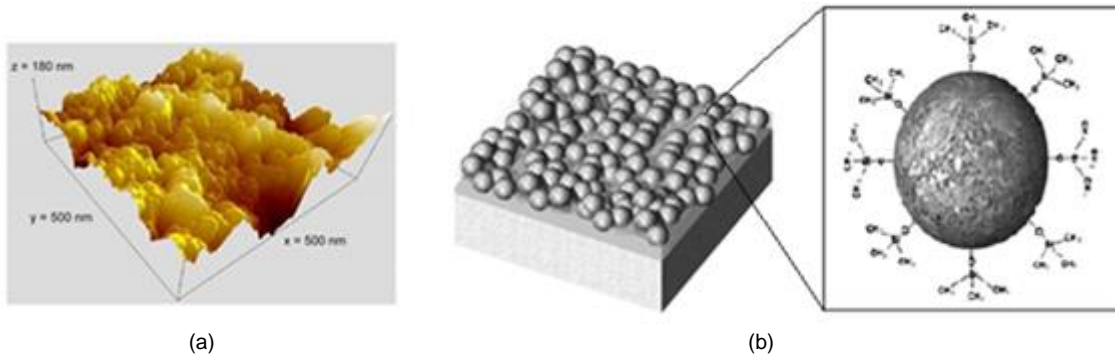


Fig.3.4 – (a) morfologia superficie in scala microscopica di un rivestimento idrofobo e antiriflesso; (b) morfologia superficiale di un rivestimento idrofobo con nanoparticelle

3.2.1 DEPOSIZIONE FISICA DA VAPORE (PVD)

La deposizione fisica da vapore (Physical Vapour Deposition, PVD) è un metodo piuttosto comune a cui si ricorre per la deposizione di film sottili sottovuoto.

I processi di questo tipo sono di deposizione atomica sotto vuoto, cioè la crescita del film avviene atomo per atomo sul substrato, nei quali il materiale viene “evaporato” e attivato da una sorgente e trasportato in forma di vapore attraverso un plasma fino al substrato, dove condensa. Gli ioni, a causa dell’energia cinetica posseduta e dalla differenza di potenziale applicata al pezzo da rivestire, sono attratti sulla superficie dell’oggetto dove condensano formando il rivestimento, combinandosi con un gas di processo.

Il plasma è formato da argon o da altri gas introdotti in ambiente sottovuoto e il processo è controllato attraverso un campo magnetico.

La deposizione fisica da vapore consente la creazione di film caratterizzati da una buona purezza e da una struttura cristallina.

Una delle problematiche principali che si riscontrano con questa tecnica di deposizione consiste nel cosiddetto “step coverage”: esso si basa nella difficoltà di creare film uniformi su superfici caratterizzate da spigoli concavi e/o convessi o comunque da zone non perpendicolari alla direzione di deposizione.

Per risolvere questo problema spesso si ricorre a due accorgimenti:

- Si fa ruotare il substrato per variare l'angolo di incidenza del fascio di particelle;
- Si riscalda il substrato per diminuire l'energia superficiale delle particelle su tutta la superficie.

Combinando diversi materiali, i rivestimenti possono assorbire e riflettere diverse lunghezze d'onda della luce.

A seconda del metodo utilizzato per causare l'evaporazione del materiale che andrà a costituire il film, si possono distinguere diversi sistemi:

- Evaporazione termica
- Evaporazione ad arco
- Cannone elettronico
- Deposizione ad impulsi laser

3.3.3 DEPOSIZIONE CHIMICA DA VAPORE (CVD)

La deposizione chimica da vapore (Chemical Vapour Deposition, CVD) è una tecnica di sintesi (ossia l'esecuzione di una o più reazioni chimiche) che permette di ottenere un deposito di un determinato materiale che viene introdotto sotto forma gassosa e che va a decomporsi sulla superficie di un substrato, il quale viene portato ad una temperatura elevata; il trasporto del materiale, detto precursore, avviene attraverso un gas, che può essere idrogeno, ossigeno, azoto, argon, il quale ha anche la funzione di trascinare via i prodotti della reazione.

Questo tipo di reazione avviene in un ambiente chiamato reattore ed in esso gioca un ruolo fondamentale la temperatura, con la conseguenza che non tutti i rivestimenti possono essere applicati su un qualsiasi substrato. Sulla base del tipo di precursore, delle condizioni di deposizione e delle forme di energia introdotte nel sistema per attivare le reazioni chimiche sono stati sviluppati differenti tipi di reattori.

Con un processo CVD si possono ottenere strati omogenei anche su superfici complesse e caratterizzate da una buona densità ed uniformità, nonché da un elevato grado di purezza. Per contro, questa tecnica necessita di sofisticati apparati di controllo, senza contare la necessità di sviluppare precursori di buona qualità; un altro limite caratterizzante i metodi CVD è rappresentato dagli elevati tempi richiesti a causa delle basse velocità di deposizione, e dalle notevoli temperature che si possono raggiungere, le quali tendono ad alterare le proprietà di certi materiali.

Ciò che differenzia questa tipologia di deposizione da quella di tipo fisico è il fatto che, mentre in quest'ultima il deposito ed il substrato rimangono distinti l'uno dall'altro, nella deposizione chimica il materiale precursore va a diventare parte integrante della nuova molecola che si forma con la reazione; questo aspetto, unito ai fenomeni di diffusione che si verificano all'interno del substrato fa sì che i depositi realizzati presentino un'ottima aderenza. Tra le tipologie di CVD si distinguono:

- Thermal CVD
- Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD)
- Laser Assisted CVD (o Photochemical CVD)

3.2.2 SPUTTERING

La tecnica della polverizzazione catodica (o sputtering in inglese, letteralmente "spruzzamento" in italiano) è un processo per il quale il materiale da depositare viene bombardato con particelle energetiche (ioni) che causano il distacco di atomi o molecole, che successivamente vanno a depositarsi sul substrato. Le particelle "sputterate" arrivano sul substrato con energie molto maggiori di quelle evaporate con i vari metodi precedentemente descritti, e questa circostanza, influisce favorevolmente sulla qualità dello strato depositato.

Le tecniche a spruzzo si possono sostanzialmente dividere in tre categorie:

- Magnetron sputtering
- RF sputtering

- DC sputtering

Le diverse varianti del sistema differiscono per il modo con cui si fornisce energia alle particelle proiettile: accelerando gli ioni con un campo elettrico in continuo si ha la versione base detta sputtering DC; impiegando invece un campo rapidamente variabile si ha il magnetron, di grande interesse per le applicazioni industriali.

I vantaggi di questa tecnica rispetto all' evaporazione sono principalmente:

- migliore aderenza dello strato depositato al substrato
- miglior controllo dello spessore
- migliore sfruttamento del materiale di partenza
- grande versatilità nella scelta dei materiali e dei substrati

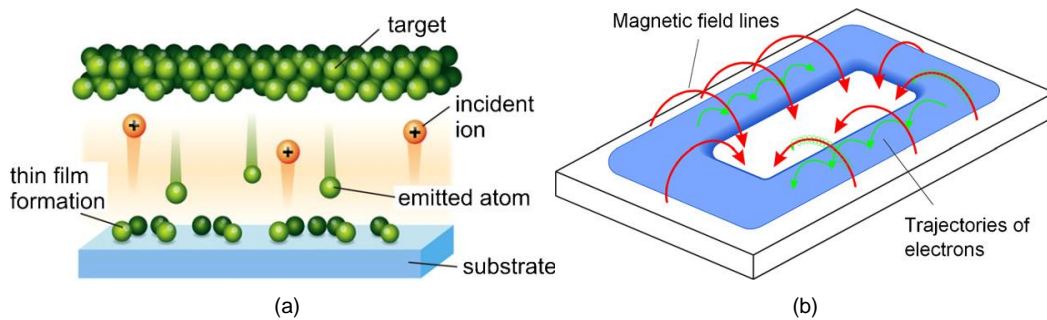


Fig.3.5 – (a) processo di deposizione sputtering in scala atomica; (b) meccanismo di deposizione

Con il magnetron si diminuisce da un lato il riscaldamento del substrato, dall'altro l'intrappolamento degli elettroni nel plasma aumenta di molto la probabilità di ionizzazione del gas di sputtering, con conseguente notevole aumento di velocità di deposizione. Inoltre, a pari velocità di deposizione la pressione del gas di sputtering è molto inferiore al tradizionale sistema DC o RF.

Un'ulteriore alternativa è poi tra il sistema a diodo, con due soli elettrodi e il sistema a triodo, nel quale un filamento supplementare emette elettroni per effetto termoionico allo scopo di sostenere la scarica tra gli elettrodi.

EVAPORAZIONE	SPUTTERING
Generazione delle specie della fase vapore	
Evaporazione termica	Scambio di impulso per bombardamento ionico
Bassa energia cinetica degli atomi evaporati (~ 0.1eV)	Alta energia cinetica degli atomi sputterati (~ 230 eV)
Velocità di evaporazione: bassa per sorgenti Joule, elevata per sorgenti a cannone elettronico	Velocità di sputtering: bassa per sistemi standard, elevata per sistemi magnetron
Frazionamento delle leghe, dissociazione dei composti	Generale buona conservazione della stechiometria del target
Non possibile per alcuni materiali	Target di qualsiasi materiale;
Elevata purezza dei materiali per evaporazione	Purezza dipendente dal materiale
Fase gassosa	
Moto in ambiente di alto vuoto	Moto attraverso regione di scarica a vuoto medio
Velocità degli atomi evaporati ~ 10 ⁵ cm/sec	Velocità degli atomi sputterati ~ 5 · 10 ⁴ cm/sec
Cammino libero medio maggiore della distanza tra sorgente e substrati, assenza di collisioni	Cammino libero medio minore della distanza tra target e substrati, collisioni nella regione di scarica
Condensazione in forma di film sottile	
Gli atomi che condensano hanno bassa energia	Gli atomi che condensano hanno alta energia
Scarsa incorporazione di gas residui	Discreta incorporazione dei gas di sputtering
Scarsa adesione al substrato	Buona adesione al substrato

Tab.3.1 – Confronto tra processo di deposizione ad evaporazione e processo magnetron

3.3.4 SOL-GEL

Oltre a quelli appena visti esiste anche un metodo che prevede la realizzazione del film partendo da un materiale allo stato liquido.

