



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale ingegneria meccanica

Studio e progetto di vetri di sicurezza per macchine idrauliche ad alta pressione

Study and design of safety glass for high pressure hydraulic machines

Relatore: Chiar.mo/a

Prof. Marco Sasso

Correlatore: Chiar.mo/a

Dott. Luca Morichelli

Tesi di Laurea di:

Riccardo Ferri

A.A. 2022/2023

Indice

<u>1 Che cos'è il vetro e come è fatto</u>	4
<u>1.1 Introduzione</u>	4
<u>1.2 Il vetro nella storia: aspetti tecnici</u>	4
<u>1.3 Composizione</u>	5
<u>1.4 Fabbricazione</u>	6
<u>2 La qualità nel vetro</u>	8
<u>2.1 Indice di rifrazione, che cos'è?</u>	8
<u>2.1.1 Indice di rifrazione del vetro</u>	9
<u>2.1.2 Cosa succede quando un'onda elettromagnetica passa dall'aria al vetro?</u>	10
<u>2.2 Trasmissione luminosa</u>	11
<u>2.2.1 Trasmissione luminosa e tipologia di vetro</u>	12
<u>2.3 Trasparenza nel vetro</u>	12
<u>2.3.1 Confronto vetro trasparente ed extrachiaro</u>	15
<u>2.3.2 Vetro Float o extrachiaro?</u>	17
<u>3 Prova sperimentale</u>	19
<u>3.1 Introduzione del problema</u>	19
<u>3.2 Vetri di sicurezza</u>	19
<u>3.2.1 Vetro temprato termico</u>	20
<u>3.2.2 Vetro stratificato</u>	21
<u>3.2.3 Normative</u>	22

<u>3.3 Proprietà meccaniche del vetro</u>	27
<u>3.3.1 Comportamento termico del vetro</u>	28
<u>3.4 Scelta della tipologia di vetro</u>	29
<u>3.5 Messa a fuoco e prove di calibrazione</u>	29
<u>3.6 Sistema di bloccaggio del vetro</u>	33
<u>3.7 Svolgimento del test</u>	35
<u>3.8 Fase di elaborazione</u>	39
<u>4 Conclusioni</u>	40
<u>Bibliografia</u>	41
<u>Ringraziamenti</u>	43

1 Che cos'è il vetro e come è fatto

1.1 Introduzione

Il vetro è un materiale ottenuto tramite la solidificazione di un liquido non accompagnata dalla cristallizzazione. I vetri sono solidi amorfi, dunque non possiedono un reticolo cristallino ordinato, ma una struttura disordinata e rigida, composta da atomi legati covalentemente; tale reticolo disordinato permette la presenza di interstizi in cui possono essere presenti impurezze, spesso indesiderate, date da metalli.

I vetri possono essere ottenuti a partire da qualunque liquido, attraverso un rapido raffreddamento che non dia alle strutture cristalline il tempo di formarsi. Nella pratica, hanno la possibilità di solidificare sotto forma di vetro solo i materiali che abbiano una velocità di cristallizzazione molto lenta, come per esempio l'ossido di silicio (SiO_2), il diossido di germanio (GeO_2), l'anidride borica (B_2O_3), l'anidride fosforica (P_2O_5), l'anidride arsenica (As_2O_5).

Nel linguaggio comune il termine vetro viene utilizzato in senso più stretto, riferendosi solamente ai vetri costituiti prevalentemente da ossido di silicio (vetri silicei), impiegati come materiale da costruzione (soprattutto negli infissi), nella realizzazione di contenitori (per esempio vasi e bicchieri) o nella manifattura di elementi decorativi (per esempio oggettistica e lampadari). La maggior parte degli utilizzi del vetro derivano dalla sua trasparenza, dalla sua inalterabilità chimica e dalla sua versatilità: infatti, grazie all'aggiunta di determinati elementi, è possibile creare vetri con differenti colorazioni e proprietà chimico-fisiche. (1)

1.2 Il vetro nella storia: aspetti tecnici

Il vetro grazie alla sua estrema versatilità e capacità di essere tagliato, molato, foggato a caldo, temprato, ha sempre trovato, ed oggi più che mai, applicazione sempre più diffusa nell'edilizia,

nell'industria, nel costume. L'introduzione di particolari composti metallici, sciolti o dispersi nella massa allo stato colloidale, conferisce al vetro capacità di assorbimento selettivo della radiazione luminosa, e quindi colore. A seconda, quindi, dei diversi composti metallici utilizzati si avranno vetri di diversi colori (verde, grigio, bronzo, blu, ecc.). Per le sue peculiari caratteristiche di trasparenza e durezza superficiale rappresenta la miglior risposta al bisogno di contatto con l'esterno e, ad un tempo, protezione da esso, tipico dell'uomo moderno. Inserito in misura sempre maggiore nelle strutture contribuisce in modo spesso preponderante a determinare le caratteristiche meccaniche, acustiche, termiche. Per secoli la tecnologia produttiva ha condizionato le realizzazioni fatte col vetro. L'architettura, fino al 1800, è una rielaborazione di stili del passato. E' dall'inizio del 1900 che la storia vede come protagonista dell'evoluzione architettonica il vetro. Nasce il binomio vetro + acciaio e grandi precursori se ne servono per realizzare opere veramente rivoluzionarie. Cambia radicalmente un concetto; da materiale di tamponamento il vetro diventa componente primario della costruzione. Opere passate e recenti testimoniano la sua validità sia estetica che funzionale. L'industria vetraria si è messa al servizio del progettista con prodotti rispondenti alle necessità dei tempi. Nascono così vetrate ad alto contenuto tecnologico che contribuiscono a rendere la casa più confortevole. Ecco quindi i pannelli termicamente isolanti, i cristalli colorati filtranti e riflettenti, i cristalli temprati per la sicurezza, i vetri profilati, ecc. Ovviamente il vetro ha trovato forte applicazione anche in altri settori quali l'arredamento, l'illuminazione, l'oggettistica. Oggi vengono infatti realizzati veri e propri mobili in vetro e, questo è sempre più sfruttato come complemento d'arredo, consentendo ai designer di tutto il mondo di dar vita ai loro progetti. (2)

1.3 Composizione

I vetri in uso nel settore industriale sono generalmente composti da silice (come sabbia), soda (come carbonato), uno stabilizzante (in genere calce) e vari altri ossidi, come l'allumina e il magnesio.

I vetri silico-sodo-calcici hanno la seguente composizione:

- un vetrificante, la silice, introdotta sotto forma di sabbia (dal 70 al 72%),
- un fondente, la soda, sotto forma di carbonato o di solfato (14% circa),
- uno stabilizzante, la calce, sotto forma di calcare (10% circa),
- vari altri ossidi, come l'allumina e il magnesio che servono a migliorare le proprietà fisiche del vetro, in particolare la resistenza all'azione degli agenti atmosferici,
- per alcuni tipi di vetri, l'introduzione di particolari ossidi metallici consente la colorazione nella massa (PARSOL).

Al miscuglio vetrificabile viene aggiunto del rottame di vetro al fine di abbassare la temperatura di fusione. Il trasporto, la pesatura, la miscelazione e l'inserimento nel forno avvengono automaticamente. Il miscuglio viene umidificato in modo da evitare la separazione tra i diversi componenti e la fuoriuscita di polvere. (4)

1.4 Fabbricazione

La prima parte della fabbricazione del vetro avviene tramite l'utilizzo di un forno ed è suddiviso in tre fasi:

- la fusione, nel corso della quale le materie prime vengono fuse a temperature vicine ai 1550 °C;
- il processo di omogeneizzazione del vetro fuso, che comprende l'affinaggio per l'eliminazione delle bolle gassose;
- il condizionamento termico, in cui il vetro, in condizioni di bassa viscosità, viene raffreddato fino a raggiungere una maggiore viscosità corrispondente alle esigenze del processo di formazione.

Il vetro allo stato pastoso viene versato su un bagno di stagno fuso a circa 1.000°C. Il vetro, che presenta una densità inferiore a quella dello stagno, vi "galleggia", formando un nastro di spessore naturale compreso tra 4 e 6 mm.

Alcuni dispositivi consentono l'accelerazione o la riduzione dello spandersi del vetro per determinarne lo spessore.

All'uscita dal bagno di stagno, il nastro di vetro ormai rigido passa attraverso un forno di ricottura. Successivamente la temperatura del vetro si abbassa in maniera controllata da 620°C a 250°C. Segue poi un raffreddamento lento all'aria per eliminare le tensioni interne al vetro che potrebbero determinarne la rottura nel corso delle operazioni di taglio, il quale rappresenta l'ultima fase nel processo di fabbricazione e dove il nastro di vetro raffreddato viene tagliato automaticamente in lastre di opportuna dimensione. (Figura 1.1) (4)



Figura 1.1 produzione delle lastre di vetro (3)

2 La qualità nel vetro

2.1 Indice di rifrazione, che cos'è?

Quando un'onda elettromagnetica attraversa la superficie di separazione fra due sostanze trasparenti (come ad esempio aria e acqua oppure aria e vetro), il raggio incidente subisce una deviazione rispetto alla sua direzione iniziale. Tale fenomeno è noto con il nome di rifrazione.

Per ogni sostanza trasparente (acqua, aria, vetro, etc.) possiamo definire un valore dell'indice di rifrazione assoluto dato dal rapporto tra c (velocità della luce nel vuoto) e v (velocità in m/s dell'onda elettromagnetica nel mezzo considerato).

L'indice di rifrazione è indicato con la lettera n ed è una grandezza adimensionale (ovvero priva di unità di misura) il cui valore è determinabile, come spiegato in precedenza, applicando la seguente formula:

$$n = \frac{c}{v} > 1$$

in cui:

- c = velocità della luce nel vuoto; $c = 3 \cdot 10^8$ m/s;

- v = velocità in m/s dell'onda elettromagnetica nel mezzo considerato.

Poiché $c > v$ vale sempre $n > 1$.

In particolare:

- $n > 1$ per sostanze con bassa densità;

- $n \gg 1$ per sostanze con elevata densità.

