



Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Architettura per il Progetto Sostenibile

Tesi di Laurea Magistrale

CARATTERIZZAZIONE DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE E
TERMICHE DI PANNELLI COMPOSITI IN VETRO SOTTILE PER
APPLICAZIONI ARCHITETTONICHE

Relatori:

Mauro Corrado

Fabio Favoino

Candidato:

Cristiana Renò

Matr. 239963

Anno accademico 2019-2020

Indice

Abstract

Ringraziamenti

1. Introduzione	12
1.1. Involucro trasparente	14
1.2. Obiettivi e metodi della tesi	16
1.3. Sviluppo sostenibile	19
1.4. Legislazione energetica in Italia	21
1.5. Edifici a energia quasi zero	23
1.6. Normativa di riferimento	24
2. Materiali e processi	28
2.1. Il vetro	30
- Produzione del vetro	32
- Proprietà meccaniche	34
- Proprietà termiche	35
2.2. Il vetro sottile	38
2.3. Pannelli sandwich	42
2.4. Produzione additiva e PMMA	43
2.5. Tecnologie ad alta efficienza termica	45
- VIG	45
- AEROGEL	46
- PCM	48

3. Casi studio e concept architettonici	50
3.1. Casi studio	52
- Office Building Biskupska	53
- Central Library Seattle	55
- The Nelson Atkins Museum of Art	57
- Cité de l'Océan et du Surf	59
- Jarman Building	61
- Biohotel Im Apfelgarten	63
- Berkeley Hotel	65
3.2. Ambiti di applicazione architettonica	67
4. Analisi strutturale	70
4.1. Struttura dei pannelli sandwich	72
4.2. Definizione del modello	77
4.3. Calcolo della rigidezza e della deformazione di un pannello	79
4.4. Considerazioni in funzione del peso	86
5. Analisi termica	88
5.1. Introduzione alle prestazioni termiche di pannelli sandwich	90
5.2. Semplificazione del modello	92
5.3. Requisiti da raggiungere	95
5.4. Calcolo della trasmittanza del pannello privo di nucleo	98
5.5. Calcolo della trasmittanza del pannello con nucleo interno	110

6. Confronto prestazione strutturale e termica	130
7. Conclusioni	138
Bibliografia	144

Abstract

Questa tesi riguarda lo studio di un pannello sandwich costituito da superfici in vetro sottile, per applicazioni architettoniche di facciata o di copertura. L'idea prende spunto da ricerche effettuate presso l'Università di Delft sulle potenzialità del vetro sottile in ambito strutturale grazie alla presenza di un nucleo stampato in 3D che implementa le caratteristiche di rigidità e resistenza delle lastre.

Il vetro sottile, finora utilizzato principalmente per dispositivi elettronici, può rappresentare un'innovazione in campo architettonico grazie alle sue proprietà meccaniche ed ottiche, considerando la minore energia incorporata necessaria alla sua produzione e applicazione.

In seguito alla valutazione dei materiali e della geometria più adeguati alla costituzione del nucleo, questa ricerca indaga le prestazioni meccaniche (prevalentemente riferite alla deformazione e al peso) del pannello e, nello specifico, si interroga sulla performance termica, tramite il calcolo della trasmittanza e la valutazione di tecnologie atte ad incrementare l'isolamento dell'elemento costruttivo.

L'obiettivo della tesi è la valutazione di un elemento costruttivo che in futuro, grazie alla continua ricerca in questo settore, possa rappresentare una valida alternativa rispetto all'utilizzo del vetro comune, nell'ambito di un progetto sostenibile.

Abstract (EN)

This thesis focuses on the study of a sandwich panel with thin glass faces, for architectural applications in façades or roofing systems. The idea is inspired by some researches carried out at the Delft University of Technology on the potential of thin glass as a structural element, thanks to a 3D printed core that increases the panel's stiffness.

Nowadays, thin glass is mainly known for smartphone screen applications, but it could represent an interesting innovation in architectural field thanks to its mechanical and optical properties, its flexibility and low embodied energy.

In order to realize the core of the sandwich panel, different patterns and materials has been investigated and compared. Then, this research investigates the mechanical performance (mainly referred to deformation and weight) of the panel and analyzes its thermal performance, through the calculation of the U-value and the valuation of technologies suitable for increasing the panel's insulation.

The final purpose of this thesis is the assessment of a construction element that optimizes the structural weight and the insulation at the same time, in order to propose an innovative and sustainable architectural element.

Ringraziamenti

Questa tesi rappresenta la conclusione dei miei studi universitari in Architettura per il progetto sostenibile, percorso che ho trovato formativo sotto tanti punti di vista e mi ha fatto scoprire l'interesse per l'ambito tecnologico e fisico dell'architettura, specialmente riguardo ai temi di impatto ambientale ed energetico.

Ringrazio i miei relatori, l'Ing. Mauro Corrado e l'Ing. Fabio Favoino per la cortesia e la disponibilità dimostratemi durante la stesura.

Inoltre, tengo a ringraziare tutte le persone che mi hanno supportata durante questo intenso percorso e che hanno avuto un ruolo importante nella mia formazione e nella mia vita.

Un pensiero va prima di tutto ai miei genitori e in particolare a mia madre che ha sempre creduto in me e mi ha sostenuta in ogni fase della mia vita e a cui dedico questo traguardo.