Il processo Sol-Gel costituisce uno dei principali metodi per la fabbricazione di materiali ceramici. Il processo prevede la sintesi di sospensioni colloidali di particelle solide in un liquido (sol), che costituiscono i precursori per la successiva formazione di un gel (un reticolo inorganico continuo contenente una fase liquida interconnessa) attraverso reazioni di idrolisi e condensazione. Post-trattamenti termici di essiccamento e solidificazione vengono generalmente impiegati per eliminare la fase liquida dal gel, promuovere ulteriore condensazione ed incrementare le proprietà meccaniche. Si tratta di un metodo di facile applicazione e possono essere utilizzati substrati di varie forme e dimensioni.

Il sol è costituito da particelle sospese in un liquido aventi diametro convenzionalmente compreso tra 1 nm e 1 μm ; particelle di tali dimensioni non risentono delle forze di natura gravitazionale, ma tendono a muoversi nella fase liquida, a seguito dell'azione di forze di Van der Waals e interazioni elettriche causate dalle cariche superficiali delle particelle.

Il gel è una macromolecola ramificata con pori di dimensione submicrometriche, la cui lunghezza della catena polimerica media è maggiore di 1 μm .

Per precursori si intende le specie inorganiche presenti nel sol diluito prima del processo.

Il processo si realizza in tre passaggi:

- preparazione di soluzioni di adatti precursori
- trasformazione del sol e formazione di un gel
- trattamento termico del sol per ottenere il materiale desiderato

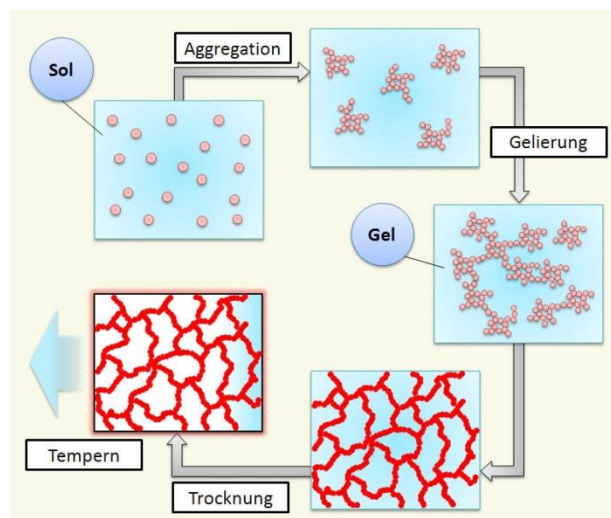


Fig.3.6 – Principio del processo sol-gel, comprendente l'aggregazione, la gelificazione, l'essiccamento e la tempra

Il sol viene tipicamente ottenuto a partire da precursori quali alcossidi di metalli o metalloidi (ad es. alcossisilani), o da sali (ad es. cloruri, nitrati, acetati).

Esistono tre tecniche di deposizione utilizzate con il metodo Sol-Gel ideali per preparare film sottili dal sol prima della gelificazione, questi sono:

- Metodo a spruzzo (spray)
- Per immersione (dipping)
- Per rotazione (spinning)

La microstruttura del film dipende dalla dimensione e dal grado di reticolazione delle specie in soluzione prima della deposizione e dalle relative velocità di condensazione ed evaporazione durante la deposizione. Il controllo di questi parametri permette di ottenere un film con le caratteristiche volute.

Se confrontate con i processi di evaporazione e sputtering, il Sol-Gel richiede minori apparecchiature. Il più importante vantaggio della tecnica Sol-Gel è il controllo ultrafine della microstruttura del film depositato, come il volume dei pori, la loro dimensione e l'area superficiale.

Vantaggi:

- Risparmio energetico in quanto le temperature necessarie sono molto minori
- Possibilità di produzione di ossidi misti, grazie al controllo stechiometrico della composizione e della soluzione di partenza
- L'uso di reattivi sintetici e non minerali garantisce un elevato grado di purezza
- Semplicità delle reazioni coinvolte
- Facilità di deposizione del sol su diversi substrati
- Controllo della porosità del materiale prodotto mediante il controllo del trattamento termico

Svantaggi:

- Elevato costo delle materie prime
- Rischio di formazione di cricche a causa del notevole restringimento del gel durante il processo di essiccamento
- Tempi di processo talvolta lunghi

Il metodo Sol-Gel costituisce oggi una delle tecniche più studiate ed utilizzate per ottenere materiali vetrosi di alta qualità.

3.4 RIVESTIMENTO UV E IR

Nel campo dei rivestimenti il più importante è sicuramente il rivestimento Sun-Control, ovvero la protezione dai raggi UV e IR.

La funzione di assorbimento dei raggi UV e la diminuzione della temperatura all'interno del veicolo comporta i seguenti vantaggi:

- Aumento della protezione dei passeggeri e la diminuzione del deterioramento dei materiali interni.
- Riduzione del carico termico migliorando il confort dei passeggeri. Diminuendo la temperatura interna del veicolo, si riduce l'uso di aria condizionata con conseguente minor consumo di carburante.



La ragione principale di aumento di temperatura all'interno dell'abitacolo è la radiazione rossa e, solo ricorrendo a opportuni rivestimenti basso emissivi aggiunti al vetro normale si ha la capacità di riflettere tale radiazione.

La trasmissione dipende dal tipo di vetro, anche se quasi tutti i vetri stratificati riducono sostanzialmente in buona parte i raggi UV, mentre i vetri laterali o i tettucci sono di solito non stratificati e quindi una quantità significativa di radiazioni ci passa oltre. I passeggeri sono esposti così a una considerevole quantità di radiazioni.

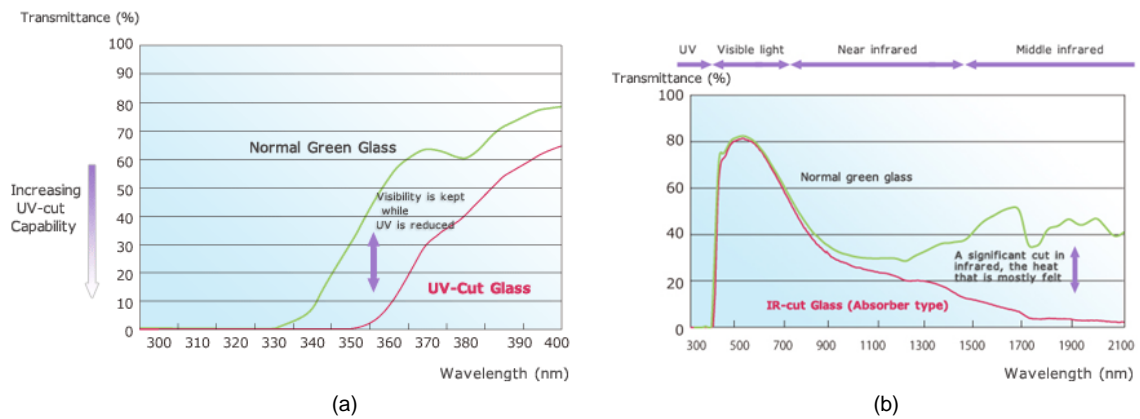


Fig.3.7 – Confronto tra vetri rivestiti e non rivestiti: (a) riduzione dei raggi UV; (b) riduzione dei raggi IR

I rivestimenti possono essere depositati sul vetro prima della piegatura e in caso di vetro stratificato sullo strato polimerico prima della laminazione. Un tipico layout di rivestimento contiene due strati sottili di argento incorporati in strati dielettrici antiriflettenti. Questi rivestimenti presentano oltre il 75% di trasmittanza nel campo dello spettro visibile mentre la parte infrarossa è bloccata.

La protezione dai raggi UV si ottiene mediante la deposizione di strati assorbenti con materiali come il TiO_2 , CeO_2 , ZnO , SnO_2 e MoO_3 applicati con svariati metodi, diminuendo rispetto a un normale vetro stratificato il flusso termico verso l'interno dell'abitacolo, favorendo così una riduzione dell'utilizzo di aria condizionata anche del 40%.

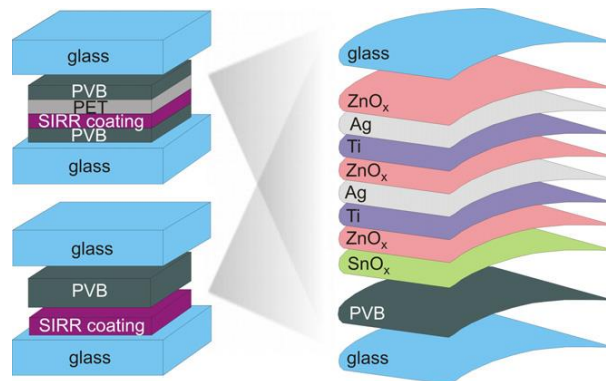


Fig.3.8 – Strategie di rivestimenti per il controllo solare

Per ridurre la riflessione del cruscotto, vengono adoperati film di strati antiriflettenti rivestendo il solo lato interno.

Quando l'emissività viene ridotta, il raffreddamento viene minimizzato tale da impedire la condensazione e la formazione di acqua e quindi evitare la formazione di ghiaccio sul vetro.

I rivestimenti multistrato sono particolarmente efficaci per ridurre l'energia solare, anche se presentano un notevole limite quale la resistenza all'abrasione. Per migliorare tale carenza, i rivestimenti multistrato subiscono un trattamento ad alte temperature e nel caso di un composto formato da sette layers di SiO_2/TiO_2 vengono aggiunte pellicole fine di Al_2O_3 a livello interfacciale. Come risultato di questo filtro multistrato è di formare uno strato resistente, senza portare a una riduzione delle proprietà spettrali come la trasparenza della luce visibile e la riflessione IR, con l'unico inconveniente rappresentato da un aumento dell'appannamento.

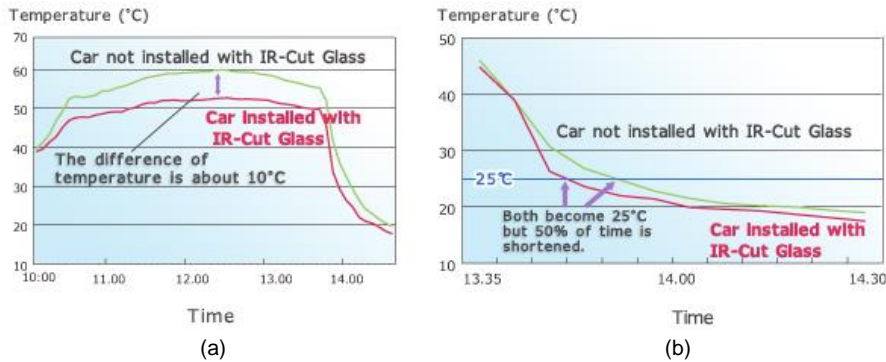


Fig.3.9 – Riduzione di temperatura: (a) sul vetro; (b) all'interno dell'abitacolo

Riassumendo, la resistenza all'abrasione è stata migliorata ricorrendo a tecnologie di deposizione di film sottili, comportando un innalzamento del costo. Per risolvere questo problema si stanno studiando nuove tecnologie quali lo spruzzamento magnetronico di ioni ad alta potenza e la tecnica Sol-Gel per la produzione ad alto rendimento.