L'indice di rifrazione dipende dalla lunghezza d'onda della onda elettromagnetica incidente, dalla temperatura e per i gas anche dalla pressione poiché la pressione influenza la densità del gas. (Figura 2.1) (5)

Mezzo o sostanza	Indice di rifrazione	Velocità di propagazione
vuoto	1	$3 \cdot 10^8$ m/s
aria	1,00029	$2,999 \cdot 10^8$ m/s
acqua	1,33	$2,26 \cdot 10^8$ m/s
ghiaccio	1,31	$2,29 \cdot 10^8$ m/s
sale	1,54	$1,95 \cdot 10^8$ m/s
alcohol	1,36	$2,2 \cdot 10^8$ m/s
vetro (Crown)	1,5	$2 \cdot 10^8$ m/s
vetro (Flint)	1,65	$1,82 \cdot 10^8$ m/s
solfo di carbonio	1,63	$1,84 \cdot 10^8$ m/s
sodio liquido	4,22	$0,7 \cdot 10^8$ m/s
arseniuro di gallio	3,6	$0,83 \cdot 10^8$ m/s
silicio	3,4	$0,88 \cdot 10^8$ m/s
diamante	2,417	$1,24 \cdot 10^8$ m/s
quarzo	1,51	$1,98 \cdot 10^8$ m/s

Figura 2.1 tabella indici di rifrazione di alcune sostanze (5)

2.1.1 Indice di rifrazione del vetro

L'indice di rifrazione del vetro viene assunto pari a 1,5; è importante però notare che l'indice di rifrazione dipende, come detto in precedenza, dalla lunghezza d'onda dell'onda elettromagnetica incidente e dalla temperatura. Quindi, considerando le varie lunghezze d'onda delle onde elettromagnetiche che compongono la luce, per ognuna di esse si avrà un indice di rifrazione diverso che può assumere valori compresi tra 1,522 e 1,507:

-per il violetto l'indice di rifrazione del vetro è 1,522

-per il blu l'indice di rifrazione del vetro è 1,516

-per il giallo l'indice di rifrazione del vetro è 1,510

-per il rosso l'indice di rifrazione del vetro è 1,507

(6)

2.1.2 Cosa succede quando un'onda elettromagnetica passa dall'aria al vetro?

Passando dall'aria al vetro un'onda elettromagnetica subisce una deviazione rispetto alla sua direzione iniziale: l'angolo rispetto alla normale dell'onda incidente (indicato nella figura seguente con la lettera i) è infatti superiore all'angolo rispetto alla normale dell'onda rifratta (indicato nella figura seguente con la lettera r); in altre parole il raggio incidente "piega" verso la perpendicolare alla superficie nel punto di incidenza. (Figura 2.2)



Figura 2.2 processo di rifrazione (6)

Poiché l'angolo di incidenza i e quello di rifrazione r sono legati agli indici di rifrazione sia del mezzo da cui proviene la luce sia del mezzo verso cui penetra, allora si spiega che ogni frequenza della luce viene deviata dal vetro secondo un angolo leggermente diverso: il violetto,

per il quale l'indice di rifrazione è maggiore, subirà una deviazione maggiore, mentre il rosso, per il quale l'indice di rifrazione è minore, subirà una deviazione minore. Tutto ciò spiega il fenomeno della dispersione della luce (Figura 2.3) (6)

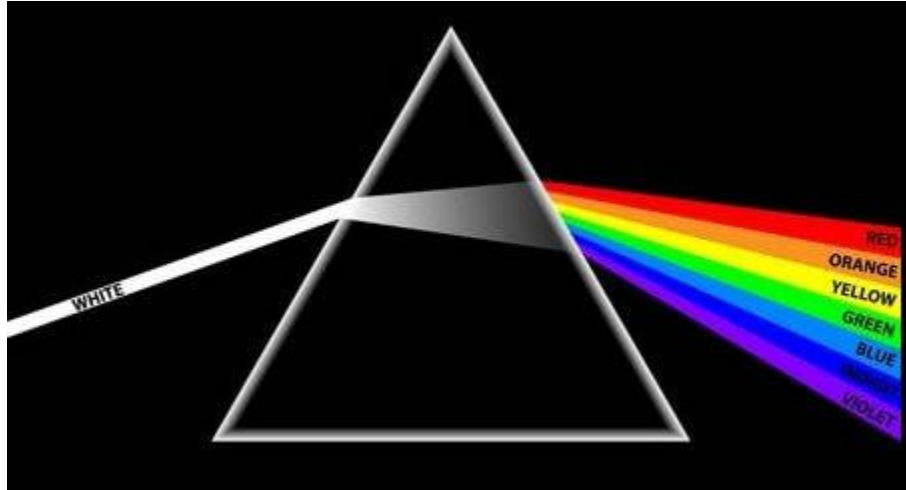


Figura 2.3 dispersione della luce (6)

2.2 Trasmissione luminosa

La Trasmissione Luminosa (TL) esprime la quantità di luce trasmessa attraverso il vetro, quindi di raggi visibili ed è sempre espressa in percentuale %. Questo rapporto riguarda il comportamento di una vetrata rispetto alla luce, ovvero le radiazioni elettromagnetiche comprese tra $0.4\mu\text{m}$ e $0.76\mu\text{m}$. Il calcolo della trasmissione luminosa consiste nel tracciare la curva spettrale dell'energia visibile trasmessa pesata secondo la sensibilità spettrale dell'occhio e fare il rapporto tra l'area che è delimitata da questa curva e l'area della curva dell'illuminante. L'andamento dell'energia emessa da una sorgente all'interno di quell'intervallo è dipendente dalla natura della sorgente e dalla sua temperatura. (7)

2.2.1 Trasmissione luminosa e tipologia di vetro

È importante sapere che un vetro con trasmissione luminosa elevata e basso fattore solare garantisce buona illuminazione diurna e bassi carichi solari. Una buona TL per un vetro doppio è 70% ottima è 80% la parte restante viene respinta e riflessa verso l'esterno. I vetri selettivi consentono un'alta trasmissione luminosa pur isolando efficacemente dal caldo estivo. Ovviamente la TL è influenzata dal numero e dallo spessore delle lastre di vetro, perché più questo è spesso (come, per esempio, un vetro blindato) più farà passare meno luce. E così per i vetri tripli, che avendo una lastra di vetro in più, fanno passare meno luce del vetro doppio. Un aiuto all'aumento della Trasmissione Luminosa è la scelta di vetri extrachiari, che essendo molto più trasparenti dei normali vetri fanno passare più luce. I valori della trasmissione luminosa sono diversi dal fattore solare (FS) in quanto viene tenuta in conto solamente la componente visibile del flusso radioattivo, ovvero la luce percepibile ai nostri occhi. (7)

2.3 Trasparenza nel vetro

La trasparenza è la caratteristica che contraddistingue il vetro da tutti gli altri materiali da costruzione, dando la possibilità di mantenere costantemente il rapporto visivo tra l'ambiente confinato e quello esterno.

Questa caratteristica è dovuta alla struttura reticolare del materiale. La differenza che corre tra un materiale trasparente e uno opaco è data dal fatto che in un materiale opaco gli atomi sono disposti secondo una struttura ordinata (si dice che il materiale è cristallino), in uno trasparente invece essi sono disposti secondo una struttura disordinata (e il materiale viene definito amorfo).

Di conseguenza la trasparenza del vetro è data proprio dal suo essere un solido amorfo, questo perché in un materiale amorfo, non essendoci una disposizione ordinata degli atomi, vi è anche più spazio tra essi, ciò permette alla luce di poter filtrare e quindi di poter vedere attraverso. (Figura 2.4) (8)

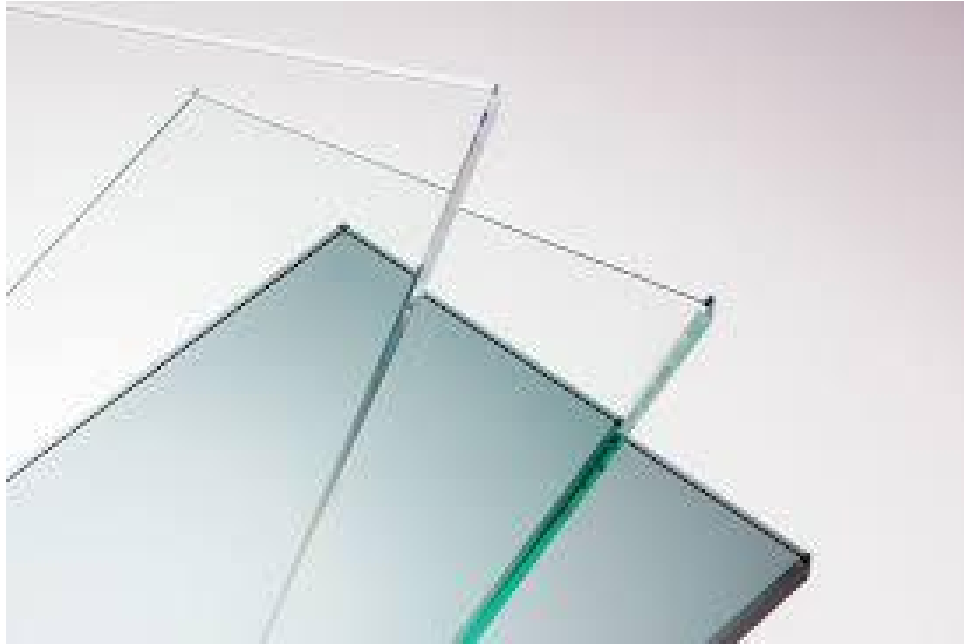


Figura 2.4 vetro trasparente (9)

Esistono 3 gradi di trasparenza nel vetro: trasparente, satinato e laccato:

-il vetro trasparente è della tipologia soprariportata e sono dotati del massimo grado di trasparenza, consentendo passaggio di luce da un ambiente all'altro e permettendo una completa integrazione con il paesaggio esterno.