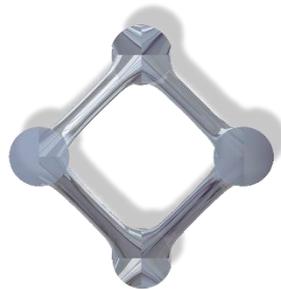
Grazie alle mie amiche di sempre Elisa e Veronica, che sono le sorelle che non ho mai avuto e che sono sempre pronte ad ascoltarmi e a strapparmi un sorriso da vent'anni a questa parte.

Un affettuoso pensiero a chi ha condiviso con me questo percorso, a tutti i miei compagni di progetto e in particolare a Marco (un ringraziamento speciale per la tabella) e Grazia, che nonostante abbiano intrapreso strade diverse mi sono vicini ancora oggi.

Grazie a tutte le persone che mi sostengono nelle mie passioni, grazie a Matte, un amico prezioso che mi sopporta da tanto tempo, a Federica e Ilaria che hanno reso speciali gli anni del liceo e a tutti gli amici che non riesco a menzionare ma che rendono le mie giornate più belle.

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE



1.1 Involucro trasparente

L'involucro trasparente, e in particolare il ruolo del vetro in ambito architettonico, riveste un'importanza fondamentale nella progettazione di un edificio, sia in termini di funzionalità sia estetici. Negli ultimi anni le tecnologie che concernono le vetrate si sono notevolmente sviluppate sotto più punti di vista, con l'avanzamento della tecnologia, infatti, si è pervenuti a soluzioni funzionali in grado di coniugare le esigenze ottiche ed estetiche delle finestre con la riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio. La componente vetrata ha un forte impatto per quanto riguarda il tema del risparmio energetico dell'edificio essendo la più vulnerabile tra le parti costruttive dell'involucro per quanto concerne il guadagno e la perdita di calore. Le finestre, infatti, permettono l'ingresso della radiazione solare all'interno degli ambienti ed inoltre sono la parte dell'edificio in cui avviene maggiore scambio di calore tra interno ed esterno, questo comporta un possibile surriscaldamento nella stagione estiva e delle dispersioni di calore importanti in quella invernale. Per questo le parti vetrate rivestono un ruolo chiave nel benessere psico-fisico degli occupanti: influenzano infatti il loro comfort termico e visivo, provvedendo all'illuminazione naturale degli ambienti. La luce influisce in modo essenziale sulla qualità della vita del fruitore, caratterizzando lo spazio e permettendo lo svolgimento delle funzioni richieste: uno spazio troppo buio o con abbagliamento. Inoltre, le finestre sono responsabili della ventilazione e del ricambio dell'aria che garantiscono un ambiente sano. Per tali motivi la progettazione delle finestre richiede la valutazione di vari aspetti e tecnologie, in particolare rispetto all'isolamento e al comfort visivo. L'utilizzo esteso della componente vetrata comporta molti vantaggi quante problematiche poiché maggiore è l'apporto del vetro minore è il livello di isolamento garantito rispetto alle condizioni climatiche esterne, a causa della notevole quantità di energia dissipata per la differenza tra il coefficiente di scambio termico delle finestre rispetto agli altri materiali edilizi, si stima infatti che una perdita di calore del 10-25% è dovuta alle finestre degli edifici residenziali (Rezaei, Shannigrahi, Ramakrishna, 2017). Per quanto riguarda invece il passaggio della radiazione solare attraverso il vetro, vi è un

apporto positivo nella stagione invernale, ovvero nella condizione di «Heating», poiché dà un apporto di calore positivo all'interno abbattendo parzialmente l'impatto dell'impianto di riscaldamento. Tuttavia, la situazione si inverte nel periodo di «Cooling», di raffrescamento, ovvero quando l'edificio spende energia per refrigerare gli ambienti interni, la cui temperatura tiene anche conto del riscaldamento prodotto dalla presenza di persone, apparecchi domestici e tecnologici. Il consumo di energia che viene impiegata per il funzionamento di apparecchi domestici e impianti di condizionamento per regolare la temperatura degli spazi abitativi potrebbe essere attenuato utilizzando tecnologie e materiali che agiscono in modo attivo o passivo per ridurre considerevolmente il fabbisogno energetico dell'edificio.

Il vetro può variare molto a seconda delle sue caratteristiche, in generale infatti non permette il totale passaggio della radiazione solare, ma suddivide la radiazione incidente in tre componenti: componente assorbita, riflessa e trasmessa, che possono variare sensibilmente a seconda della scelta dell'involucro trasparente.

Il vetro maggiormente utilizzato è quello chiamato "siliceo" poiché la silice è la componente fondamentale comune del vetro e in base alla sua percentuale è possibile fare una prima classificazione delle categorie di vetro.

Oggi è disponibile una vasta gamma di tipologie di vetro, che permette di vagliare numerose soluzioni a seconda dei requisiti richiesti dall'edificio. Il vetro senza particolari trattamenti è chiamato "vetro chiaro" ed è caratterizzato da un elevato valore di trasmissione solare visibile e infrarossa, al quale possono essere aggiunti pigmenti metallici che conferiscono specifiche proprietà e colorazioni alla vetrata.

Il vetro può anche essere caratterizzato in base allo spessore delle sue lastre o alla presenza di una camera d'aria inserita tra due o più lastre di vetro che può essere riempita da alcuni gas nobili o da sostanze innovative come l'Aerogel al fine di incrementarne le proprietà di isolamento. Normalmente per le applicazioni che abbiamo menzionato vengono utilizzati vetri di spessore variabile tra 3 e 6 mm, ma in questa tesi sarà considerata la possibilità di usare lastre di vetro dallo spessore molto inferiore.