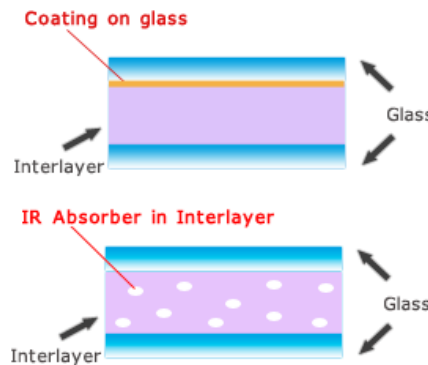


Fig.3.10 – Tipi di tecniche utilizzate per l'assorbimento della radiazione infrarossa

3.5 RIVETIMENTO IDROFOBO

Con il rivestimento idrofobo si indica un rivestimento fluorato idrorepellente applicato al vetro che in caso di pioggia agisce come una superficie cerata, riducendo le dimensioni delle gocce favorendone la loro dispersione, riducendo l'utilizzo dei tergicristalli.

L'indice di idrorepellenza è indicato dall'angolo di contatto della goccia al vetro. Maggiore è l'angolo, maggiore è l'idrorepellenza della superficie. La funzione idrorepellente viene fornita applicando rivestimenti organici sulla superficie del vetro abbassando l'energia superficiale e rendendo la forza coesiva dell'acqua maggiore della forza adesiva.

Ottenere un rivestimento liscio e fino idrofobo con elevate proprietà ottiche e meccaniche non è facile perché gli additivi idrofobi sono morbidi in natura di conseguenza sono causa di una ridotta durezza e durata.

Si è riscontrato che l'idrorepellenza e la durata del rivestimento sono dipendenti dallo stato superficiale. L'adesione del rivestimento al substrato dipende dalla rugosità superficiale, tali fattori influenzano la durata e l'usura. La difficoltà di ottenere un'elevata idrofobicità su una superficie trasparente dipende inoltre dalla densità delle molecole di acqua vincolate ai gruppi silanolic della superficie del vetro.

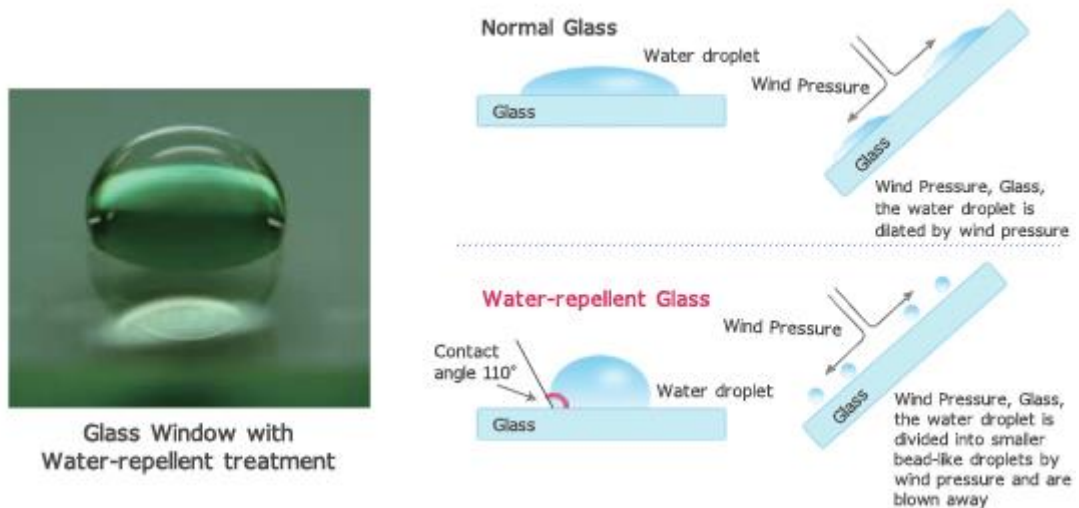


Fig.3.11 – Principio idrofobo dei rivestimenti applicati sul vetro

I trattamenti di rivestimento usati fino a d’oggi hanno impedito un uso diffuso in quanto richiedevano trattamenti termici.

Un nuovo rivestimento duro idrorepellente trasparente è realizzato attraverso la tecnica del Sol-Gel con deposizione a spray “low volume medium pressure (LVMP)”. Il composto del Sol-Gel consiste in una pre-legatura di nanoparticelle di ossidrilite terminato polidimetilsilossano (PDMS) e titanio di tetraisopropossido (TTIP) in una matrice di silice con riempitivi duri.

Il processo LVMP grazie alla più alta efficienza di trasferimento garantisce un rivestimento trasparente uniforme in piccole gocce ottenendo differenti strutture superficiali. La morfologia che ne deriva è una superficie nano-superficiale che esalta l’idrofobicità. Per garantire una buona resistenza all’abrasione e un elevato angolo di contatto delle gocce d’acqua al substrato il contenuto ideale di PDMS è del 10%; applicato sulle superfici quando i picchi di rugosità sono elevati (cioè il rapporto tra altezze del picco e distanza tra i picchi è elevato), consente l’intrappolamento di aria sotto la goccia d’acqua sulla superficie, consentendo un elevato angolo di contatto.

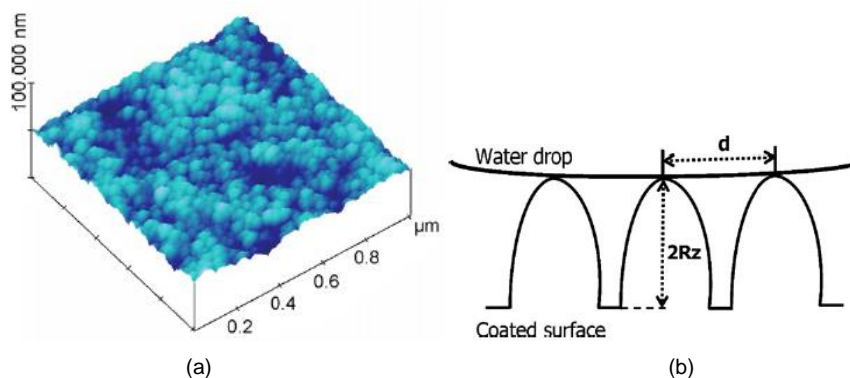


Fig.3.12 – (a) morfologia superficiale con il 10 vol.% di PDMS; (b) diagramma schematico che mostra il contatto tra la goccia d’acqua e la superficie ruvida

Ulteriore requisito del rivestimento idrofobo sono le buone proprietà meccaniche (resistenza al graffio e all’abrasione) e la stabilità contro le condizioni climatiche umide e le radiazioni UV.

La durezza cresce quasi linearmente con l’aumento della concentrazione di PDMS, in quanto essendo un elastomero, quindi morbido in natura, riduce la durezza del materiale.

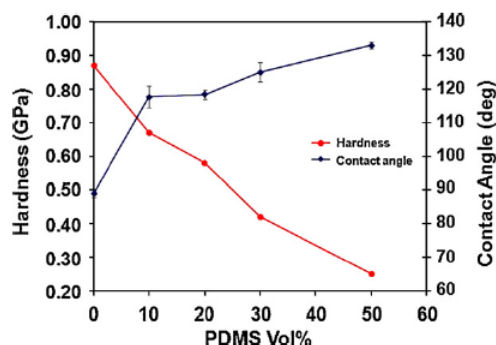


Fig.3.13 – Diagramma sugli andamenti della durezza e dell'angolo di contatto al variare del PDMS vol%

Bisogna osservare che aumentando la rugosità superficiale diminuisce la trasparenza a causa della diffusione della luce sulla superficie ruvida.

La resistenza all'idrofobicità è dovuta dalla morfologia nanostrutturale della pellicola e dalla più bassa energia della stessa.

Il rivestimento presenta una durezza ridotta rispetto ai rivestimenti di silice Sol-Gel, per questo sono stati introdotti miglioramenti sull'idrofobicità per migliorare la resistenza all'abrasione, materiali di rivestimento a base di polimeri idrofili organici presentano diversi svantaggi. Essi mostrano una scarsa stabilità meccanica (taber-Abresion 15% dopo 100 cicli di prova) e la tendenza a gonfiarsi per incorporazione di acqua.

Di recente per ovviare a questi problemi, sono stati sviluppati nanocompositi inorganico-organici, mentre attualmente altri reagenti idrofobi includono i compositi organici silani a catena lunga.

In futuro, questo film sarà fissato in modo stabile alla superficie del vetro, ottimizzando la composizione chimica e il processo di spruzzamento superficiale con diversi contenuti PDMS, riducendone la necessità di usare i tergicristalli.

3.6 DISPOSITIVI INCORPORATI NEL VETRO

Possono essere applicati dispositivi con funzionalità aggiuntive che non si limitano solo alla visibilità, ma funzioni quali la comunicazioni sono incorporate nel vetro.

3.6.1 SISTEMI DI SBRINAMENTO E L'INTRODUZIONE DEL PETD

Lo sbrinamento è un processo in cui il ghiaccio fissato alla superficie del vetro viene prima fuso e poi rimosso dal vetro sotto il proprio peso o dalle forze del vento.

Ci sono tre principali meccanismi di adesione del ghiaccio sulla superficie, interazioni elettrostatiche, legame idrogeno e forze di Van der Waals. Mentre i primi possono essere significativamente ridotte, le forze di Van der Waals non possono essere annullate.

I vari metodi usati rientrano all'interno di 3 categoria: meccanico, chimico e termico.

Il processo termico tradizionale è efficace ma richiede troppa energia, meno energia invece lo richiede un sistema meccanico con l'inconveniente però di usurare la superficie.