-il vetro satinato presenta un ridotto grado di trasparenza, assicurando il passaggio di luce ma non permettendo di vedere nitidamente cosa c'è al di là del vetro. (Figura 2.5)



Figura 2.5 vetro satinato (11)

-i vetri laccati, opachi o lucidi, non lasciano passare luce e possono sembrare a primo occhio delle ante di un armadio. Questa loro caratteristica è dovuta a un rivestimento duraturo di vernice depositato su un lato del foglio di vetro che garantisce una colorazione duratura e resistente all'umidità. (Figura 2.6)

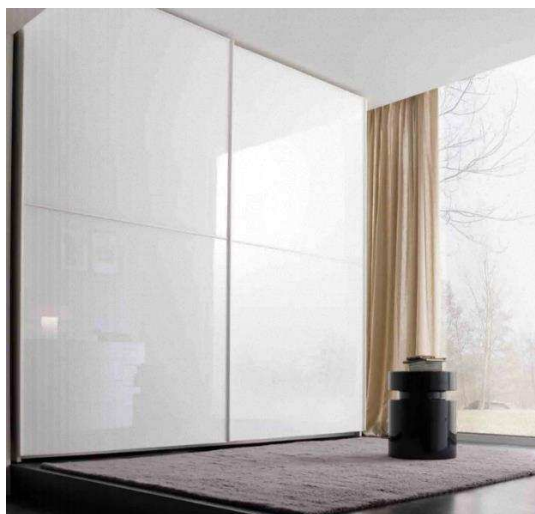


Figura 2.6 vetro laccato (12)

Oltre alle gradazioni soprariportate esiste un'altra tipologia di vetro denominata vetro extrachiaro, il quale può essere preferito al vetro trasparente nelle varie applicazioni in base agli obiettivi che si intende perseguire. (10)

2.3.1 Confronto vetro trasparente ed extrachiaro

Il Vetro Trasparente, chiamato anche Float dal tipo di procedimento con cui è ottenuto, è il comune vetro e il più usato. Il 95% di tutti i vetri installati nelle abitazioni è di questa tipologia e la sua colorazione tendente al verde è data dalla presenza al suo interno di ossido di ferro. Gli aspetti che hanno favorito l'utilizzo e la diffusione di questa varietà di vetro riguardano il suo costo, più contenuto rispetto al vetro extrachiaro e il fattore solare. Infatti, se ci sono problemi di troppo irraggiamento e quindi la possibilità di eccesso di caldo il vetro trasparente risulta più schermante. Di solito viene utilizzato per gli infissi, ma anche per altri prodotti come tavoli, specchi e porte.

Il Vetro Extrachiaro (o vetro extralight) è un vetro al quale è stato eliminato circa il 90% dell'ossido di ferro e già dall'origine viene selezionata una tipologia di silice, un materiale basilare per la fabbricazione del vetro, più pura. Essendo privo di impurità rimane molto più trasparente del comune vetro, ha una resa estetica migliore quasi da apparire completamente invisibile. Questa differenza di tonalità di trasparente è tanto più marcata quanto è più spesso il vetro utilizzato. Con un vetro di spessori standard questa differenza è difficilmente rilevabile, ma con spessori importanti del vetro la differenza si vede chiaramente. Dà una grande luminosità perché fa passare una percentuale più elevata di luce all'interno dell'abitazione rispetto al vetro trasparente avendo una trasmittanza luminosa più alta e non altera le tonalità di ciò che ha intorno risultando più confortevole anche per la vista. È perfetto per la realizzazione di una grande vetrata perché ha una resa eccezionale. Il vetro extra-chiaro viene inoltre utilizzato quando ci si trova in situazioni in cui c'è un elevato rischio di rottura del vetro dovuta a shock termico. Questa tipologia di vetro infatti risponde meglio a questa situazione diminuendo notevolmente il rischio di rottura. (Figura 2.7) (Figura 2.8) (13)

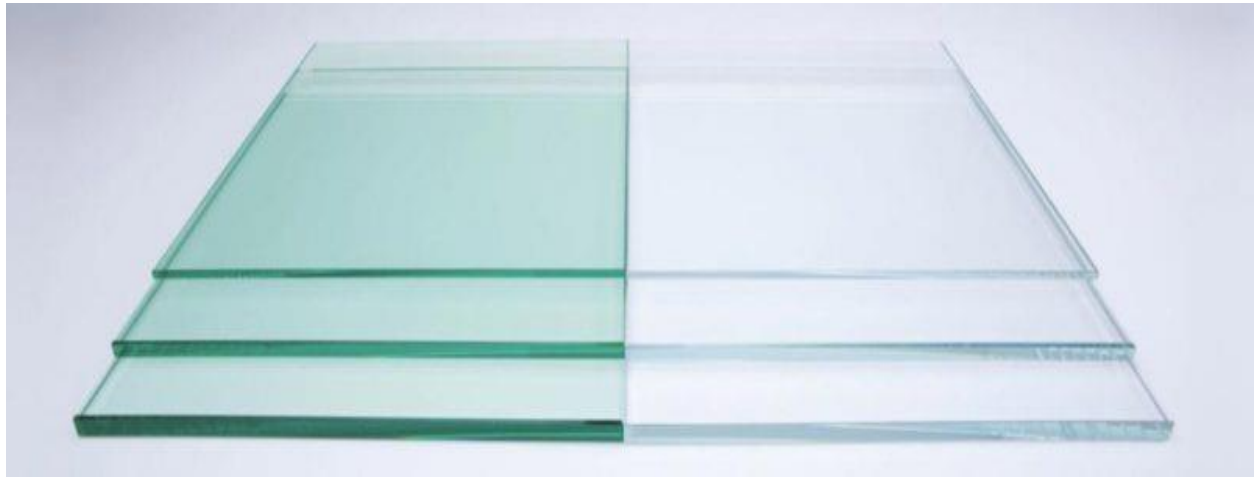


Figura 2.7 confronto vetro float e vetro extrachiaro (13)



Figura 2.8 confronto vetro float e vetro extrachiaro (14)

2.3.2 *Vetro Float o extrachiaro?*

I vantaggi dell'extrachiaro rispetto ad un comune float sono:

-trasparenza elevata: la trasmissione luminosa è superiore soprattutto se lo spessore è elevato.

-eccellente neutralità in trasmissione: la resa dei colori e il contrasto sono ottimizzati. I colori degli oggetti restano vivi e naturali.

-colorazione molto tenue: nel caso di vetro spesso l'impiego di extrachiaro consente di ottenere una vetrata pressoché incolore. La colorazione verdastra propria dei vetri molto spessi viene notevolmente attenuata

-brillantezza e profondità: nelle vetrate smaltate o laccate l'assenza di riflesso verde sulla lastra del vetro garantisce un colore particolarmente brillante.

Tutte queste caratteristiche rendono il vetro extrachiaro più costoso rispetto al vetro tradizionale.

Le differenze di prestazioni che ci sono tra le due tipologie se prendiamo come esempio un vetro monocamera sono:

-Trasmittanza luminosa, ovvero luce che entra. Circa 5-6%, può sembrare poco ma fa un po' differenza in termini visivi.

-Fattore solare, ovvero calore che entra. Circa 4-5%, non è molto ma fa una piccola differenza in termini energetici.

-Isolamento termico, ovvero calore che trattiene. Non ci sono differenze a parità di basso emissivo.

In conclusione il vetro extrachiaro è l'ideale dove si vuole ottenere una resa estetica migliore che risulta fondamentale nei progetti dove non si vuole alterare la resa dei colori, mentre il vetro trasparente è la scelta ideale se si intende se c'è l'esigenza di eliminare il calore. Infatti ha un fattore solare leggermente migliore rispetto all'extrachiaro. Inoltre rappresenta sicuramente la scelta più vantaggiosa dal punto di vista economico. Entrambi hanno in comune la grande

flessibilità di utilizzo e la facilità con cui possono essere puliti. Quindi la scelta tra vetro trasparente o extrachiaro va analizzata a seconda del risultato che si desidera ottenere. (14) (15)

3 Prova sperimentale

3.1 Introduzione del problema

Per analizzare quello che può essere un risvolto pratico dell'utilizzo del vetro andiamo ad analizzare lo svolgimento di una prova sperimentale svolta in laboratorio. L'attività riguarda lo svolgimento di un Bulge test su un provino rappresentato da un alluminio AA5754, tramite l'utilizzo di una macchina idraulica ad alta pressione che pomperà olio su di esso. La deformazione del provino verrà ripresa da due telecamere attraverso il vetro e successivamente elaborata da un software.

Per permettere la corretta riuscita del test è necessario definire un apposito sistema coperchio-vetro che isoli il provino in deformazione così da consentire lo svolgimento della prova in sicurezza. In particolare i punti principali sono:

1. La scelta della tipologia del vetro di sicurezza
2. La definizione del sistema di bloccaggio del vetro sul coperchio

Per poter effettuare e giustificare la scelta del vetro è necessario prima approfondire il tema dei vetri di sicurezza.

3.2 Vetri di sicurezza

Il vetro è presente in molti tipi di applicazione, è un elemento strutturale che si trasforma, adattandosi alle esigenze di progettisti, architetti e vetrai, ma che allo stesso tempo deve fornire delle garanzie di sicurezza.

Un vetro può rompersi per molte ragioni, per esempio un colpo d'aria, un urto accidentale, un tentativo di effrazione, la cosa importante è che il vetro rotto non diventi pericoloso. Ed è per questo motivo che vengono utilizzati degli appositi vetri di sicurezza. Si definisce di sicurezza un vetro che deve garantire l'incolumità nostra e delle persone che ci stanno vicino. Esistono due principali tipologie di vetri di sicurezza, che sono:

1. Il vetro temprato termico
2. Il vetro stratificato (16) (17)

3.2.1 Vetro temprato termico

Il termine che usiamo per indicare questo materiale deriva dalla tempra, il trattamento a cui devono essere sottoposte le lastre di vetro. Si tratta di un processo termico che porta il vetro “normale” a una temperatura di circa 700°C per poi raffreddarlo subito dopo e velocemente. Agendo in questo modo si ottiene un effetto particolare sul vetro, simile a quello che avrebbe una compressione superficiale, con il risultato di accrescere la resistenza dalla lastra nei confronti delle sollecitazioni di tipo meccanico come gli urti, ma anche nei confronti di shock termici, di nuovo. La parte interna del vetro si raffredda molto gradualmente e ciò causa una compressione verso la superficie.

Il vetro, quando si rompe, va incontro a una pericolosa frantumazione in poche schegge grandi e molto taglienti, a punta e/o frastagliate. Le caratteristiche del vetro temperato, invece, fanno sì che esso si rompa in numerosi piccoli frammenti ovali, dai bordi smussati e non taglienti, che molto difficilmente possono provocare ferite. Il vetro temperato ha delle impressionanti performance dal punto di vista della sicurezza e per la sua struttura si dimostra anche molto adatto a realizzare vetrate e facciate continue. Lo troviamo quindi molto spesso impiegato per finestre ma anche grandi vetrine ed elementi strutturali in vetro di vario genere. È un vetro più robusto di quelli di altre tipologie e come se non bastasse è anche facilissimo da pulire.