1.2 Obiettivi e metodi della tesi

L'obiettivo di questo progetto di tesi è indagare il comportamento del vetro sottile (spessore 1 mm) nell'ambito di una facciata architettonica, studiando e analizzando un pannello sandwich composito, che possa ottimizzare le caratteristiche meccaniche e termiche di una vetrata di grandi dimensioni.

Nell'ottica dell'architettura sostenibile il vetro sottile può rappresentare un'innovazione importante grazie alla combinazione di caratteristiche come alta resistenza, flessibilità e trasparenza eccellente e allo stesso tempo essere utile alla riduzione del peso degli edifici, utilizzando meno materiale e riducendo l'impatto ambientale.

Il progetto consiste nell'elaborazione di una struttura ibrida ideando il design di un nucleo in materiale polimerico da inserire all'interno di due lastre di vetro sottile, modellandolo tridimensionalmente. La conformazione a sandwich permette di potenziare il comportamento strutturale del pannello aumentandone la resistenza senza un significativo incremento di peso.

L'idea parte da alcuni progetti di ricerca effettuati presso l'Università tecnica di Delft, che prendono in esame il vetro sottile come materiale da costruzione, nello specifico dal pannello sandwich studiato da Michele Akilo (Akilo, 2018), che rappresenta un punto di partenza per questo lavoro.

In seguito all'attività di ricerca e al calcolo inerente alle prestazioni strutturali del pannello, il lavoro di tesi si è focalizzato sull'indagine riguardo al comportamento termico dell'elemento studiato, ideando diverse tipologie di modello al fine di calcolarne e, se possibile, diminuirne il valore di trasmittanza nell'ottica di proporre un prodotto funzionale rispetto a due ambiti dell'architettura.

La prima parte del lavoro si è basata sull'analisi della letteratura. Grazie ad essa è stato possibile prendere in esame le ricerche fatte fino ad oggi sul vetro sandwich e il vetro sottile e prendere in esame le possibili forme e caratteristiche per determinare il design del nucleo. Sono state indagate le tecnologie e i materiali possibili per la realizzazione del nucleo e sono state prese in esame le tecnologie per l'ottimizzazione dell'isolamento termico delle vetrate, scegliendone alcune da prendere in esame. Si è pervenuti poi all'identificazione del tipo di prestazioni che si desidera ottenere ed è stata presa visione della normativa sull'involucro trasparente e in ambito energetico. Alla fine di questa fase

è stato possibile effettuare la scelta dei materiali, dello spessore e delle dimensioni del pannello.

È stato poi eseguito il disegno della sezione su Cad e la modellazione della geometria del nucleo tramite il software Rhino per ottenere un disegno 3D realistico.

Una volta definite la geometria e i materiali è stato possibile procedere al calcolo della rigidità flessionale della lastra, valutandone la dimensione massima in modo che l'abbassamento dato dalla deformazione restasse al di sotto di una determinata soglia. Infine, sono state fatte delle considerazioni circa il peso della lastra, verificando che nonostante le dimensioni restasse sotto i 50 kilogrammi di peso.

Per quanto concerne la parte di fisica tecnica, si è proceduto tramite la semplificazione della sezione del pannello in 2D, distinguendo tre alternative: sezione priva di nucleo interno, sezione con nucleo pieno e sezione con nucleo cavo. I disegni Cad sono stati successivamente importati sul Software di calcolo Bisco dove è stato possibile assegnare i materiali e calcolarne la trasmittanza, confrontata poi con il valore ottenuto tramite il calcolo analitico. Questo procedimento è stato ripetuto per diverse casistiche in base ai materiali scelti e alla presenza di rivestimenti basso emissivi.

Tramite un foglio di calcolo Excel sono stati confrontati i risultati inerenti alla parte strutturale con quelli in funzione della trasmittanza, e sono state fatte delle considerazioni in base alla variazione della geometria del nucleo studiato.

In ultimo sono stati presi in esame i possibili ambiti di applicazione architettonica, descrivendo alcuni casi studio significativi.

L'aumento del vetro come materiale da costruzione ha comportato una ridefinizione dei requisiti che tale elemento deve rispettare per quanto riguarda sicurezza, prestazioni ottiche e termiche. Queste ultime rivestono un'importanza notevole perché una finestra con un buon isolamento permette un risparmio sia energetico che economico mentre in termini di sicurezza va considerata la natura fragile del materiale che può comportare scenari di rottura ed analizzate possibilità per aumentarne la resistenza.

La caratterizzazione delle proprietà del pannello sandwich descritto è stata interessante per la sua impronta interdisciplinare, inoltre aspetti come l'incremento dell'isolamento termico e l'abbassamento del peso di una possibile facciata vetrata rappresentano delle innovazioni importanti nell'ottica della riduzione dell'impatto ambientale. Un peso minore comporta un risparmio di materiale e minori emissioni nocive oltre a maggiore

facilità di trasporto e montaggio, quindi minore energia incorporata mentre un maggiore isolamento implica uno spreco minore dell'energia consumata dagli impianti. La ricerca riguardo all'ottimizzazione di elementi costruttivi e tecnologie a basso impatto energetico e ambientale è fondamentale al fine di pervenire ad un'architettura sostenibile.