In questi sistemi il riscaldatore è formato da conduttori di tungsteno (8 μm) che vengono alimentati da connettori con una tensione di 12V. Il sistema si trova esternamente a diretto contatto con il ghiaccio, questo causa perdite di calore per convezione e conduzione, con un elevato fabbisogno termico superando la quantità necessaria di calore utile a sciogliere il ghiaccio.

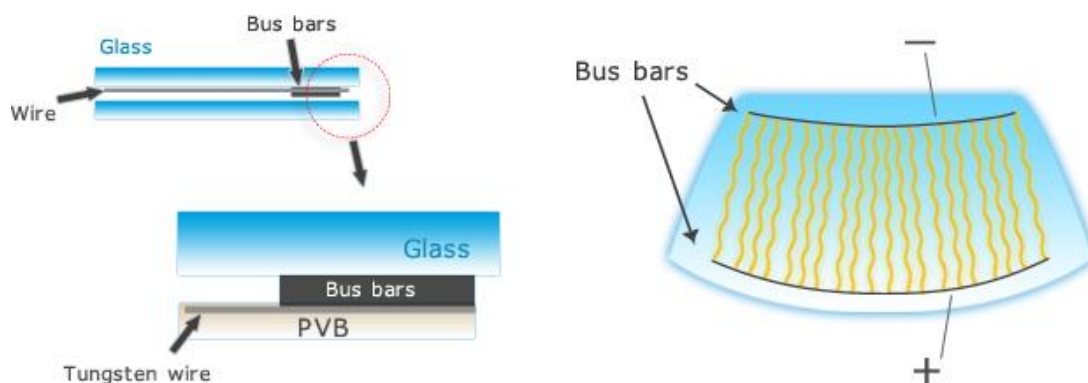


Fig.3.14 – Principio di funzionamento dei sistemi tradizionali di sbrinamento e disappannamento dei vetri

Numerosi sviluppi di rivestimento sono riusciti a diminuire l'adesione del ghiaccio al vetro.

Di recente invenzione è il nuovo metodo di rimozione del ghiaccio il "pulse electro-thermal de-icer (PETD)", il quale riduce l'energia di fusione del ghiaccio richiedendo solo 1% di energia termica utilizzata dai mezzi convenzionali, fondendo solo un sottile strato di ghiaccio superficiale lasciando invariata la temperatura dell'ambiente.

Il PETD utilizza un film sottile elettrico conduttivo applicato alla superficie, costituito da ossido di indio e stagno per applicazioni come finestre, da titanio nelle applicazioni che richiedono elevata resistenza a usura e da sottili lamine di metallo o compositi a base di fibre per grandi superfici.

Il PETD riduce queste perdite utilizzando un breve impulso di riscaldamento piuttosto che continuo, con tempi che vanno da 1 ms a 5 sec per riscaldare un sottile strato di interfaccia ghiaccio-vetro, comportando una riduzione significativa dello spessore riscaldato, diminuendo la penetrazione della lunghezza di calore e di conseguenza la massa termica di quei strati, non dando il tempo al calore di propagarsi nell'ambiente. Il risultato pertanto non dipende affatto dallo spessore dei materiali.

La pulsazione elettrica applicata in modo regolare può mantenere le superfici sempre libere dal ghiaccio, consentendo complessivamente un basso consumo energetico.

L'ottima efficienza energetica di questo processo permetterà di estendere il PETD ad applicazioni aerospaziali, pale eoliche, ponti e strutture civili.

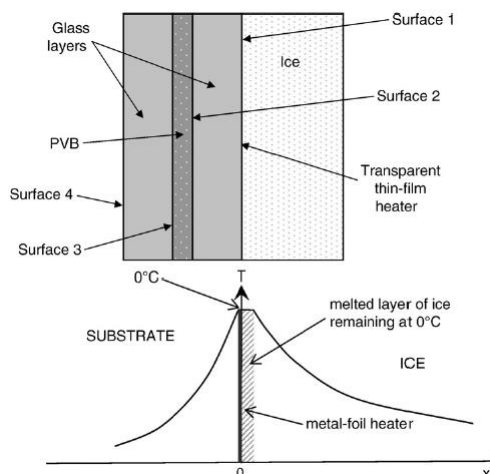


Fig.3.15 – Sezione trasversale di un parabrezza con uno strato di ghiaccio sulla sua superficie esterna e della sua distribuzione di temperatura

3.6.2 HEAD-UP DISPLAY

Questa tecnologia permette di visualizzare direttamente sul parabrezza le informazioni necessarie, senza la necessità di rimuovere l'attenzione dalla strada.

Utilizzando strati e rivestimenti adeguati, l'immagine proiettata viene riflessa sulla superficie interna del parabrezza, consentendo di visualizzare chiaramente le informazioni.

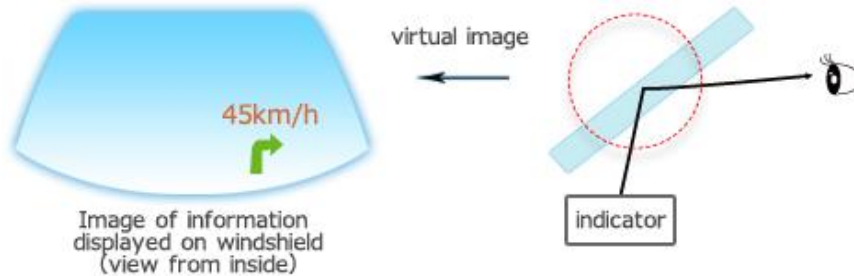


Fig.3.16 – Sistema Head-up

3.6.3 RICEZIONE SEGNALE RADIO

L'introduzione di antenne inserite nel parabrezza, forniscono una migliore estetica, senza compromettere il design del veicolo. Viene stampata una configurazione conduttrice, che attraverso la combinazione con altri dispositivi elettronici molti segnali di informazioni possono essere ricevuti all'interno della vettura, tra i quali la ricezione del cellulare, l'accensione del veicolo a distanza e il dispositivo di chiusura o apertura delle portiere.

Ottimizzando la dimensione e la forma del modello stampato possono essere ricevuti vari segnali.

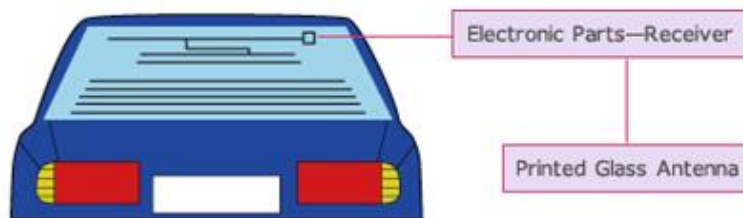


Fig.3.17 – Schema di trasmissione e ricevimento del segnale

3.6.4 RICEZIONE SEGNALE DIGITALE (DTV)

Questo è un nuovo concetto di antenna, dove l'antenna del digitale terrestre (DTV) è incorporata nel vetro stratificato. L'energia delle onde ad alta frequenza vengono ricevute attraverso l'antenna incorporata nel vetro e per mezzo di un elettrodo attaccato alla superficie del vetro arrivano all'interno della vettura, con perdite minime di energia.

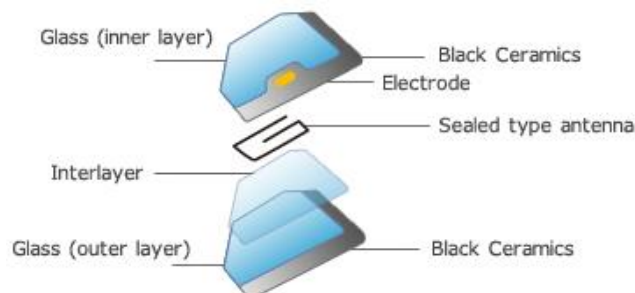


Fig.3.18 – Struttura del dispositivo per la ricezione del segnale DTV

3.7 SVILUPPI FUTURI

I vetri minerali hanno mostrato di essere un eccellente materiale per il settore automobilistico, per le loro eccellenti prestazioni quali la durata e il basso costo. La richiesta di forme sempre più complesse ha portato alla sostituzione del vetro minerale con il polycarbonato per alcune parti del veicolo.

I polimeri consentono di ottenere forme complesse, facilità di produzione e drastica riduzione del peso. In relazione a queste richieste il polycarbonato è utilizzato singolarmente o come materiale adesivo interposto tra i strati del vetro stratificato.

I polimeri quindi rappresentano una valida alternativa al vetro stratificato o temprato, tuttavia nessun polimero utilizzato singolarmente è eccellente.

Il PC offre eccellente resistenza agli urti, ma scarsa resistenza agli agenti atmosferici, mentre l'acrilico ha una eccellente resistenza agli agenti atmosferici, ma assorbe forze d'impatto minori.

Si nota che combinando le loro caratteristiche si hanno notevoli vantaggi, ad esempio utilizzando varie combinazioni di PC e utilizzando l'acrilico come buffer di protezione. Questa unione si ottiene inserendo una pellicola di acrilico in uno stampo e iniettando il PC. Un altro approccio di ultima generazione è il processo di co-iniezione, cioè una doppia iniezione per formare un strato di PC tra due strati di pellicole acriliche. L'adesione interfacciale può essere controllata per fornire differenti livelli di resistenza e questa tecnologia elimina molte fasi del processo tradizionale, comportando una riduzione dei costi e la progettazione della forma in piena libertà.

Il polycarbonato utilizzato singolarmente permette una riduzione del peso del 50% e i pezzi possono essere prodotti da stampaggio ad iniezione. Tuttavia, la resistenza ai graffi è inferiore a un vetro normale, come anche la stabilità ai raggi UV. Questi problemi possono essere ridotti con opportuni rivestimenti.

Per limitarli, sono state sviluppate nuove tecniche di rivestimento come il miglioramento della deposizione al plasma tramite evaporazione o deposizione di vapore chimico (PACVD) per rivestimenti anti graffio. Test effettuati hanno stimato per il rivestimento al plasma una stabilità per più di 10 anni con spessori di 65 μm .

Tali innovazioni hanno permesso di ottenere più alti standard qualitativi e la capacità di ottenere il prodotto finito fuori dallo stampo, rispetto ai rivestimenti duri che venivano applicati dopo lo stampaggio.

L'introduzione di nanocompositi nei vetri, composti costituiti da piccole quantità di nanoargilla o da metallo oppure anche da particelle ceramiche di ossido, vengono aggiunte al polycarbonato e con l'aggiunta di acrilico viene aumentata la resistenza all'umidità senza perdite di purezza.