Ha una resistenza meccanica e all’urto quattro volte maggiore del vetro ricotto, più economico e comunque pericoloso in rottura. Ha uno spessore fino a cinque volte superiore al vetro comune. Resiste bene alla sollecitazione termica e sopporta variazioni di temperatura di 200°C circa. La sua resistenza alla rottura per flessione è di 120 N/mm² contro il vetro stampato che raggiunge i 90 N/mm² e il vetro smaltato con 75 N/mm². (Figura 3.1) (18)



Figura 3.1 vetro temprato termico (18)

3.2.2 Vetro stratificato

Il vetro stratificato è composto da due o più lastre di vetro unite tra loro da una pellicola speciale di materiale plastico, resistente allo strappo e che, in caso di rottura anche violenta, tiene attaccati insieme i pezzi di vetro, evitando possibili ferite da taglio. Questa pellicola è trasparente e viene indicata con la sigla PVB (cioè PoliVinilButirrale), mediante processi termici e di pressatura aderisce perfettamente al vetro, garantendo ottime condizioni di sicurezza. Per assicurare una protezione di base contro gli infortuni è sufficiente che questa pellicola sia spessa almeno 0,38 mm oppure 0,76 mm (si mettono insieme due pellicole da 0,38 mm). Quando il vetro stratificato si rompe, assomiglia molto ad una ragnatela; così come accade per un parabrezza dopo uno scontro, i pezzi di vetro non si disperdono in giro ma rimangono nella loro

sede, attaccati alla pellicola, non costituendo pericolo per l'incolumità di persone e animali.
(Figura 3.2) (19)

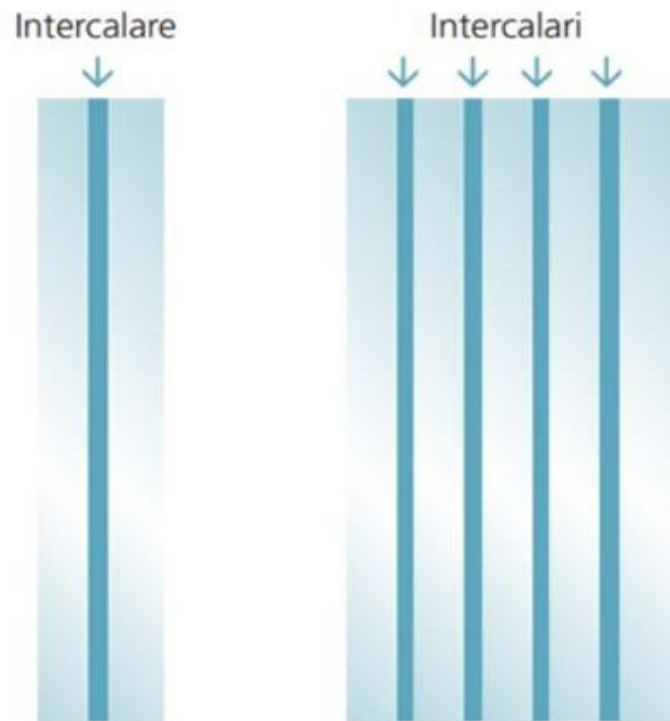


Figura 3.2 vetro stratificato (16)

3.2.3 Normative

Le normative principali che stabiliscono gli standard di sicurezza, che classificano e che guidano alla scelta delle diverse tipologie di vetri di sicurezza sono la norma UNI 7697 e la UNI EN 12600. La sicurezza del vetro è regolamentata dalla norma UNI 7697 che classifica i vetri per applicazione e montaggio, indicando quelli più idonei, quindi "non pericolosi" in caso di rottura. La norma distingue le vetrate in:

- esterne, quando sono posizionate all'esterno o quando separano un ambiente esterno da uno interno;
- interne, sono posizionate all'interno o separano due ambienti interni;
- verticali, se l'angolo di montaggio rispetto la verticale è $\leq 15^\circ$;
- orizzontali, se l'angolo di montaggio rispetto la verticale è $> 30^\circ$;
- inclinate, se l'angolo di montaggio rispetto la verticale compreso tra 15° e 30° ;
- accessibili, quando le persone possono venirne a contatto nelle condizioni di impiego previsto;
- non accessibili, le persone non possono venirne a contatto;
- protette, si sono adottati accorgimenti che eliminano in modo certo il rischio connesso ad un'eventuale rottura delle lastre;
- non protette, non si sono adottati gli accorgimenti di cui sopra.

La norma definisce anche le azioni e le sollecitazioni che possono causare la rottura di un vetro, ovvero:

- carichi dinamici: da vento, folla, traffico pedonale, onde di pressione...
- carichi statici: peso proprio, carichi, neve, pressione in acquari e piscine...
- urti dovuti a fenomeni atmosferici
- vibrazioni
- carichi ed urti accidentali non diversamente contemplati
- esplosioni
- urti dovuti all'impatto di una persona
- urti di corpi rigidi, colpi di mazza e/o d'ascia, atti vandalici, effrazione
- urti di proiettile

- incendi.

La norma UNI EN 12600, conosciuta come "prova del pendolo" classifica i vetri a seconda del comportamento e della modalità di rottura di questi dopo esser colpiti da un pendolo che simula l'urto di un corpo molle (che rappresenta l'urto di una persona).

Il pendolo è costituito da due speciali pneumatici ed ha un peso di $50 \pm 0,1$ kg. La modalità di rottura osservata, messa in relazione con l'altezza da cui è stato lanciato il pendolo, sono i parametri per classificare le varie tipologie di vetro. (Figura 3.3)

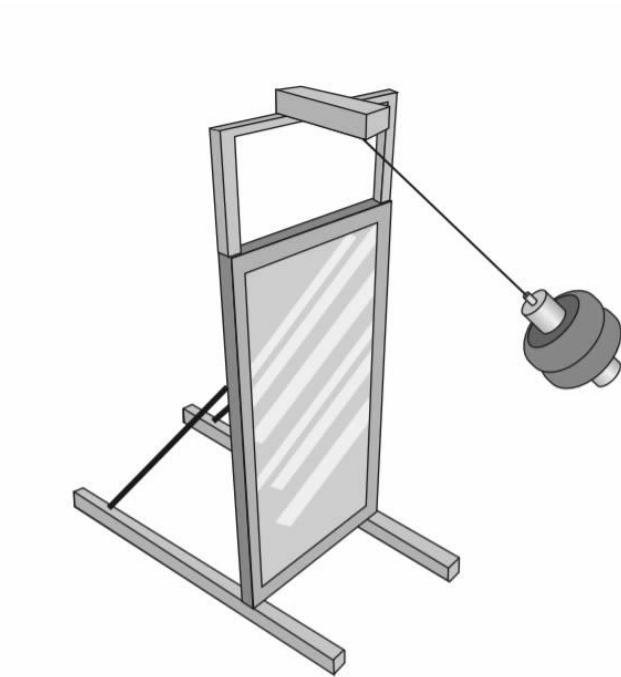


Figura 3.3 prova del pendolo (16)

Di seguito vengono riportati i tipi di frantumazione riscontrati nei vari tipi di vetro:

- Tipo di rottura A: tipica del vetro float. La frammentazione non è di sicurezza in quanto presenta crepe con frammenti separati. (Figura 3.4)

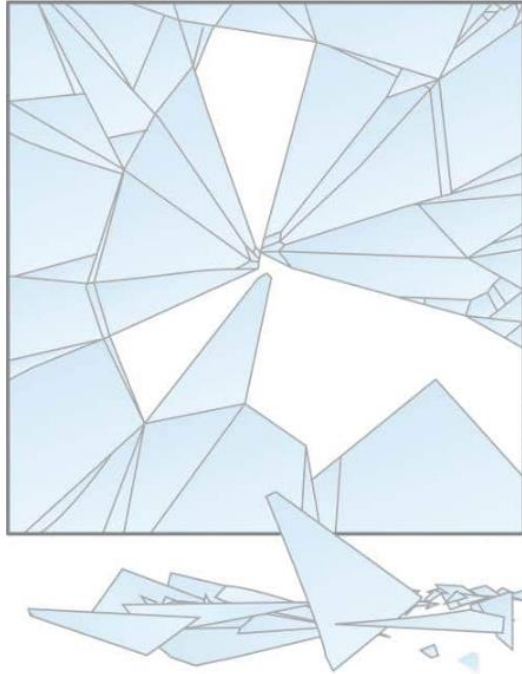


Figura 3.4 frammentazione vetro float (16)

-Tipo di rottura B: tipica del vetro stratificato. La frammentazione è integra, i frammenti rimangono uniti e non si separano. (Figura 3.5)

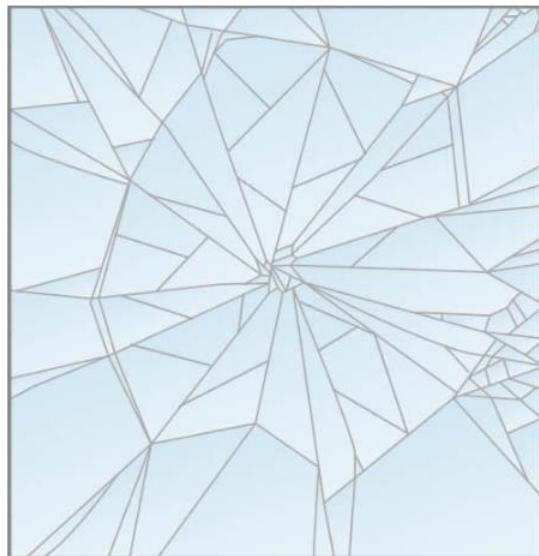


Figura 3.5 frammentazione vetro stratificato (16)

-Tipo di rottura C: tipica del vetro temprato termicamente. Disintegrazione totale in piccole particelle innocue. (Figura 3.6)