1.3 Sviluppo sostenibile

In questo paragrafo si vuole dare una panoramica di quello che è lo scenario che ha portato alla definizione di requisiti mirati a progetti sostenibili a basso impatto ambientale ed economico.

La prima definizione di sviluppo sostenibile viene elaborata nel 1987 ed è contenuta in un documento denominato "Rapporto Brundtland" pubblicato dalla Commissione Mondiale sull'Ambiente e lo Sviluppo. Tale definizione rappresenta il primo passo per un concetto chiave che sarà ripreso negli anni successivi e applicato in particolare al campo dell'edilizia:

"Lo sviluppo sostenibile è uno sviluppo soddisfa le necessità delle attuali generazioni senza compromettere la capacità delle future generazioni di soddisfare le proprie" (Commissione mondiale sull'ambiente e lo sviluppo dell'ONU, 1987).

A partire dagli anni '90 il tema della sostenibilità ambientale ha iniziato a rivestire un ruolo di primaria importanza nella progettazione architettonica. Si è reso necessario quindi definire degli standard riguardanti gli elementi edilizi al fine di limitare le emissioni inquinanti, utilizzare materiali rinnovabili e porre attenzione all'efficienza energetica delle nuove costruzioni nell'ottica di un risparmio sia energetico che economico.

La prima conferenza mondiale sul tema dell'ambiente (United Nations Conference on Environment and Development) ha luogo nel 1992 a Rio de Janeiro e vede la partecipazione di 172 governi, 108 capi di Stato o di Governo e 2.400 rappresentanti di organizzazioni non governative. Durante questo importante evento mediatico vengono stesi i primi documenti ufficiali riguardanti gli obiettivi di riduzione di inquinamento atmosferico e riduzione delle emissioni di CO₂ e trattati argomenti come l'utilizzo di risorse di energia alternativa, la riduzione delle emissioni provenienti dai veicoli, la problematica del consumo eccessivo di acqua e la necessità di esame sistematico dei modelli di produzione.

A seguito del Summit di Rio e alla stesura di tali documenti viene redatto nel 1997 il Protocollo di Kyoto, un trattato internazionale che pone come principale obiettivo l'obbligo per i paesi industrializzati di operare una drastica riduzione delle emissioni di inquinanti nel periodo dal 2008 al 2012, in una misura non inferiore al 5,2% rispetto alle emissioni registrate nel 1990.

A partire dagli anni 2000 vengono redatte numerose direttive e convenzioni a livello europeo che coinvolgono i temi discussi nella UNCED e in particolare fanno riferimento all'ambito del risparmio energetico e delle fonti rinnovabili.

Nel 2007 ha luogo il consiglio europeo di Bruxelles che rinnova i propositi precedenti e stabilisce che «I paesi sviluppati dovrebbero mantenere un ruolo guida impegnandosi a ridurre collettivamente le emissioni di gas ad effetto serra dell'ordine del 30% entro il 2020 rispetto al 1990, anche nella prospettiva di ridurre collettivamente le emissioni del 60%-80% entro il 2050 rispetto al 1990».

La questione viene ulteriormente dettagliata nel 2010 con la Direttiva del Parlamento Europeo e del Consiglio Europeo sulla prestazione energetica nell'edilizia, a seguito della quale viene introdotto il concetto di Edificio ad energia quasi zero (Zero Energy Building) e vengono incentivati gli stati membri ad adottare una politica più mirata alla salvaguardia energetica, citando la Direttiva 2010/31/UE:

«Gli Stati membri adottano le misure necessarie affinché siano fissati requisiti minimi di prestazione energetica per gli elementi edilizi che fanno parte dell'involucro dell'edificio e hanno un impatto significativo sulla prestazione energetica dell'involucro dell'edificio quando sono sostituiti o rinnovati, al fine di raggiungere livelli ottimali in funzione dei costi».

Inoltre: «Gli Stati membri provvedono affinché:

- a) entro il 31 dicembre 2020 tutti gli edifici di nuova costruzione siano edifici a energia quasi zero;
- b) a partire dal 31 dicembre 2018 gli edifici di nuova costruzione occupati da enti pubblici e di proprietà di questi ultimi siano edifici a energia quasi zero».

Si stima che circa il 40% del consumo totale di energia è assorbito da case, uffici pubblici e privati, negozi e altre categorie di edifici. Nelle abitazioni civili, due terzi dei fabbisogni sono di fatto imputabili al riscaldamento degli ambienti. Il miglioramento dell'efficienza energetica riveste quindi un ruolo di primo piano nel programma di un futuro più sostenibile e comporta vantaggi per l'insieme dell'economia europea e ancor di più per lo sviluppo a livello locale (Wu, Skye, Domanski, 2018).

1.4 Legislazione energetica in Italia

In Italia, sebbene una legislazione strutturata in ambito energetico risalga solo agli anni Duemila, si riscontra un interesse per le tematiche ambientali e di risparmio energetico dalla crisi petrolifera degli anni Settanta, che coinvolse l'Unione Europea e portò alla luce le problematiche legate all'approvvigionamento energetico. Tra i primi provvedimenti da parte dell'Italia c'è la definizione del primo Piano Energetico Nazionale (PEN) italiano allo scopo di favorire una progressiva sostituzione della produzione di energia a partire da fonti fossili.