Rivestimenti umidi termoidurenti o lacche a base di acrilico o resine silossaniche rimangono il metodo più comune per i vetri polycarbonato. Tuttavia le tecnologie di deposizione per evaporazione in fase gas come il CVD o il PVD, oppure per mezzo del plasma come il PECVD, sono valide alternative.

Con il rivestimento bagnato è facile incorporare la protezione UV ma a volte è difficile ottenere buone prestazioni di durezza.

CAPITOLO 4: TECNOLOGIE PER L'ALTA SICUREZZA

4.1 INTRODUZIONE

Per tecnologia per l'alta sicurezza si fa riferimento ai vetri (parabrezza e finestrini laterali) impiegati nei veicoli militari, che dalle recenti esperienze delle forze armate coinvolte nelle missioni in Iraq e in Afghanistan vengono costantemente sottoposte ad un compito gravoso.



Sistemi tecnologici per l'alta sicurezza altro non sono che vetri antiproiettili (anche noti come vetri balistici o armature trasparenti), particolarmente resistenti alla penetrazione quando colpiti da proiettili, in grado di mantenere la trasparenza ottica e infine di essere compatibili con le apparecchiature di comunicazione interne. Le richieste di basso costo e di leggerezza sono i punti critici che rendono la progettazione e la realizzazione dei vetri di sicurezza da parte dei costruttori impegnativa.

Tipicamente un vetro antiproiettile standard è una combinazione di due o più strati di materiale, uno fisso e uno morbido. Lo strato morbido rende il vetro più elastico, in modo che possa flettere invece di esplodere. L'indice di rifrazione per entrambi i vetri usati negli strati antiproiettile deve essere in grado di mantenere il vetro trasparente e consentire una chiara, non distorta vista attraverso il vetro. Il vetro antiproiettile ha uno spessore variabile tra 19 mm e 76 mm.

I requisiti essenziali che un vetro antiproiettile deve possedere per la protezione degli occupanti del veicolo, sono:

- Resistenza balistica verso i colpi delle armi da fuoco
- Privo di distorsioni ottiche e di lunga durata per la chiarezza ottica
- Bassa densità per non compromettere la mobilità e la stabilità del veicolo
- Minimizzare lo spessore del pannello di vetro per non ridurre lo spazio interno
- Compatibilità con gli apparecchi di comunicazione e con i sistemi on-board nel spettro elettromagnetico del non visibile
- Rapporto prestazioni-costo elevato

I vetri antiproiettili sono tradizionalmente composti in laminati sodico-calcico, dove le diverse lamine di vetro sono accoppiate con interstrati di polimero (poliuretano o polivinilbutirrale), come illustrato dalla Fig.4.1.

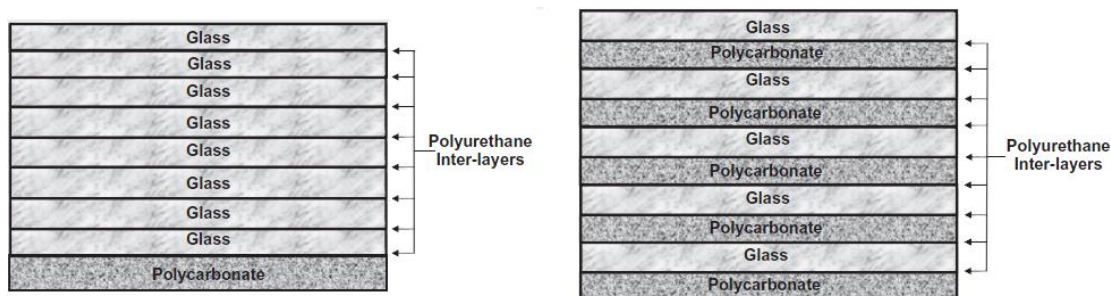


Fig.4.1 – Sistemi tradizionali di armatura trasparente basate su vetri laminati con interlayer polimerici

Questo vetro stratificato è sempre meno usato dai veicoli militari, che per richiedere un livello adeguato di protezione in grado di resistere alla penetrazione del proiettile, si deve ricorrere a spessori elevati dei laminati, aumentandone di molto il peso dell'armatura trasparente, dovuto alla elevata densità del vetro.

Questa soluzione ha i seguenti svantaggi:

- Maggiore voluminosità del veicolo
- Riduzione dello spazio della cabina interna del veicolo
- Aumento della distorsione ottica
- Riduzione della trasparenza ottica

Questi aspetti negativi appartengono ai tradizionali vetri di sicurezza impiegati nei veicoli militari a 4 ruote (High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle, HMMWV), che contribuiscono ad aumentare il peso del veicolo di oltre il 30%, fornendo solo il 15% della copertura esterna dell'intero veicolo. Per ridurre tali problematiche, si stanno sviluppando nuovi metodi di costruzione che consistono tipicamente in una combinazione di tre strati funzionali:

- Strato superficiale (hard strike force) per la frantumazione/erosione del proiettile
- Strato intermedio (intermediate layer) per l'assorbimento dell'energia e l'arresto della frattura
- Strato di supporto (spall-liner/backing layer) per il contenimento dei frammenti

Queste tipologie di vetri balistici, illustrati in Fig.4.2, presentano un peso ridotto del 50% e anche dello spessore, quest'ultimo può arrivare all'incirca sui tre centimetri.

La trasparenza ottica è molto migliore grazie al minor numero di lamine usate, rispetto ai vetri tradizionali, i quali risentono gli elevati numeri degli strati intermedi.

Tipicamente in questi vetri balistici si utilizza per lo strato superficiale il vetro o vetro ceramico, per lo strato intermedio strati intervallati di vetro o di metacrilato (PMMA) e per lo strato di supporto il polycarbonato (PC).



Fig.4.2 – Sistemi di armature trasparenti di nuova concezione basati su tre strati funzionali

I nuovi veicoli militari dell'esercito HMMWV sono progettati per garantire una maggior protezione e tenendo in considerazione che i vetri rappresentano le aree più deboli di un veicolo e che devono fornire un efficiente rapporto peso-protezione balistica, rappresentano per i costruttori delle notevoli sfide.

Tuttavia, i nuovi veicoli devono presentare in maniera significativa un peso ridotto (per garantire una elevata mobilità, un'alta efficienza di carburante, ecc), dal momento che il parabrezza e i finestrini laterali si trovano per la maggior parte nella parte superiore del veicolo, dove l'aggiunta di peso in questa zona è di particolare interesse in quanto associato all'up-armoring. L'aumento associato all'altezza del centro di gravità, comporta un aumento nella propensione al ribaltamento del veicolo e una riduzione generale della stabilità dello stesso.

In particolare, fornire la resistenza alla penetrazione senza significative perdite della trasparenza ottica è di fondamentale importanza. La sostituzione del parabrezza blindato e dei finestrini laterali sono spesso necessari non a seguito dei danni causati dal fuoco nemico, ma piuttosto delle perdite di trasparenza dovute ai graffi e dalla scarsa resistenza chimica e ambientale della superficie dei strati, quindi è importante assicurare un'elevata durabilità dei vetri trasparenti.

4.2 TEST STANDARD E NUOVI

Nella progettazione attuale dei vetri di sicurezza, la US Army si avvale delle specifiche balistiche dei vetri commerciali, presenti all'interno delle norme della "National Institute of Justice Test Standard", che definiscono diversi livelli di protezione in funzione del tipo di proiettili, del peso, della velocità, della lunghezza della canna e del numero di penetrazioni concesse nel vetro.

Materiali antiproiettili sono generalmente testati usando una pistola, per sparare un proiettile da una distanza impostata nel materiale. I livelli di protezione si basano sulla capacità del bersaglio di arrestare un tipo specifico di proiettile che viaggia a una determinata velocità. Gli esperimenti indicano che il policarbonato, con proiettili di forma regolare, cede a velocità più basse rispetto a quelli irregolari (come ad esempio dei frammenti); quindi eseguire i test con proiettili di forma regolare fornisce probabilmente una stima per eccesso della sua resistenza. Quando i proiettili non penetrano, si può misurare la profondità dell'incisione lasciata dall'impatto e correlarla alla velocità del proiettile e allo spessore del materiale. Alcuni ricercatori hanno sviluppato modelli matematici basati sui risultati di questo tipo di test per aiutarli a progettare un vetro antiproiettile in grado di resistere a specifiche minacce previste.

Tuttavia, è stato riscontrato che le minacce attuali in campo militare superano di gran lunga quelle considerate nel settore commerciale. Queste specifiche coprono in genere solo requisiti di protezione contro colpi di pistole e fucili di piccolo calibro, mentre i veicoli dell'esercito sono minacciate da un più ampia gamma di munizioni pesanti. Conseguentemente l'esercito sta sviluppando un nuovo test per definire nuove specifiche standard (ATPD 2352), da seguire nella realizzazione delle armature trasparenti, delineando i nuovi requisiti fondamentali che dovranno possedere i nuovi vetri di sicurezza dei veicoli blindati dell'esercito. Inoltre la ATPD 2352 oltre a specificare i requisiti di protezione rispetto alle minacce standard (proiettili di varie forme e dimensioni), comprenderà anche i requisiti riguardanti le prove di "Fragment Simulating Projectiles (FSP)" come la trasparenza ottica e la durabilità agli agenti atmosferici. La ATPD 2352 include al suo interno i requisiti contro le minacce FSP che sono particolarmente critiche in considerazione del fatto che i dispositivi esplosivi improvvisati (Improvised Explosive Devices, IED) relativi ai decessi degli occupanti dei veicoli sono in aumento.

L'ATPD 2352 vuole fornire una maggior compressione fisica del comportamento e delle prestazioni dei sistemi di armatura trasparente definendo le linee guida generali per la progettazione e la selezione dei materiali.

Da queste considerazioni i ricercatori militari statunitensi stanno sviluppando una nuova classe di armatura trasparente, che incorpora ossinitruro di alluminio (nome commerciale: ALON) come strato esterno. Questo è molto più leggero e rende molto di più rispetto ai tradizionali laminati vetro/polimero. Il "vetro" in ossinitruro di alluminio può sfidare minacce come i proiettili perforanti di calibro 50 utilizzando un materiale che non è eccessivamente pesante. Vari tipi di altri materiali che assomigliano molto al vetro sono in fase di sviluppo.

Alcuni tipi di spinelli di ceramica (una classe di minerale) possono anche essere utilizzati per armature trasparenti grazie alle loro caratteristiche di maggiore densità e durezza rispetto al vetro tradizionale. Questi nuovi tipi di armature trasparenti in ceramica sintetica possono permettere armature più sottili a parità di potere frenante rispetto al tradizionale vetro laminato.