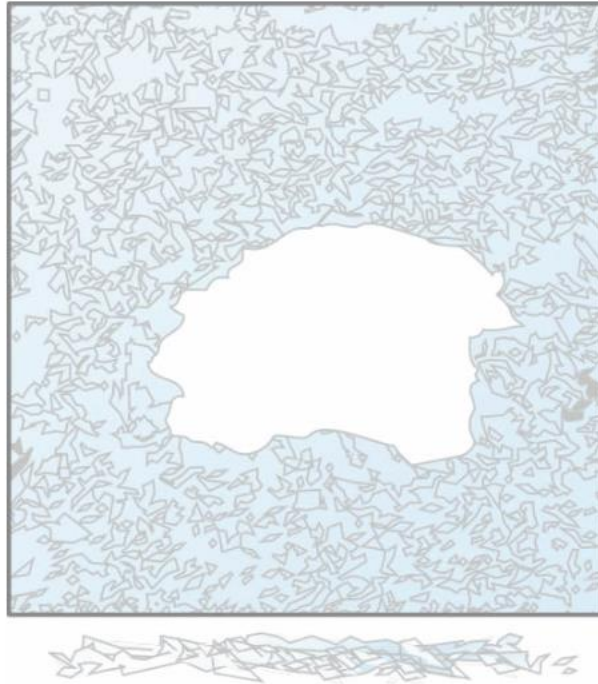


Figura 3.6 frammentazione vetro temprato termico (16)

Altre norme sono:

- EN 356: Vetro per edilizia - Vetro di sicurezza – Prove e classificazione di resistenza contro l'attacco manuale. I vetri sono definiti in otto classi (dalla P1A alla P5A e dalla P6B alla P8B) in funzione delle loro proprietà di effrazione.
- EN 1063: Vetro per edilizia – Vetrate di sicurezza – Classificazione e prove di resistenza ai proiettili. Sono definite nove classi di vetro in base a loro livello di protezione.
- EN 13541: Vetro per edilizia – Vetro di sicurezza – Prove e classificazione della resistenza alla pressione causata da esplosioni. (16)

3.3 Proprietà meccaniche del vetro

Il vetro ha densità pari a $(2,5 \cdot 10^{-6}) \text{Kg/mm}^3$, che corrisponde, nel caso dei vetri piani, ad una massa di 2,5 kg per ogni m^2 e per ogni mm di spessore. Esso presenta inoltre un'elevatissima resistenza alla compressione ($1\,000 \text{ N/mm}^2 = 1\,000 \text{ MPa}$). Ciò vuol dire che, per rompere un cubo di vetro di 1 cm di lato, occorre un carico dell'ordine di 10 tonnellate. I vetri presentano anche una determinata resistenza alla flessione, in particolare un vetro sollecitato a flessione presenta una faccia in compressione ed una in trazione. Il valore di resistenza alla rottura di un vetro flesso è dell'ordine di:

- 40 MPa (N/mm^2) per vetri di base levigati;
- da 120 a 200 MPa (N/mm^2) per vetri temprati (variabile secondo lo spessore, la molatura dei bordi e il tipo lavorazione).

Il valore elevato di resistenza del vetro temprato è dovuto al fatto che il processo determina una differenza di compressione tra le due facce della lastra trattata. Una formula che mette in relazione lo spessore con la sollecitazione è la seguente:

$$s = b * \sqrt{\frac{\beta * 10^3 * a}{n * \sigma}}$$

- s : spessore
- β : coefficiente di deformazione
- b : lunghezza lastra
- a : altezza lastra
- σ : sollecitazione a flessione
- n : numero di lastre

Il vetro è un materiale estremamente elastico, che non presenta mai deformazioni permanenti. Esso presenta tuttavia caratteristiche di fragilità ovvero, quando è sottoposto ad un carico crescente a flessione, si rompe senza alcun preavviso. (4) (20)

3.3.1 Comportamento termico del vetro

Data la scarsa conduttività termica del vetro, il riscaldamento o il raffreddamento parziale di una vetrata determina in questa delle sollecitazioni che possono provocare rotture cosiddette termiche. L'esempio più comune di rischio di rottura termica è quello rappresentato dai bordi coperti di un vetro ad elevato assorbimento energetico, che in presenza di forte irraggiamento solare si riscaldano più lentamente della superficie esposta. Nei casi in cui le condizioni di utilizzo o di posa in opera rischiano di determinare in un vetro considerevoli differenze di temperatura, sarà necessario adottare delle precauzioni in fase di posa o di lavorazione. Con un trattamento termico complementare, come la tempra, si consente al vetro di sopportare delle differenze di temperatura sino ai 200°C.

Qui di seguito viene riportata una tabella riassuntiva di tutte le proprietà fisiche del vetro (Figura 3.7). (4)

Proprietà	Simbolo	Unità di misura	Valore
Densità	ρ	[kg/m ³]	2250 ÷ 2750
Modulo di Young	E	[MPa]	63000 ÷ 77000
Coefficiente di Poisson	ν	[-]	0.20 ÷ 0.24
Coefficiente di dilatazione termica	α	[$\mu\text{m}/(\text{m K})$]	3.1 ÷ 6 ⁽¹⁾ 9 ⁽²⁾
Calore specifico	C_p	[J/(kg K)]	720 ⁽¹⁾ 800 ⁽²⁾
Coefficiente di conducibilità termica	λ	[W/(m K)]	0.9 ÷ 1
Tenacità – valore critico del fattore di intensificazione degli sforzi (in modo I)	K_{IC}	[MPa m ^{1/2}]	0.75
Temperatura di transizione		[°C]	530
Massima temperatura di servizio		[°C]	280
⁽¹⁾ vetro borosilicato			
⁽²⁾ vetro silicato sodio-calcico			

Figura 3.7 tabella proprietà vetro (21)

3.4 Scelta della tipologia di vetro

Per lo svolgimento della prova, dopo una serie di valutazioni, è stato scelto di utilizzare un vetro extrachiaro di spessore 6 mm e di diametro 395 mm e non un vero e proprio vetro di sicurezza.

Il primo motivo è la disponibilità di quest'ultimo sul mercato e quindi la sua reperibilità, mentre il secondo motivo è dovuto alle sue caratteristiche messe a confronto con quelle dei vetri di sicurezza. I vetri di sicurezza sopra descritti presentano delle caratteristiche che non sono adatte alle condizioni di svolgimento del test, per via della loro composizione e dei trattamenti a cui sono sottoposti. Essi infatti presentano spessori più elevati e indici di rifrazione maggiori, portando così a una peggiore trasparenza e una peggiore resa dei colori. Queste caratteristiche interferirebbero con l'attività delle telecamere che avranno il compito di riprendere la deformazione del provino e dovranno essere quindi messe nelle migliori condizioni possibili. Il vetro extrachiaro invece presenta livelli di trasparenza più elevati e una migliore resa dei colori e potrebbe essere la scelta migliore per il test. La sua validità dovrà essere confermata o smentita dalle prove di calibrazione.

3.5 Messa a fuoco e prove di calibrazione

I primi passi nella realizzazione del test sono la messa a fuoco e la calibrazione delle telecamere. La calibrazione è l'operazione grazie alla quale gli strumenti vengono regolati in modo da migliorarne l'accuratezza in modo che le deviazioni di misura siano le più piccole possibili e non superino i limiti di errore. Essa viene svolta utilizzando un apposito calibratore. (Figura 3.8) (Figura 3.9)

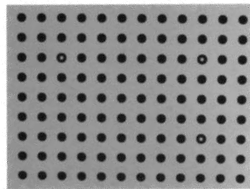


Figura 3.8 calibratore



Figura 3.9 telecamere

Sono state effettuate 6 prove di calibrazione, svolte in punti differenti, per verificare l'influenza dell'indice di rifrazione del vetro. Qui di seguito vengono riportati i risultati:

- calibrazione 1 (Figura 3.10):

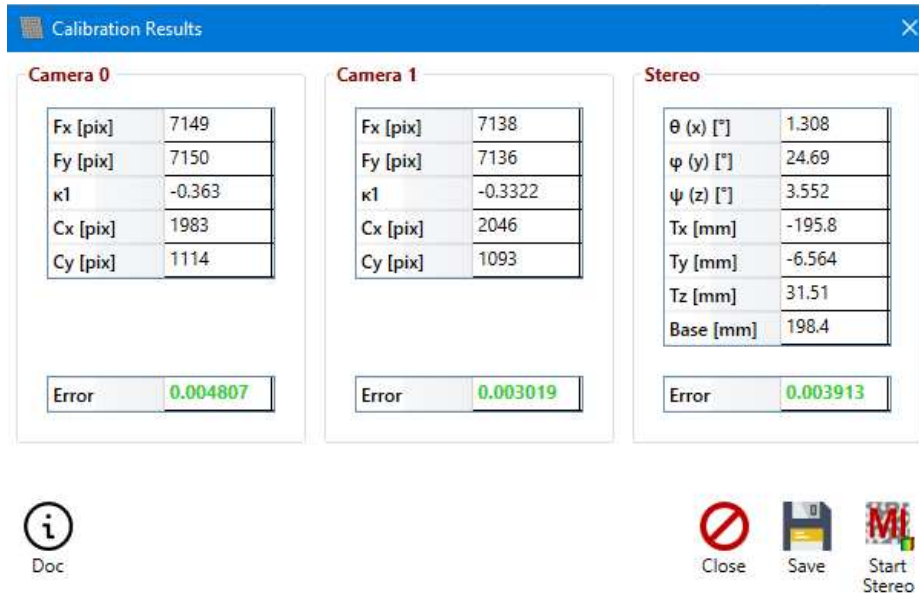


Figura 3.10

- calibrazione 2 (Figura 3.11):

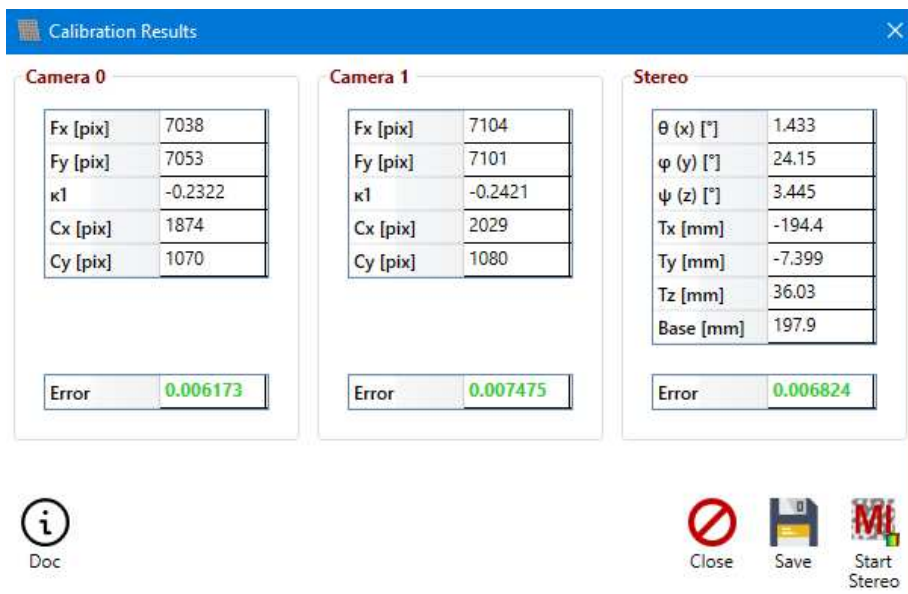


Figura 3.11

- calibrazione 3 (Figura 3.12):