Per quanto riguarda la normativa in ambito energetico riguardante gli edifici si cita la Legge 373 del 30/04/1976, in cui viene fissato un regolamento per la realizzazione degli impianti degli edifici e l'isolamento termico degli stessi, ipotizzando delle prestazioni da raggiungere obbligatoriamente nella realizzazione o ristrutturazione di un edificio.

Durante gli anni Novanta vengono definite nuove norme in materia di uso razionale dell'energia, di risparmio energetico e di sviluppo delle fonti rinnovabili di energia. La Legge 9 gennaio 1991 n. 10 in particolare ha come obiettivo la sensibilizzazione alla riduzione dei consumi di energia incentivando l'utilizzo delle fonti rinnovabili.

A partire dagli anni Duemila vengono definite le modalità dell'applicazione della metodologia di calcolo delle prestazioni energetiche e dell'utilizzo delle fonti rinnovabili negli edifici e in cui vengono esplicitati dei requisiti minimi riguardanti le prestazioni energetiche di ogni unità immobiliare.

Con la Direttiva Europea 2002/91/CE viene introdotta per la prima volta a livello europeo la certificazione energetica degli edifici, che verrà messa in pratica in Italia solo dal 2005 con l'entrata in vigore del Decreto Legislativo 192/2005 a seguito del quale viene introdotto l'obbligo per le nuove costruzioni di munirsi di certificazione energetica; vengono introdotte inoltre le metodologie di calcolo del fabbisogno energetico di un edificio, i requisiti prestazionali minimi e vengono fissati dei livelli più elevati di isolamento termico che deve avere un edificio oltre all'utilizzo di apparecchiature a maggior rendimento.

Il Decreto legislativo 192/20 del 2005 pone in primo piano i seguenti obiettivi:

- Promuovere il miglioramento della prestazione energetica degli edifici tenendo conto delle condizioni locali e climatiche esterne, nonché delle prescrizioni relative al clima degli ambienti interni e all'efficacia sotto il profilo dei costi;
- Migliorare le prestazioni energetiche degli edifici;
- Favorire lo sviluppo, la valorizzazione e l'integrazione delle fonti rinnovabili negli edifici;
- Determinare i criteri generali per la certificazione della prestazione energetica degli edifici e per il trasferimento delle relative informazioni in sede di compravendita e locazione;
- Effettuare le ispezioni periodiche degli impianti per la climatizzazione invernale ed estiva;
- Sostenere la diversificazione energetica;
- Promuovere la competitività dell'industria nazionale attraverso lo sviluppo tecnologico.

1.5 Edifici a energia quasi zero

A seguito delle Direttive Europee e alla definizione di standard legati al tema dell'efficienza energetica, nasce il concetto di "Near Zero Energy Building" che definisce un edificio a energia quasi zero, ovvero un edificio ad elevatissima prestazione energetica grazie alla tecnologia dell'involucro edilizio e all'utilizzo di fonti energetiche rinnovabili.

Il termine, abbreviato con la sigla "NZEB", è stato utilizzato per la prima volta all'interno delle Direttive Europee EPBD (Energy Performance Building Directions) del 2010 (2010/31/UE), a seguito delle quali gli stati membri hanno dovuto adoperarsi nell'introduzione di normative nazionali che promuovessero la realizzazione di edifici energeticamente efficienti poiché venivano fornite indicazioni in merito ai termini ultimi oltre i quali tutti gli edifici di nuova costruzione sarebbero dovuti appartenere a questa categoria, nello specifico il 2021 per l'edilizia privata e il 2018 per quella pubblica.

Il concetto di NZEB in particolare definisce un edificio che sia in grado di provvedere quanto più possibile al fabbisogno di energia annuale necessaria a sé stesso e ai suoi occupanti, infatti la progettazione di questa tipologia edilizia presuppone un equilibrio tra la domanda di energia annuale e la quantità prodotta tramite fonti rinnovabili. Per perseguire questo obiettivo occorre perfezionare il livello di isolamento che è in grado di fornire l'involucro edilizio in base alle condizioni climatiche, ottimizzandone la forma, l'orientamento, la tecnologia e i materiali delle superfici disperdenti e le schermature che possono essere utilizzate al bisogno. Oltre a questi espedienti è necessario considerare inoltre la tipologia di impianto di riscaldamento, raffrescamento e ventilazione che verranno utilizzati per il comfort degli occupanti, in modo da ridurre al minimo gli sprechi adottando impianti ad alta efficienza energetica e impianti di recupero del calore. In ultimo bisogna tenere conto del comportamento degli occupanti e dei loro consumi. L'involucro trasparente in questo contesto riveste un'importanza particolare poiché è la parte dell'involucro che influenza maggiormente i consumi energetici e fornisce una vasta gamma di strategie per un risparmio energetico, che si basano sull'ottimizzazione dei valori di trasmittanza (Valore U), del fattore solare (valore g) e della trasmissione visibile. Una facciata adattativa ideale può essere definita come "una facciata che è in grado di ridurre al minimo il consumo energetico totale nello spazio interno (energia per il riscaldamento, il raffreddamento, l'illuminazione e la ventilazione) e contemporaneamente migliorare il livello di qualità ambientale interna, adattando le sue proprietà termo-ottiche alle condizioni ambientali transitorie esterne e interne" (Favoino, Overend, Jin, 2015).

1.6 Normativa di riferimento per l'involucro trasparente

Per quanto riguarda l'involucro trasparente è necessario considerare che debba provvedere a: comfort visivo, comfort termico, comfort acustico.