4.3 FUNZIONI DEI STRATI IN VETRO BALISTICO

Come accennato in precedenza, i più recenti vetri antiproiettili trasparenti sono generalmente costituiti da tre strati funzionali distinti. I principali requisiti richiesti per ogni singolo strato sono riassunti di seguito:

Strato esterno

- Trasparenza ottica per alte lunghezze d'onda nel campo del visibile e dell'infrarosso
- Alta capacità di smussare i proiettili attraverso l'interfaccia e l'erosione meccanica
- Resistenza all'impatto e frattura localizzata
- Buona resistenza ambientale

Strato intermedio

- Trasparenza ottica ad alte lunghezze d'onda nel campo del visibile e dell'infrarosso
- Alta capacità di assorbimento dell'energia cinetica
- Elevata resistenza alla flessione, al fine di fornire supporto rigido allo strato esterno
- La capacità di localizzare la frattura per non causare una perdita di trasparenza nel caso di più impatti nell'armatura trasparente
- Buona resistenza ambientale

Strato di supporto

- Trasparenza ottica ad alte lunghezze d'onda nel campo del visibile e dell'infrarosso
- Buona resistenza ambientale
- Contenimento dei spall
- Alta resistenza chimica
- Alta resistenza ai graffi

Oltre ai tre strati funzionali menzionati cui sopra, le armature trasparenti contengono anche sottili adesivi interlayer, il cui principale scopo è quello di unire i vari strati adiacenti e ridurre gli effetti della differenza di dilatazione termica tra i vari strati.

4.4 MATERIALI USATI NEI SISTEMI TRASPARENTI BALISTICI

I materiali utilizzati per le applicazioni nei vetri di sicurezza sono principalmente: vetro, vetroceramica, ceramici mono/poli cristallini con granulometria sub-micrometrica, termoplastici e termoindurenti polimerici amorfi.

4.4.1 VETRO

Tradizionalmente nelle applicazioni di sicurezza è usato il vetro sodico-calcico, grazie alla sua buona combinazione di rigidità, di resistenza e di durata. La capacità del vetro di resistere ad urti viene migliorata con processi di tempra. Recentemente si è iniziato ad aggiungere all'impasto delle materie prime il 10% di borosilicato.

Il vetro rimane un componente importante, dovuto principalmente al suo basso costo e alla sua facilità di produzione; un aspetto negativo invece da evidenziare nel vetro come soluzione di sicurezza è il proprio peso.

4.4.2 VETROCERAMICA

Alcuni tipi di vetro possono essere cristallizzato per produrre la cosiddetta vetroceramica. Per esempio l'Areva ha sviluppato un materiale vetroceramico noto come TransArm, che è una forma di devetrificante di vetro allumino-silicato di litio, questo materiale presenta proprietà strutturali simili al cristallino ceramico, con minore densità, buona lavorabilità e costo relativamente basso rispetto alle lavorazioni convenzionali del vetro.

4.4.3 CERAMICA CRISTALLINA

Grazie alla loro eccezionale durezza e resistenza alla compressione, i ceramici cristallini sono utilizzati principalmente come strati esterni nei vetri blindati più avanzati. Tra questi materiali, tre vengono considerati gruppi: ceramica cristallina trasparente come lo zaffiro AL_2O_3 , ceramica policristallina trasparente come l'ossinitruro di allumineo (ALON, prodotto dalla Surmet), spinelli di ceramica (alluminato di magnesio) a grana fine. Le proprietà generali strutturali e meccaniche dei spinelli se confrontate con quelle del zaffiro o dell'ALON, sono inferiori. I pannelli costituiti da spinello sono disponibili attualmente solo per applicazioni di ricerca.

4.4.4 POLIMERI AMORFI

I polimeri amorfi sono principalmente usati come strati intermedi nel vetro multistrato, le sue proprietà meccaniche e strutturali si aggiungono a quelle primarie rappresentate dal vetro e dalla ceramica; tali proprietà aggiuntive sono la protezione dalla radiazione ultravioletta e dall'umidità.

Attualmente nei veicoli blindati vengono utilizzati materiali termoplastici (PMMA, PC) e termoindurenti (poliuretano PU). Le caratteristiche del PMMA oltre all'elevata rigidità elastica, sono la protezione contro la radiazione ultravioletta, chimica e la resistenza ai graffi, che se usato come strato intermedio in un vetro di sicurezza ne aumenta di molto le sue caratteristiche. Inoltre è possibile usare una grande varietà di tecniche di lavorazione come l'estrusione, la termo-formatura e la colata, che permette di ottenere geometrie complesse, richieste proprio dai veicoli militari.

Il policarbonato (PC) nei vetri blindati viene utilizzato come strato di supporto trasparente al pannello esterno, la sua resistenza termica, la radiazione ultravioletta, chimica e resistenza ai graffi sono inferiori rispetto agli altri materiali, però attraverso la deposizione di opportuni rivestimenti si limitano questi problemi. Il PC ha generalmente uno dei due tipi di rivestimento per resistere all'abrasione: un rivestimento morbido che "guarisce" dopo essere stato graffiato (ad esempio polimeri elastomerici a base di carbonio) o un rivestimento duro che impedisce graffi (ad esempio polimeri a base di silicio).

La resistenza e la protezione del PC è abbastanza elevata se utilizzato singolarmente come materiale di protezione, però non è altrettanto efficace se utilizzato in forma di pannelli dalle sezioni spesse.

Grazie alla sua unica microstruttura molecolare, le proprietà del termoindurente poliuretano (PU) può essere adattata in modo che le proprietà del materiale variano da rigido e fragile tipiche del vetro, a morbido e flessibile tipiche degli elastomeri. Nonostante che il PU conservi la tenacità anche in sezioni spesse, esso è utilizzato principalmente come film sottile adesivo intercalare nel vetro di sicurezza, per il motivo che in sezioni spesse presenta leggere colorazioni che influenzano la trasparenza ottica.

Oltre all'utilizzo dei singoli polimeri, nelle soluzioni di protezione si sta espandendo l'uso combinato di tali polimeri in compositi costituiti da una matrice continua con disperse particelle di PMMA. Il materiale risultante è in possesso di prestazioni superiori se paragonate ai suoi omologhi polimeri monolitici.

4.5 SELEZIONE MATERIALI IN BASE AL COMPORTAMENTO

A differenza delle proprietà dei tre singoli strati menzionati precedentemente che sono facilmente definite, le proprietà attribuibili al comportamento dell'intero vetro antiproiettile multistrato non sono facilmente definibili. Questa è una conseguenza del fatto che le caratteristiche di ciascun materiale non sono solo in funzione delle sue proprietà, ma dall'entità dell'interazione di questo con i loro materiale adiacenti.

Queste osservazioni suggeriscono, come nel caso dello strato superficiale, che non solo la microstruttura del materiale e le sue proprietà influenzano le prestazioni del vetro stratificato.

Numerose indagini sperimentali condotte da Krell e Strassburger sulla scelta dei materiali, sono state condotte con la finalità di definire una relazione tra l'efficienza dei vetri balistici e le relative proprietà meccaniche dei singoli materiali costituenti il vetro multistrato, evidenziando una mancanza di correlazione tra le prestazioni balistiche di protezione dell'intero sistema e i parametri strutturali (contenuto di impurità, la percentuale di porosità e granulometria del materiale presente sull'altro).

È molto importante per le prestazioni balistiche di protezione conferire il danno (frammentazione) in una regione ristretta, circostante il luogo di impatto del proiettile, in quanto indesiderabile se il vetro venisse sottoposto a più colpi. In altre parole, numerosi frammenti in scala fine sono preferiti rispetto ai numerosi frammenti grossolani.

Inoltre bisogna notare che le proprietà di un vetro antiproiettile possono essere influenzate dalla temperatura, dall'esposizione ai solventi e dalla radiazione ultravioletta della luce solare. Se lo strato di policarbonato si trova sotto uno strato di vetro, ha una certa protezione dalle radiazioni UV. Inoltre, nel tempo il policarbonato diventa più fragile, perché è un polimero amorfo che si muove verso il suo nuovo punto di equilibrio termodinamico.

L'impatto del proiettile sul policarbonato a temperature inferiori a -7°C a volte crea uno spall, ovvero alcuni pezzi di policarbonato si staccano e diventano essi stessi proiettili. Esperimenti hanno dimostrato che la dimensione degli spall è correlata allo spessore del laminato piuttosto che alla dimensione del proiettile. Lo spall inizia dalle imperfezioni presenti sulla superficie, dovute alla flessione dello strato interno di policarbonato e le fessure successivamente tendono a muoversi "all'indietro" verso la superficie d'impatto. È stato dimostrato che un secondo strato interno di policarbonato può efficacemente resistere alla penetrazione da parte dello spall.



(a)

(b)

Fig.4.3 – Confronto della visibilità rimanente in un vetro a seguito dell'impatto di un proiettile da 9 mm in: a) un vetro PC-PMMA-PC laminato; b) e un vetro PC-Glass-PMMA-PC laminato

4.5.1 STRATO ESTERNO

Esaminando il comportamento dello strato più esterno si può individuare come due fasi principali che caratterizzano il comportamento dello strato alla penetrazione del proiettile. Una fase iniziale quando il proiettile entra in contatto con la superficie ancora prima di iniziare la penetrazione. In questa fase è desiderabile avere il massimo appiattimento e frammentazione della punta del proiettile. Una fase secondaria di vera e propria penetrazione, dove avviene la maggiore deformazione e rallentamento del proiettile causando frammenti e detriti. In questa fase si cerca di rallentare il più possibile il proiettile, ricorrendo anche al contributo impartito dalla rigidità e durezza dello strato di supporto, che porta ad una minore deflessione dello strato esterno. In genere, le dimensioni dei frammenti sono associate alla granulometria del materiale costituente lo strato, più grandi sono i frammenti più il materiale presenta una granulometria più piccola relativa ad una minore densità di cricche intergranulari.

Si è così in grado di spiegare perché un spinello a grana fine, che ha proprietà meccaniche inferiori, ma una media più grande delle dimensioni del frammento, è preferibile allo zaffiro.

Una forza dinamica maggiore sul materiale dello strato esterno è vantaggioso in quanto promuove la crescita di un numero minore di fessure, e la nucleazione di un numero elevato di piccole crepe porta alla formazione di frammenti di dimensione maggiore.