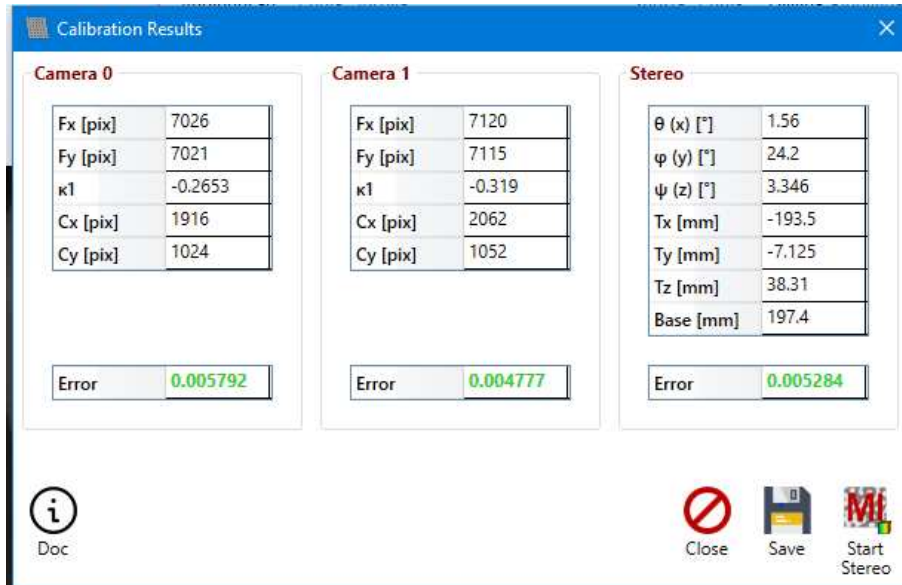


Figura 3.12

- calibrazione 4 (Figura 3.13):

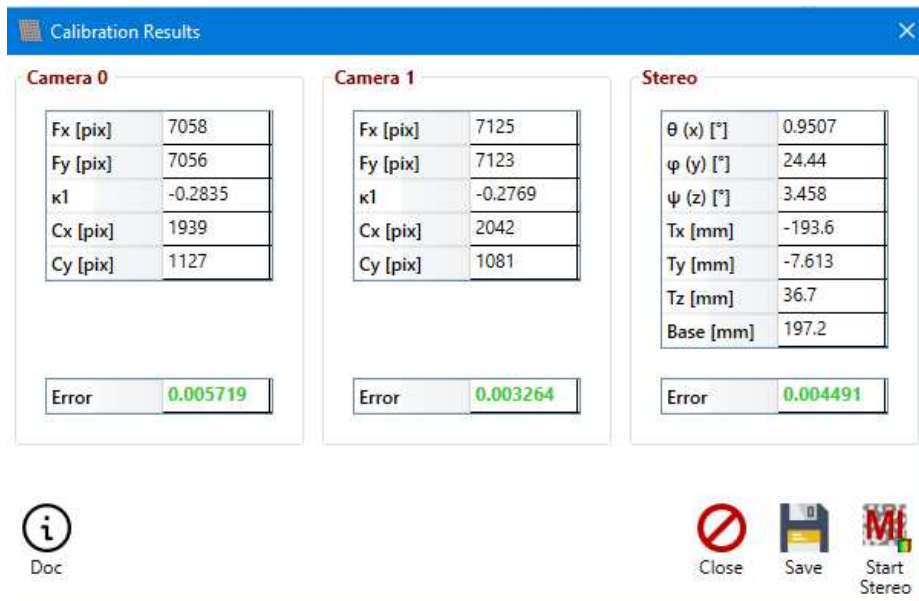


Figura 3.13

- calibrazione 5 (Figura 3.14) effettuata senza il vetro:

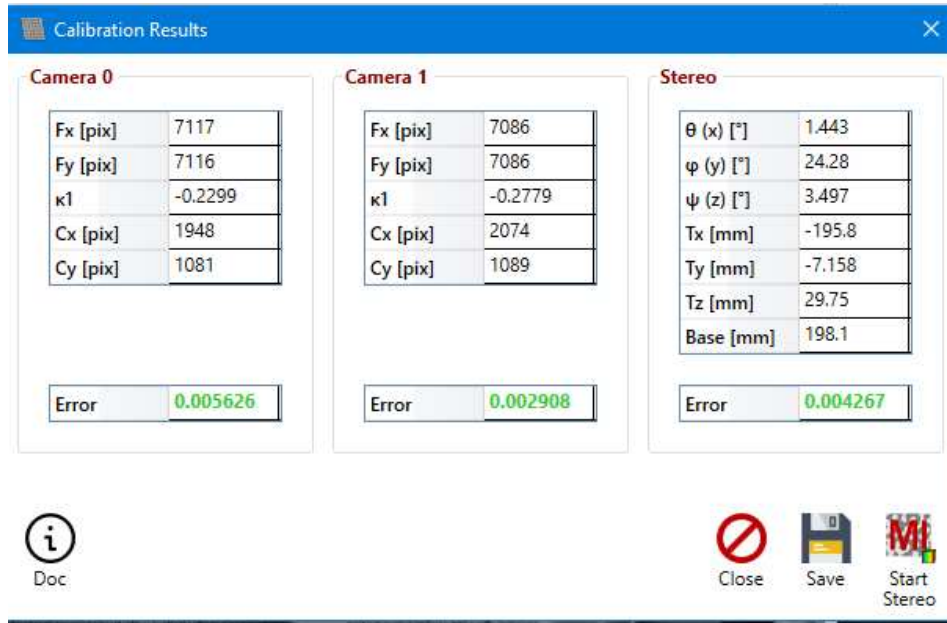


Figura 3.14

- calibrazione 6 (Figura 3.15):

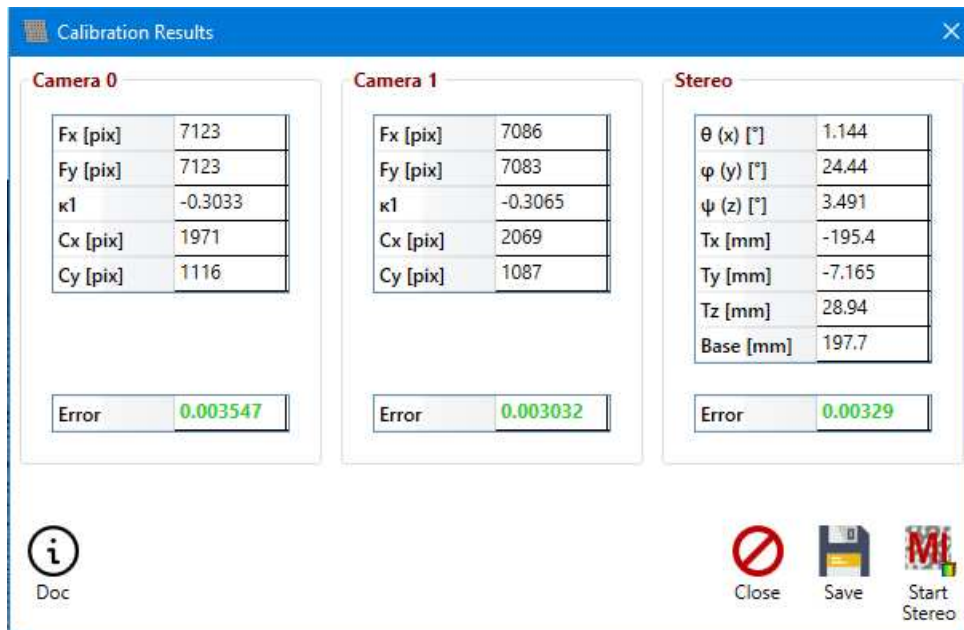


Figura 3.15

Di seguito viene riportata una tabella di confronto che riassume i risultati (Figura 3.16):

	Calib 1	Calib 2	Calib 3	Calib 4	Calib 5	Calib 6
$\varphi(y)[^\circ]$	24.69	24.15	24.2	24.44	24.28	24.44
Base [mm]	198.4	197.9	197.4	197.2	198.1	197.7
error	0.003913	0.006824	0.005284	0.004491	0.004267	0.00329

Figura 3.16 tabella riassuntiva calibrazioni

Dove: - $\varphi(y)[^\circ]$: angolo tra le telecamere

- Base [mm] : distanza tra le telecamere

Come si può osservare dai risultati sia l'angolo tra le telecamere sia la distanza tra le telecamere, in tutte le calibrazioni effettuate, rimangono pressochè invariati con un errore molto basso. Tutto questo testimonia il fatto che il vetro scelto non influisce sulla calibrazione e sull'attività delle telecamere ed è quindi utilizzabile durante il test.