I parametri sintetici che caratterizzano il componente vetrato sono:

- Trasmittanza termica [UNI EN ISO 10077-1:2007]
- Fattore di trasmissione solare totale e relativi fattori di riduzione [UNI EN 410:2011, UNI EN 13363-1:2008, UNI TS 11300-1:2014]
- Fattore di trasmissione luminosa [UNI EN 410:2011]

La trasmittanza termica U_w [W/m^2K] è il flusso termico che, in condizioni stazionarie, attraversa una superficie di area unitaria per differenza di temperatura unitaria tra ambiente interno ed esterno e si calcola come:

$$U_w = \frac{A_g U_g + A_f U_f + l_g \psi_g}{A_g + A_f}$$

Dove:

U_g [$W/(m^2K)$]: trasmittanza termica del componente trasparente

A_g [m^2]: area del componente trasparente

U_f [$W/(m^2K)$]: trasmittanza termica del telaio

A_f [m^2]: area del telaio

l_g [m]: perimetro totale della vetrata

ψ_g [$W/(mK)$]: trasmittanza termica lineare (dovuta alla presenza del distanziatore posto tra i due vetri in corrispondenza del telaio)

Il fattore di trasmissione solare è definito come il "Rapporto fra il flusso dovuto alla radiazione solare complessivamente entrante in ambiente (dato dalla somma fra il flusso trasmesso direttamente più quello assorbito e riemesso in ambiente per convezione ed irraggiamento) e la radiazione solare incidente"

$$\tau_e = \phi_{e,t} / \phi_{e,i}$$

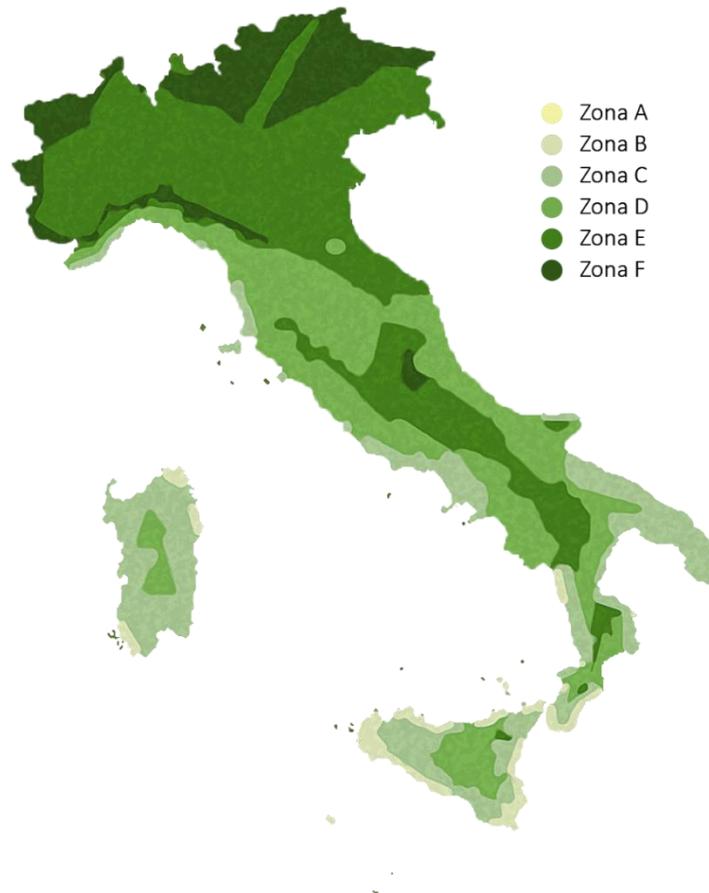
Il fattore di trasmissione luminosa esprime la quantità di luce trasmessa attraverso il vetro (quindi di raggi visibili) in percentuale. I vetri comuni presentano una trasmissione luminosa di circa il 90%, mentre nei vetri colorati o trattati può diminuire sensibilmente.

Il Decreto Legislativo 19 agosto 2005, n. 192, "Attuazione della direttiva 2002/91/CE relativa al rendimento energetico nell'edilizia" richiede, in base alle zone climatiche di appartenenza dell'edificio, il rispetto di valori limite di trasmittanza termica U, espressa in W/m^2K , nell'ottica di limitare le dispersioni di calore favorendo un buon isolamento termico all'interno della costruzione.

Nella tabella di seguito vengono riportati i valori di trasmittanza richiesti a seconda della zona climatica di interesse.

Valori limite trasmittanza U dei vetri espressa in W/m^2K		
Zona climatica	U dal 1 gennaio 2006	U dal 1 gennaio 2009
A	5,0	5,0
B	4,0	3,0
C	3,0	2,3
D	2,6	2,1
E	2,4	1,9
F	2,3	1,6

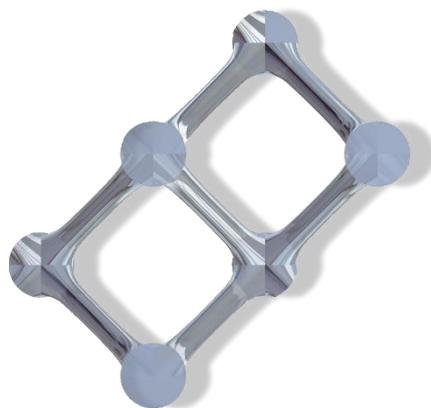
In Italia la fascia A è quasi del tutto assente ad eccezione di una ristretta zona in Sicilia, mentre è possibile notare una forte prevalenza di aree in fascia climatica C, D ed E. Le zone climatiche sono distribuite nel modo seguente:



Zone climatiche in Italia

CAPITOLO 2

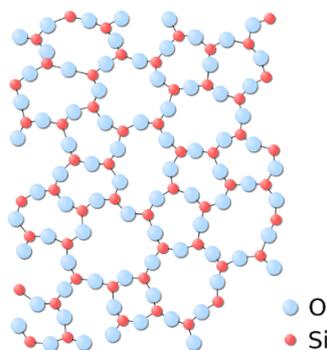
MATERIALI E PROCESSI



2.1 Il vetro

In architettura il vetro riveste un ruolo sempre di maggior rilievo nella composizione di un edificio, infatti la tendenza degli ultimi anni è quella di costruire edifici sempre più leggeri e trasparenti. Dalla Rivoluzione Industriale ad oggi la produzione di vetro ha incontrato una domanda sempre crescente e un ampio utilizzo in vari ambiti.

È possibile descrivere il vetro come un materiale inorganico formato da una miscela di silicati aventi una struttura amorfa e non cristallina, prodotto per processi di fusione e raffreddamento. La fase liquida del vetro è molto viscosa e non cristallizza nel corso di un comune raffreddamento, inoltre non fonde ad una temperatura definita ma il processo dalla fase solida a quella fusa in modo molto graduale. L'assenza di una struttura cristallina non consente alcuna dislocazione e di conseguenza nessuna plasticità nel materiale, pertanto il vetro può deformarsi solo elasticamente o si rompe immediatamente. La sua composizione chimica influisce fortemente sulle proprietà fisiche del materiale. In generale il vetro è composto da sostanze a struttura vetrosa, chiamate "formatori", come la silice (SiO_2) che si presenta sotto forma di sabbia e da "modificatori" che permettono di rendere la miscela più lavorabile a temperature più basse e solitamente si utilizzano a questo scopo ossidi di metalli alcalini e alcalino-terrosi.



Struttura molecolare del vetro (SiO_2)

A partire dalla silice, è possibile fare una prima distinzione tra il vetro sodico-calcico (SLSG) che presenta una percentuale di silice pari al 75% e quello borosilicato che sostituisce agli ossidi alcalini quelli di boro presenti nella miscela per circa il 7-15%.

Il vetro a base di silice di calce gassata è quello maggiormente utilizzato nell'edilizia, poiché comporta minori costi di produzione, mentre il vetro borosilicato viene utilizzato prevalentemente per usi speciali. Poiché il coefficiente di dilatazione termica è inferiore, il vetro borosilicato ha una maggiore resistenza agli sbalzi termici pertanto viene adottato quando sono richieste caratteristiche particolari come per esempio la protezione antiincendio.

Il vetro comune (sodico-calcico) come abbiamo visto ha la silice come componente fondamentale, ma è composto altresì dal 12-16% ossido di sodio (Na₂O) e dal 10-15% di calce (CaO) unitamente ad alcune sostanze che possono essere aggiunte a seconda delle proprietà che si vogliono ottenere come stabilizzanti, coloranti, opacizzanti o affinanti.

	Vetro sodico-calcico	Vetro borosilicato	Vetro alluminosilicato
Sabbia silicea (SiO ₂)	69 - 74 %	70 - 87 %	58 - 62 %
Calce (CaO)	5 - 12 %	-	5 - 8 %
Sodio (Na ₂ O)	12 - 16 %	0 - 8 %	0 - 1 %
Ossido di boro (B ₂ O ₃)	-	7 - 15 %	0 - 5 %
Magnesio (MgO)	0 - 6 %	-	4 - 7 %
Ossido di alluminio (Al ₂ O ₃)	0 - 3 %	1 - 8 %	14 - 18 %
Altro	0 - 5 %	0 - 8 %	0 - 6 %

Composizione del vetro sodico-calcico, borosilicato e alluminosilicato (Schittich, Staib, Balkow, Schuler & Sobek, 2007)

PRODUZIONE DEL VETRO

La produzione del vetro avviene attraverso le seguenti fasi:

Macinazione, dosaggio e miscelazione



Fusione



Formatura



Ricottura



Controlli

(Gastaldi, Bertolini, 2011)

Dopo aver macinato e miscelato le materie prime, esse vengono introdotte in un'impastatrice rotativa da cui si ottiene un impasto omogeneo che viene successivamente fuso in forni a riverbero ad una temperatura di circa 1400 - 1600 °C. Durante questa fase è possibile aggiungere affinananti e omogeneizzanti affinché non si creino bolle di gas a causa della grande viscosità della miscela, che possono alterare la trasparenza del prodotto finale. Una volta terminata la cottura in forno e il raffreddamento del vetro, stabilizzando la sua temperatura intorno ai 1200 °C, inizia il processo di formatura vero e proprio che può avvenire attraverso i seguenti metodi: galleggiamento, soffiatura, pressatura e filatura.