Allora per massimizzare il contributo da parte del materiale nella resistenza alla penetrazione, è auspicabile avere un materiale con una buona combinazione di alta rigidità e alta anelasticità (resistenza alla deformazione).

È chiaro allora evidenziare come la ceramica cristallina con granulometria sub-micrometrica come ALON e i spinelli sono la scelta migliore.

Il vetro, a differenza risulta meno efficace come materiale da impiegare nello strato esterno rispetto alla vetroceramica o ceramica cristallina, per via delle dimensioni del frammento, della rigidità e durezza del materiale, in quanto sono i fattori più importanti che controllano le prestazioni di un buon vetro antiproiettile. Nel vetro, a causa dell'assenza di grani, l'affinamento non può essere utilizzato per aumentare la dimensione media dei frammenti. Il vetro presentando una più ampia distribuzione di difetti superficiali promuove la formazione di frammenti più grossolani, che a sua volta portano ad un miglioramento delle prestazioni balistiche.

Per ottimizzare la capacità dello strato a prevenire la penetrazione del proiettile e favorire un maggiore appiattimento, è necessario oltre ad uno strato rigido, un adeguato spessore e un relativo fissaggio al telaio, anche attraverso la deposizione di rivestimenti sia sulla superficie esterna e sia sugli strati intermedi in modo da massimizzare gli effetti di auto-contenimento.

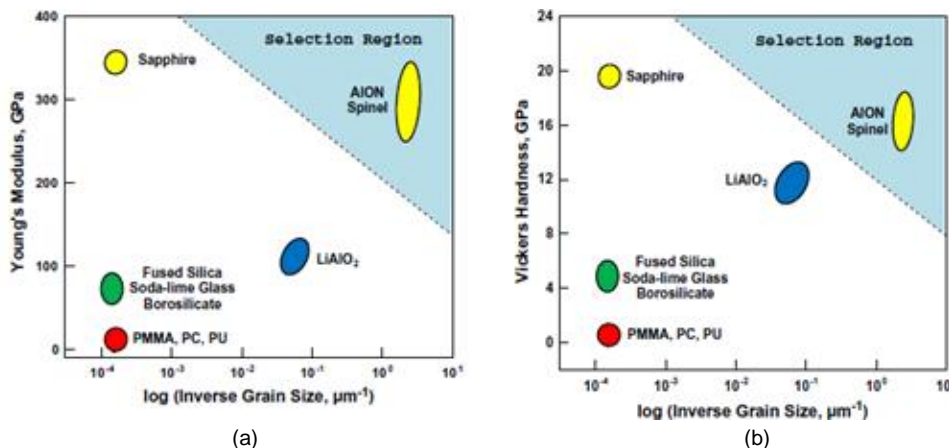


Fig.4.4 – Selezione del materiale per lo strato superficiale di un'armatura trasparente: (a) modulo di Young in funzione della granulometria inversa; (b) la durezza in funzione dell'inverso della granulometria nella fase di penetrazione del proiettile

4.5.2 STRATO INTERMEDIO

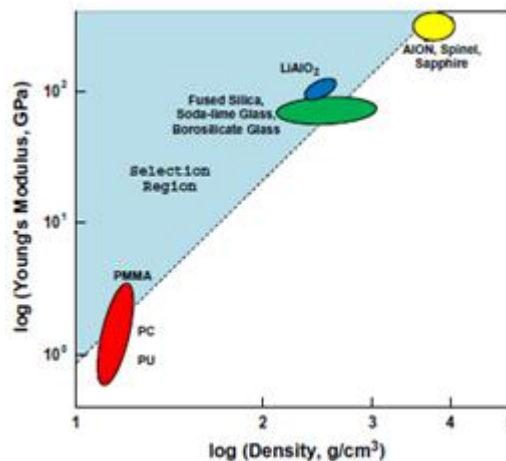
A differenza dello strato superficiale dove il rallentamento del proiettile avviene attraverso il contatto con la superficie, causando la deformazione del proiettile e la sua frantumazione, ritenendo così poco rilevante la quantità di energia assorbita dalla frattura; la situazione è molto diversa nel caso dell'interazione del proiettile con lo strato intermedio. In questo caso il proiettile è già stato rallentato, e l'effetto della sua deformazione e appiattimento diventa secondaria, in quanto lo strato meno duro rispetto a quello esterno deve possedere la caratteristica di assorbire la maggior parte dell'energia cinetica. Pertanto, una buona combinazione della resistenza alla frattura (ovvero energia assorbita per unità di superficie) e la frammentazione in scala fine (cioè un grande area superficiale dei frammenti) sono di importanza rilevante.

Inoltre, poiché lo strato intermedio è il costituente presente in maggior volume in un'armatura trasparente, in quanto deve fornire un supporto rigido per lo strato superficiale, ha un'importanza rilevante il peso complessivo dell'armatura. Quindi, una buona combinazione di bassa densità e di elevata modulo di Young è il primo requisito che si richiede per materiali interlayer.

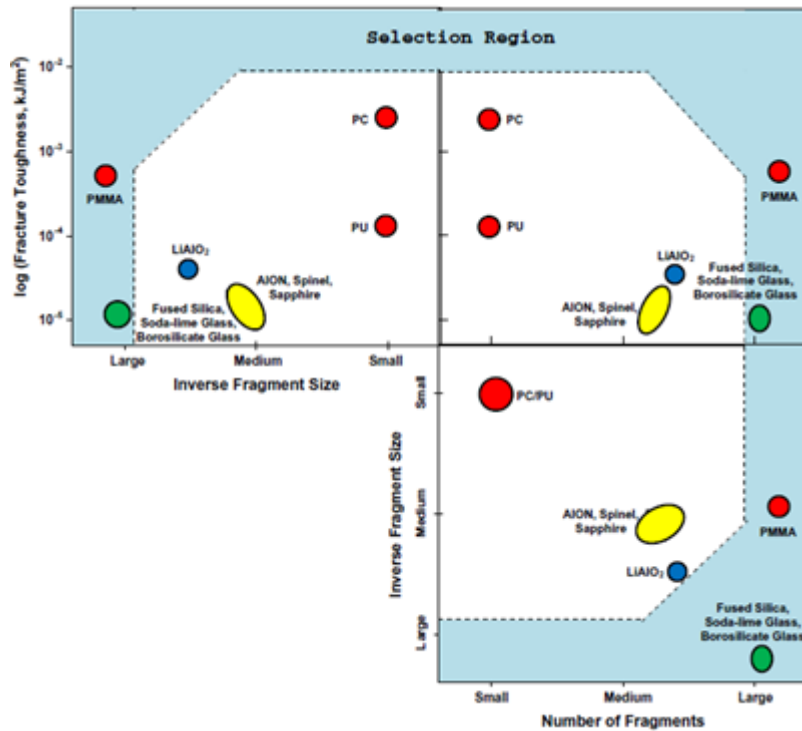
Di conseguenza, un'elevata resistenza alla flessione (combinazione modulo Young e spessore elevato) di questo materiale è un'importante requisito per migliorare le prestazioni balistiche dello strato esterno e comporta un'eccezionale durezza nel caso di utilizzo materiali ceramici cristallini a granulometria sub-micrometrica per rallentare il proiettile.

Il PMMA tende a subire fratture localizzate a differenza del PC durante l'impatto, che insieme al vetro rappresentano i materiali ideali per lo strato intermedio rispetto al vetro ceramico, fornendo il supporto necessario allo strato superficiale pur rimanendo relativamente leggero.

La capacità dello strato di polimero di arrestare i proiettili con energia variabile è direttamente proporzionale al suo spessore.



(a)



(b)

Fig.4.5 – Selezione del materiale per lo strato intermedio di un'armatura trasparente: (a) il modulo di Young in funzione della densità rispetto alla sua capacità di fornire supporto rigido allo strato superficiale; (b) combinazione di grande tenacità, frammentazione in scala fine, e un gran numero di frammenti è preferibile rispetto alla capacità del materiale di assorbire energia.

4.5.3 STRATO DI SUPPORTO

Come discusso in precedenza, il ruolo principale dello strato di supporto è di impedire ai frammenti di entrare all'interno della cabina del veicolo, e allo stesso tempo di non subire scheggiature e fratture sulla sua superficie. In altre parole, questo strato non svolge un ruolo importante nella resistenza alla penetrazione del proiettile, ma piuttosto nel contenimento dei frammenti e detriti causati dalla penetrazione del proiettile.

La più importante proprietà che deve possedere questo strato è la duttilità, tale da consentire il contenimento dei frammenti e l'assenza di scheggiature. La resistenza chimica e la resistenza ai graffi sono altrettanto importanti, queste possono essere migliorate attraverso la deposizione di rivestimenti chimici.

Si è visto che, dal punto di vista di fornire una soluzione leggera e di contenimento, il PC si adatta ottimamente come materiale per lo strato di supporto nei vetri balistici.

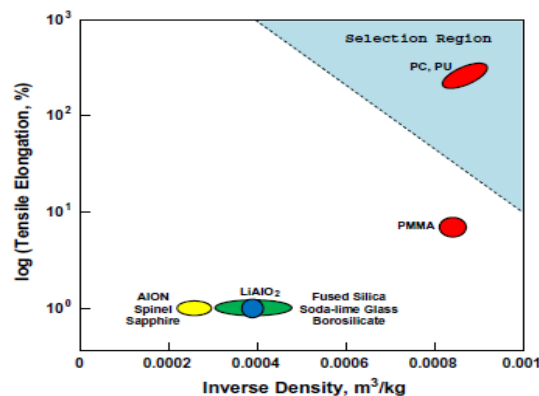


Fig.4.6 – Selezione del materiale per lo strato di supporto di un'armatura trasparente; una ad alta resistenza duttilità è fondamentale per garantire il contenimento dei frammenti.

4.6 CONCLUSIONI

Per quanto riguarda la progettazione dei sistemi di sicurezza, si deve osservare che una delle principali ragioni delle basse prestazioni balistiche è la necessità da parte dei veicoli blindati di possedere grandi pannelli per consentire un ampio campo visivo per gli occupanti del veicolo.

Nei recenti disegni dei veicoli militari si sono ridotte le dimensioni delle zone trasparenti, riducendo così le dimensioni del pannello, portando a significativi miglioramenti delle caratteristiche dei vetri antiproiettili.