3.6 Sistema di bloccaggio del vetro

Il secondo punto per la definizione del sistema coperchio-vetro è la definizione del sistema di bloccaggio del vetro sul coperchio. Il sistema di bloccaggio è importante perché ci permette di svolgere in sicurezza il test impedendo che ci siano danni agli operatori o all'ambiente circostante. Di seguito viene rappresentato un modello CAD del sistema coperchio-vetro con il sistema di bloccaggio pensato. (Figura 3.17) (Figura 3.18)

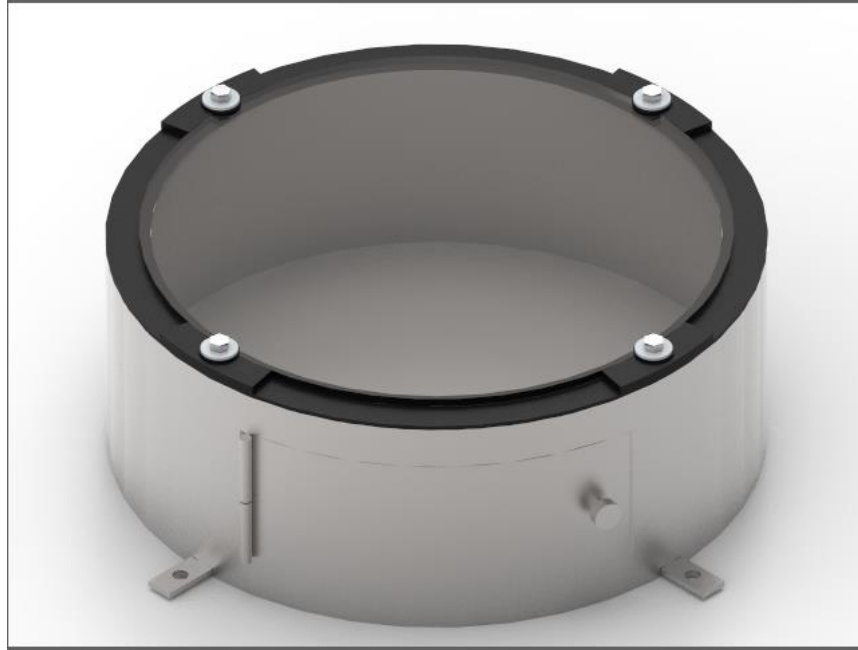


Figura 3.17 modello CAD sistema coperchio-vetro

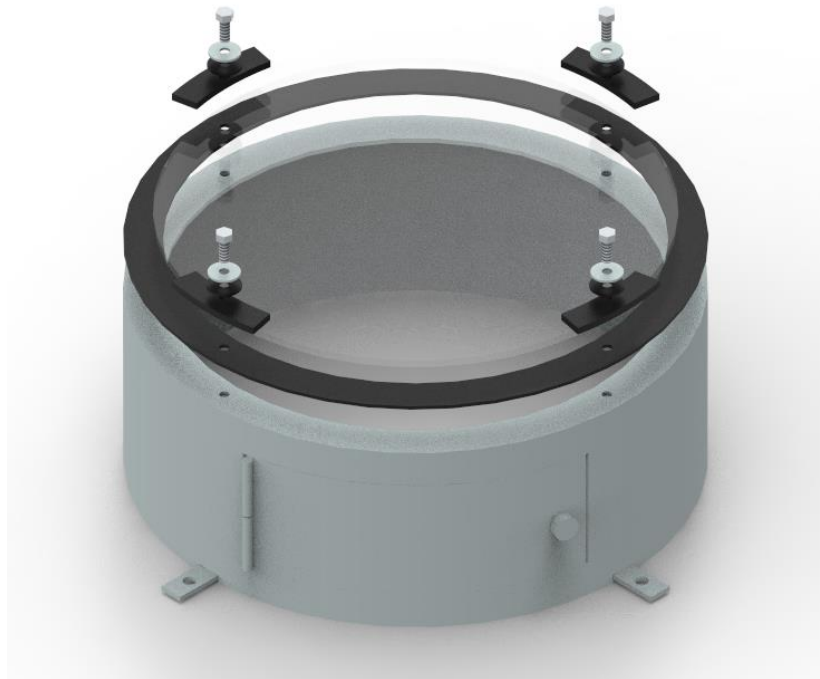


Figura 3.18 esploso sistema coperchio-vetro

Come si può vedere dall'immagine viene posto un anello di gomma sul bordo del coperchio su cui viene posato il vetro, successivamente ci si serve di un sistema vite-rondella per fissare il

vetro al coperchio con l'ausilio di un ulteriore pezzo di gomma dello stesso spessore del vetro per permettere al sistema vite-rondella di rimanere in piano e consentire un fissaggio più efficace. Inoltre sotto la rondella viene posto un anellino di gomma per evitare che ci sia contatto tra la rondella e il vetro.

3.7 Svolgimento del test

Dopo la calibrazione delle telecamere e la definizione del sistema di bloccaggio si passa allo svolgimento del test. Il provino di alluminio viene fissato al banco di prova tramite l'utilizzo di una flangia (Figura 3.19):



Figura 3.19 avvitamento flangia

e successivamente viene coperto con il sistema coperchio-vetro, il quale verrà anch'esso fissato al banco di prova con opportune viti. (Figura 3.20) (Figura 3.21)

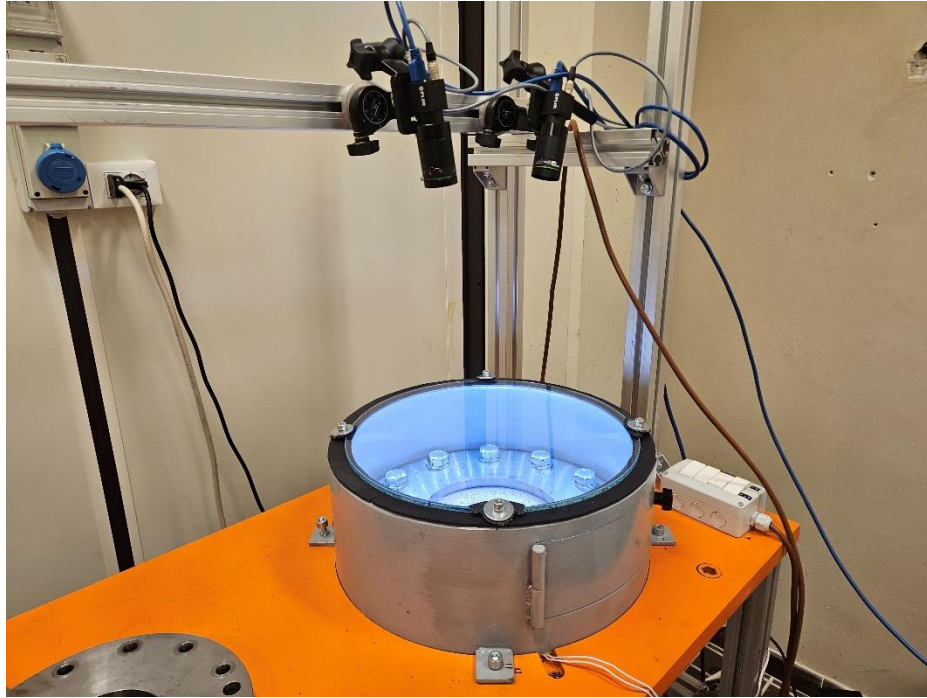


Figura 3.20 banco test

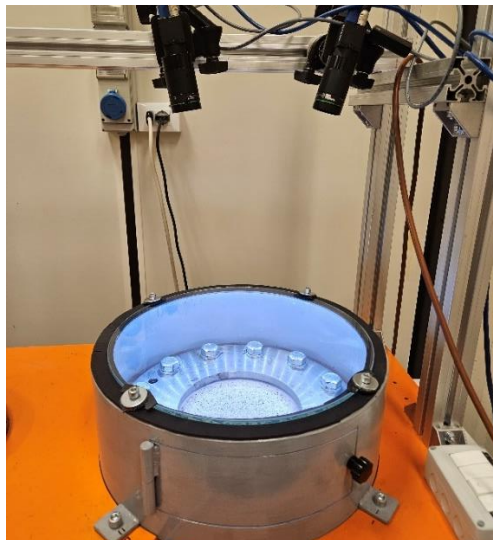


Figura 3.21 banco test

Dopo aver predisposto il tutto si può dare inizio al test con l'ausilio di una pompa pneumoidraulica che con una pressione dell'aria in ingresso di 2 bar pomperà olio sotto il provino deformandolo fino alla rottura mentre le telecamere riprenderanno la deformazione che poi tramite un software verrà elaborata. La pressione all'interno del provino viene misurata con un sensore di pressione. (Figura 3.22) (Figura 3.23) (Figura 3.24) (Figura 3.25)



Figura 3.22 provino prima del test

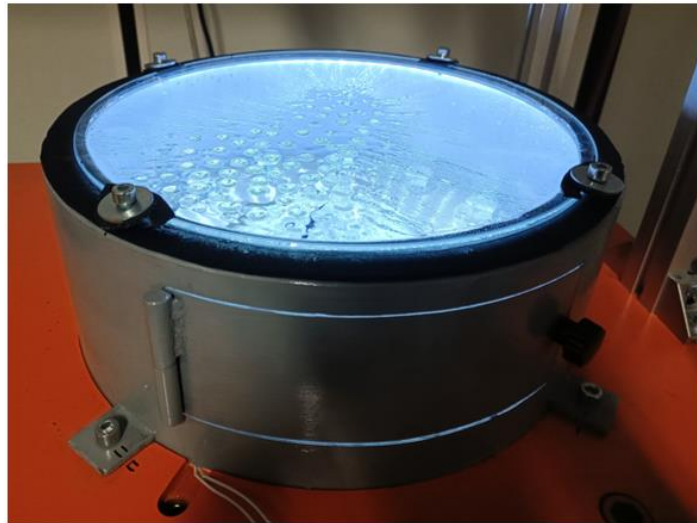


Figura 3.23 coperchio dopo il test

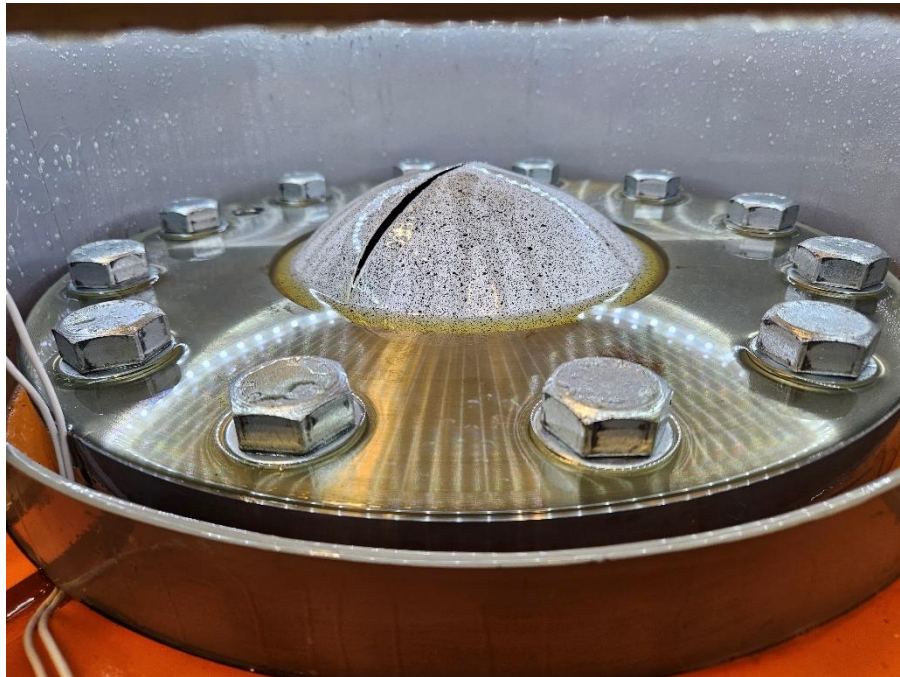


Figura 3.24 provino dopo il test



Figura 3.25 provino dopo il test

3.8 Fase di elaborazione

Per la misura della deformazione durante la prova è stato utilizzato il metodo della correlazione digitale d'immagini stereo in inglese Stereo-DIC (Digital Image Correlation), ovvero il metodo di acquisizione delle immagini che si serve di due telecamere anziché una, perché ci permette di misurare lo spostamento anche in direzione perpendicolare alla superficie del provino e non solo nel piano, come avverrebbe con una sola telecamera. Per l'elaborazione delle immagini è stato utilizzato il software MatchID. Gli speckle sono delle macchioline di vernice che ricoprono il provino. Durante la deformazione del provino queste macchioline subiranno degli spostamenti, avvicinandosi o allontanandosi, e il software si baserà proprio su questi spostamenti per calcolare la deformazione, andando a ricercare immagine per immagine la posizione dei subset attraverso il confronto delle distribuzioni delle frequenze dei livelli di grigio. Il software MatchID implementa il cosiddetto approccio locale, che consiste nel ricoprire l'immagine con tanti subset (quadrantini di pixel). Per definire correttamente il subset è necessario definire il subset-size (grandezza del quadratino) e lo step-size (distanza tra i centri dei diversi quadratini). Nel nostro caso il subset-size sarà di 33 pixel e lo step-size sarà di 10 pixel. È importante che all'interno di ogni subset ci siano almeno 3 macchie di vernice di grandezza pari almeno a 3 pixel, in caso contrario si andrà incontro a un problema di misura della deformazione che potrebbe essere influenzata del rumore di acquisizione del segnale delle telecamere. Dopo aver definito il tutto il software può passare alla fase di correlazione con cui si ricavano le mappe di spostamento come quella che viene di seguito riportata (Figura 3.26).

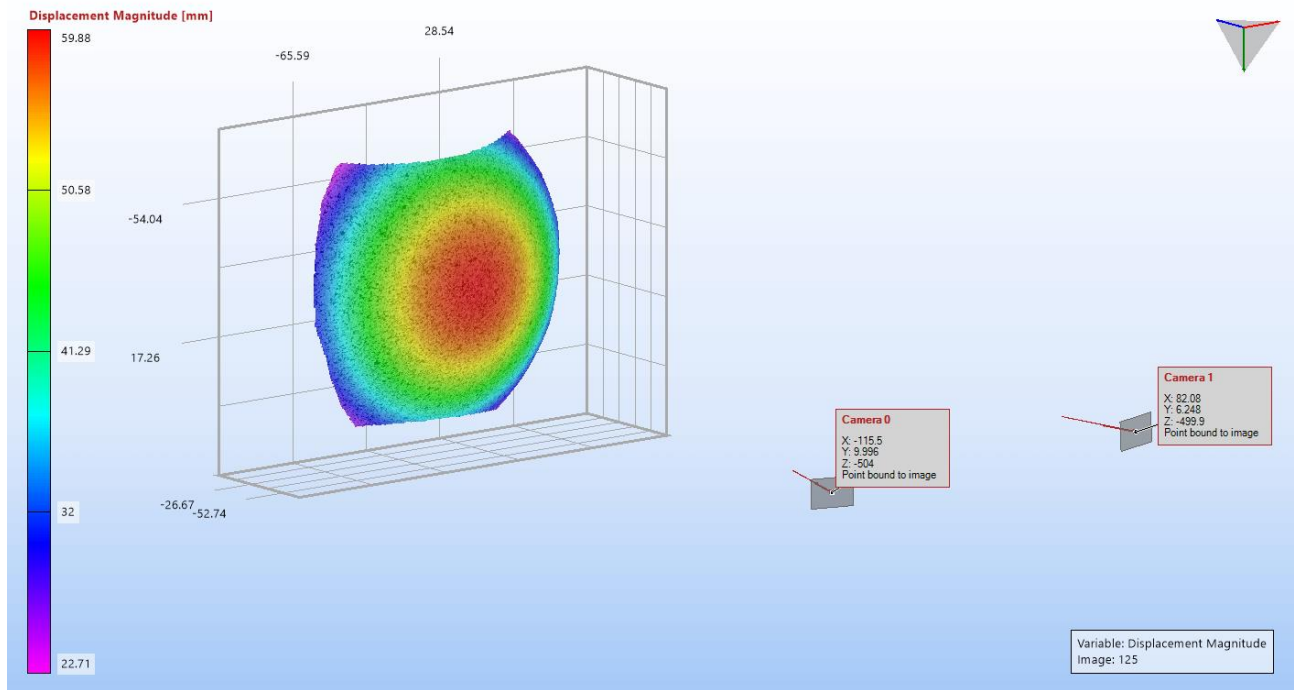


Figura 3.26 elaborazione software del provino prima della rottura

4 Conclusioni

In conclusione possiamo dire che entrambi gli obiettivi dello studio sono stati raggiunti, sia per quanto riguarda la scelta del vetro sia per quanto riguarda la scelta del sistema di bloccaggio. Il vetro extrachiaro scelto non ha interferito con la calibrazione delle telecamere e con la loro attività, permettendo una buona resa dei colori e così una buona ripresa delle immagini che hanno consentito in seguito una buona fase di elaborazione. Il sistema di bloccaggio scelto per fissare il vetro ci ha consentito di svolgere in sicurezza il test senza che ci fossero danni alle persone o all'ambiente circostante e senza che ci fosse la fuoriuscita di olio dopo la rottura del provino.

Bibliografia

1. Wikipedia. Vetro. <https://it.wikipedia.org/wiki/Vetro>
2. Vetromarca. Storia del vetro. <https://www.vetromarca.com/storia-del-vetro.html>
3. Cjalzunit. Vetro: formatura. <https://cjalzunit.wordpress.com/2018/07/07/vetro-formatura/>
4. Saint-Gobain Glass. Proprietà Meccaniche del vetro. <https://www.saint-gobain-glass.it/it/proprietà-meccaniche-del-vetro>
5. Chimica-online. Indice di rifrazione. <https://www.chimica-online.it/download/indice-di-rifrazione.htm>
6. Chimica-online. Indice di rifrazione vetro. <https://www.chimica-online.it/download/indice-di-rifrazione-vetro.htm>
7. Guidafinestra. Trasmittanza o trasmissione luminosa del vetro. [https://www.guidafinestra.it/trasmmissione-luminosa-del-vetro/#:~:text=La%20Trasmmissione%20Luminosa%20\(TL\)%20esprime,0.4%C2%B5m%20e%20i%200.76%C2%B5m.](https://www.guidafinestra.it/trasmmissione-luminosa-del-vetro/#:~:text=La%20Trasmmissione%20Luminosa%20(TL)%20esprime,0.4%C2%B5m%20e%20i%200.76%C2%B5m.)
8. Altervista. Phylain. Vetro, perché è trasparente. https://phylain.altervista.org/vetro/?doing_wp_cron=1697367558.2418420314788818359375
9. Lavorazione artigiana vetro. <https://www.lavglass.com/prodotti/vetri-trasparenti/>
10. Infissaper.it. Il vetro e le sue qualità “trasparenti”. <https://infissaper.it/scegli-alluminio/estetica-e-design/vetro-qualità-trasparenti/>
11. Micheloniporte. <https://www.micheloniporte.it/vetri-micheloni-porte/>
12. Mottes mobili. <https://www.mottesmobili.com/armadio-maxi-vetro-visual-laccato-bianco>
13. Guidafinestre. Vetro trasparente o vetro extrachiaro. <https://www.guidafinestra.it/vetro-trasparente-o-vetro-extrachiaro/#:~:text=Se%20il%20vetro%20extrachiaro%20rappresenta,dal%20punto%20di%20vista%20economico.>
14. Interplast. Differenza tra vetro float ed extrachiaro. <https://www.interplastshop.it/differenza-tra-vetro-float-ed-extrachiaro>

15. Atelier Italia. <https://www.atelier-italia.it/vetro-chiaro-extrachiario-caratteristiche-prestazioni/>
16. Savas. Sicurezza vetri. <https://www.savas.it/sicurezza-vetri.php>
17. Veneto vetro. Vetri di sicurezza: quali sono e dove si usano. https://www.venetovetro.it/vetri_di_sicurezza/
18. GuidaFinestra. Vetro temperato. <https://www.guidafinestra.it/vetro-temperato/>
19. Finestre Antirumore. Vetro stratificato. <https://www.finestreantirumore.it/vetro-stratificato/#:~:text=Che%20cos'%C3%A8%20un%20vetro,evitando%20possibili%20ferite%20da%20taglio.>
20. Mondodiscus. Calcolo dello spessore e della flessione massima dei vetri di un acquario. [https://www.mondodiscus.com/2011/04/calco-spessore-vetri-2/#:~:text=lo%20spessore%20\(e\)%2C%20%C3%A8,%C3%A8%20la%20sollecitazione%20a%20flessione%20.](https://www.mondodiscus.com/2011/04/calco-spessore-vetri-2/#:~:text=lo%20spessore%20(e)%2C%20%C3%A8,%C3%A8%20la%20sollecitazione%20a%20flessione%20.)
21. Archivetiro. <https://www.archivetiro.it/il-vetro/>

Ringraziamenti

Infine, a conclusione di questo elaborato, vorrei ringraziare le persone che hanno contribuito alla sua realizzazione.

Un ringraziamento particolare va al mio relatore Prof. Sasso e al mio correlatore Dott. Morichelli, per la loro disponibilità e pazienza, e per i preziosi consigli che hanno permesso la realizzazione di questo lavoro.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia, che mi ha sempre supportato e incoraggiato, soprattutto nei momenti più difficili.