È stato dimostrato da diversi test che l'entità dell'effetto di diverse proprietà del materiale sulle performance dei sistemi balistici è fortemente dipendente dal tipo e dal grado di interazione tra i differenti strati costituenti il vetro di sicurezza.

CONCLUSIONI

Il trend del mercato attuale richiede dispositivi sempre più sottili, leggeri e dalle forme più esasperate, combinando le non facili caratteristiche di una buona resistenza all'abrasione, ai graffi e agli urti. Con i recenti sviluppi nell'industria del vetro si è stato in grado di impartire proprietà uniche al vetro, quali la durabilità, la lavorabilità e la resistenza, rendendolo sempre più performante.

Nel campo automotive il vetro rimane il materiale più richiesto per le vetture del veicolo, il quale mantenendo il primato sui materiali polimerici, in quanto si riesce a raggiungere una durabilità maggiore. Con particolari processi di rivestimento si può conferire al vetro una serie di caratteristiche che spaziano da un'eccellente trasparenza ottica, alla protezione anti-graffio e anti-riflesso e infine alle proprietà idrofobiche.

Solo recentemente in campo automotive, si sono aperti le strade alla graduale sostituzione dei vetri minerali con polimeri quali il policarbonato e il poliuretano. I principali limiti di utilizzo di questi materiali, consistevano, nella minore durezza superficiale e nella minor resistenza all'usura ambientale a causa della degradazione per mezzo di raggi UV e di solventi chimici. Grazie alle nuove tecniche di deposizione di film sottili quali la deposizione di vapore fisico (PVD) e la deposizione chimica di vapore assistita al plasma (PACVD), si sono raggiunti gradi di omogeneità e durata dei rivestimenti impensabili fino a pochi anni fa. Il minor peso, la facilità di formazione e le proprietà ottiche maggiori faranno sì che i polimeri potranno sostituire quasi completamente i vetri nel settore automotive, in cui sono richieste finestrature dalle forme sempre più estreme e pesi sempre più contenuti, non ottenibili con il normale vetro.

I recenti studi mirati alla creazione di vetri temprati con profilo ESP, hanno aperto una nuova frontiera nella progettazione dei vetri rinforzati. I vetri ESP consentono la progettazione di un vetro dalle proprietà uniche, acquistando proprietà di sicurezza inusuali per un materiale tipicamente fragile, come il "crack arrest" e il comportamento a cedimento di tipo "fail safe", in cui si creano delle cricche visibili prima della rottura del vetro. La maggiore resistenza meccanica, la maggior affidabilità, la possibilità di creare profili ESP su ogni componente dalle forme più svariate e complesse e la possibilità di creare profili progettati ad hoc per ogni genere di applicazione, variando semplicemente i parametri di diffusione, di tempo e di temperatura della scarica ionica, porterà alla parziale sostituzione della tempra termica per la creazione dei vetri di sicurezza.

Nel campo dei processi industriali per la produzione e la formazione dei parabrezza, attraverso l'ausilio di software di calcolo numerico, si stanno ottenendo risultati sensazionali, in grado di prevedere le problematiche nella progettazione del componente e dello stampo, consentendo un'analisi delle principali problematiche meccaniche e termodinamiche, come nel caso di sollecitazioni termiche troppo gravose. Per mezzo di questi software si riescono a raggiungere prodotti con una qualità superiore con tempi minori, evitando gli elevati costi e tempi richiesti dalla sperimentazione, questo grazie la mettere in evidenza quelle criticità che si trovano spesso ad affrontare una volta che la produzione è già stata avviata, permettendone così la modifica dei parametri critici già in fase progettuale e limitando di conseguenza i tempi di ingresso sul mercato.

Attraverso il continuo sviluppo di tecniche di analisi numeriche e l'uso di materiali innovativi sempre più performanti, permetterà di soddisfare le sempre più esigenti richieste di avanzate caratteristiche dei veicoli.

BIBLIOGRAFIA – SITOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA – CAPITOLO 1

E. Bernardo, G. Scarinci, *“Scienza e tecnologia dei materiali”*

Eugen Axinte, 2011, *“Glasses as engineering materials: A review”*, Materials and Design 32 pp.1717–1732.

BIBLIOGRAFIA – CAPITOLO 2

E. Bernardo, G. Scarinci, *“Scienza e tecnologia dei materiali”*

Eugen Axinte, 2011, *“Glasses as engineering materials: A review”*, Materials and Design 32 pp.1717–1732.

Roger Kennedy, Inc. AFG Industrie, *“The history and future of the flat glass industry”*

Tomas Serafinavičius, Jean-Paul Lebet, Christian Louter, Tomas Lenkimas, Artiomas Kuranovas, 2013, *“Long-term laminated glass four point bending test with PVB, EVA and SG interlayers at different temperatures”*, Procedia Engineering 57 pp.996 – 1004.

Mostafa M. El-Shami, Scott Norville, Yasser E. Ibrahim, 2012, *“Stress analysis of laminated glass with different interlayer materials”*, Alexandria Engineering Journal 51 pp.61–67.

Philip S. Sklad, Moe Khaleel 2005, *“Structural Reliability of Lightweight Glazing Alternatives”*, FY 2005 Progress Report Automotive Lightweighting Materials, Pacific Northwest National Laboratory.

Sucheol Park, Jin Who Hong, 2009, *“Polymer dispersed liquid crystal film for variable-transparency glazing”*, Thin Solid Films pp.3183–3186.

S. Jill Glass, Matthew Abrams, Rudolph V. Matalucci, 2000, *“New glass Technologies for Enhanced Architectural Surety: Engineered Stress Profiles (ESP) in Soda-Lime-Silica Glass”*, Sandia National Laboratories.

Lindahl, Daniel, Stodell, Henric, *“A Human Factors Analysis of Optical Distortion in Automotive Glazing”*, Linköping University, Department of Management and Engineering.

Yong Peng, Jikuang Yang, Caroline Deck, Remy Willinger, 2013, *“Finite element modeling of crash test behavior for windshield laminated glass”*, International Journal of Impact Engineering pp.27-35.

BIBLIOGRAFIA – CAPITOLO 3

K. Bewilogua, G. Brauer, A. Dietz, J. Gaßler, G. Goch, B. Karpuschewski, B. Szyszka, 2009, *“Surface technology for automotive engineering”*, CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 pp. 608–627.

Th. Lampe, S. Eisenberg, E. Rodriguez Cabeo, 2003, *"Plasma surface engineering in the automotive industry—trends and future Prospectives"*, Surface and Coatings Technology vol. 1-7 pp.174 –175.

Alessandro Cannavale, Francesco Fiorito, Michele Manca, Giovanni Tortorici, Roberto Cingolani, Giuseppe Gigli, 2010, *"Multifunctional bioinspired sol-gel coatings for architectural glasses"*, Building and Environment 45 pp.1233–1243.

Lindah, Daniel, Stodell, Henric, *"A Human Factors Analysis of Optical Distortion in Automotive Glazing"*, Linköping University, Department of Management and Engineering.

Chanisada Tuchinda, Sabong Srivannaboon and Henry W Lim, *"Photoprotection by window glass, automobile glass and sunglasses"*, Department of Dermatology, Henry Ford Hospital, Detroit, Michigan, 2Department of Ophthalmology, Faculty of Medicine Siriraj Hospital, Bangkok, Thailand.

Xibao Li, Jinshan Lu, Zhijun Feng, 2013, *"Effect of hydrofluoric acid etching of glass on the performance of organic–inorganic glass laminates"*, Composites: Part B 52 pp. 207–210.

Y.L. Wu., Z. Chen , X.T. Zeng, 2008, *"Nanoscale morphology for high hydrophobicity of a hard sol–gel thin film"*, Applied Surface Science 254 (2008) 6952–6958, Journal of Non-Crystalline Solids 218 (1997) 335-341

Jonathan Tze Ming Lim, 2003, *"Evaluation of Superhydrophilic Polyelectrolyte Multilayered Films for Anti-fogging Applications"*, B.S. Chemical Engineering & Materials Science and Engineering University of California, Berkeley.

Takashige Yoneda, Takeshi Morimoto, 1999, *"Mechanical durability of water repellent glass"*, Thin Solid Films 351 pp. 279-283.

Victor F., Petrenko, Charles R., Sullivan, Valeri Kozlyuk, Fedor V., Petrenko, Victor Veerasamy, 2011, *"Pulse electro-thermal de-icer (PETD)"*, Cold Regions Science and Technology 65, pp.70–78.

BIBLIOGRAFIA – CAPITOLO 4

M. Grujicic, W.C. Bell, B. Pandurangan, 2012, *"Design and material selection guidelines and strategies for transparent armor systems"*, Materials and Design 34 pp.808–819.

Alex J. Hsieh, Daniel DeSchepper, Paul Moy, and Peter G. Dehmer, *"The Effects of PMMA on Ballistic Impact Performance of Hybrid Hard/Ductile All-Plastic- and Glass-Plastic-Based Composites"*, Army Research Laboratory.

SITOGRAFIA – CAPITOLO 1

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

<http://www.spevetro.it/webcalccomp/Introduzione.htm#Proprietà>

http://spazioinwind.libero.it/giovann_baldi/index.htm

<http://www.enco-journal.com/journal/ej17/sommario.htm?>

SITOGRAFIA – CAPITOLO 2

<http://www.glassforeurope.com/en/>

<http://www.howstuffworks.com/car-driving-safety/safety-regulatory-devices/auto-glass.htm>
www.pilkington.com
<http://www.aisglass.com/default.asp>
<http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=88#> Building Industry
http://www.glasslinks.com/history_auto.htm
<http://www.letsqglass.it/News-e-Articoli/Tecnologia.aspx>
<http://www.autoglassuniversity.com>
<http://www.agc-automotive.com/english/skill/core.html>
<http://www.enotes.com/topics/science>
<http://www.coastalcurvedglass.com/>

SITOGRAFIA – CAPITOLO 3

www.pilkington.com
www.p-pholding.com/it/tecnologia
<http://www.aiv.it/?q=content/tecniche-fisiche-deposizione-film-sottili>
www.sol-gel.it
www.solgel.it
<http://engineering.dartmouth.edu/research/engineering-innovation-for-ice-adhesion-and-friction-control>
www.agc-automotive.com
www.nanofab.it

SITOGRAFIA – CAPITOLO 4

Nessuno

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento speciale a mamma Antonella, al fratello Roberto e a mio papà che è in cielo. Inoltre un ringraziamento particolare al prof. Ing. Enrico Bernardo.