Il 90% del vetro piatto prodotto nel mondo viene fabbricato con il sistema "a galleggiamento" inventato da Alastair Pilkington nel 1959, in cui il vetro fuso viene fatto galleggiare su un bagno di stagno fuso che realizza una superficie perfettamente piana senza difetti, poiché sullo stagno il vetro si distende e crea uno spessore costante. L'operazione avviene inserendo il vetro fuso attraverso dei rulli laminatori nel bagno di stagno in atmosfera controllata, la velocità del rullo determina lo spessore del vetro: maggiore è la velocità, più sottile è il vetro. Successivamente, la lastra di vetro viene raffreddata lentamente per prevenire l'insorgere di sollecitazioni e, infine, il vetro viene tagliato in base alle dimensioni richieste. Il processo Pilkington, che risale al 1959, prevede tre passaggi principali per la formazione di lastre di vetro piatto:

- fusione delle materie prime a 1600 - 1800 °C

- formazione della lastra a 800 - 1600 ° C
- raffreddamento a 100 - 800 ° C.

Questo processo garantisce prodotti a basso costo abbinati ad una buona qualità ottica ed è possibile produrre vetrate anche di grandi dimensioni. Il processo di produzione di massa e il le tecniche di post-elaborazione (rettifica, foratura, rivestimento, laminazione, rinvenimento, sabbiatura) hanno reso il vetro abbastanza economico da poter essere ampiamente utilizzato nel settore edile. I progressi nel campo delle tecnologie come la tempra e la laminazione, insieme all'utilizzo di strumenti di analisi strutturale, consentono di prendere in considerazione il vetro anche per applicazioni strutturali.

Il processo di soffiatura è utilizzato principalmente per lavorazioni artigianali e consiste nell'insufflare aria all'interno del vetro viscoso per impartirne la forma, attraverso la filatura invece si ottengono fibre di vetro e lana di vetro mentre la pressatura è utile per realizzare oggetti semplici attraverso uno stampo in cui il vetro dopo essere stato pressato viene fatto solidificare.

La caratteristica principale del vetro è indubbiamente la trasparenza, ovvero la capacità di trasmettere radiazioni nel campo del visibile, che permette di utilizzarlo per ambiti in cui la visibilità è fondamentale, come oggetti di uso comune oppure per le finestre degli edifici ma è fondamentale tenere presente oltre alle proprietà ottiche, le caratteristiche meccaniche e fisiche se si intende utilizzarlo come materiale di costruzione in ambito edilizio.

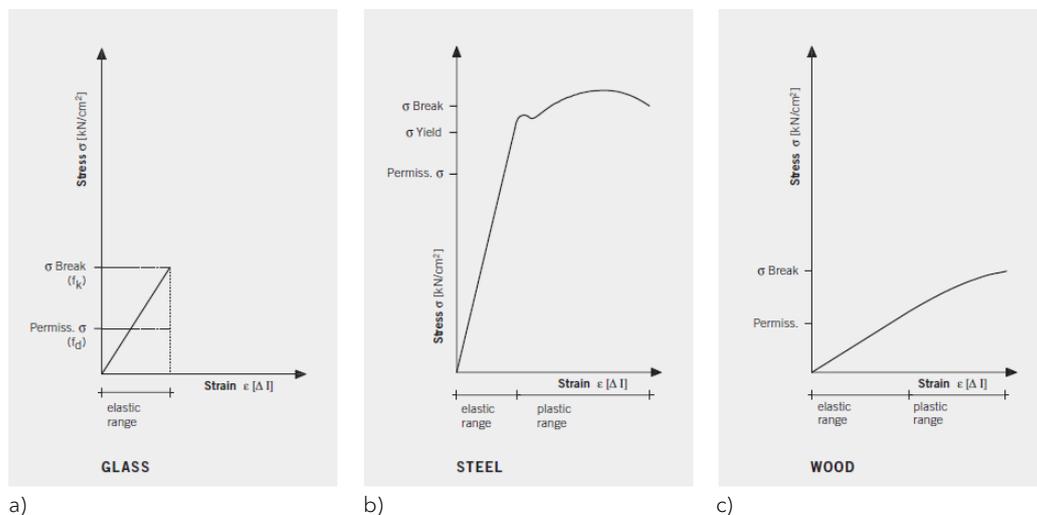
Principali proprietà dei vetri comuni	
Densità (g/cm ³)	2,5
Durezza (Mohs)	5-7
Resistenza a compressione (MPa)	300
Resistenza a trazione (MPa)	30-80
Modulo elastico (Gpa)	70
Conducibilità termica (W/m°C)	1,7
Coefficiente di dilatazione termica (°C ⁻¹)	9·10 ⁻⁶
Indice di rifrazione	1,5

Valori indicativi delle principali proprietà del vetro (Gastaldi, Bertolini, 2011)

PROPRIETÀ MECCANICHE

Il vetro è un materiale duro e fragile a temperature ordinarie e non mostra nessuna capacità di snervamento, ma ha un comportamento elastico lineare fino a rottura. Essendo un materiale molto sensibile a difetti anche di ridotte dimensioni, ha una bassa resistenza a trazione e ad urti, per questo motivo, è necessario adottare misure di sicurezza per utilizzare il vetro come materiale da costruzione.

Un elemento di vetro fallisce per frattura meccanica nel momento in cui l'intensità della sollecitazione dovuta agli sforzi di trazione raggiunge il suo valore critico in un punto in cui è presente un difetto. La propagazione delle crepe dipende dal carico, il che significa che più a lungo viene applicato il carico, più profonda diventa la crepa e questo porta ad una riduzione della capacità di trazione del materiale. Infine, è possibile affermare che la resistenza a trazione del vetro non è una costante del materiale, ma è fortemente correlata alla dimensione dell'elemento, all'intensità del carico e alla durata, unitamente alla presenza di umidità residua nell'ambiente.



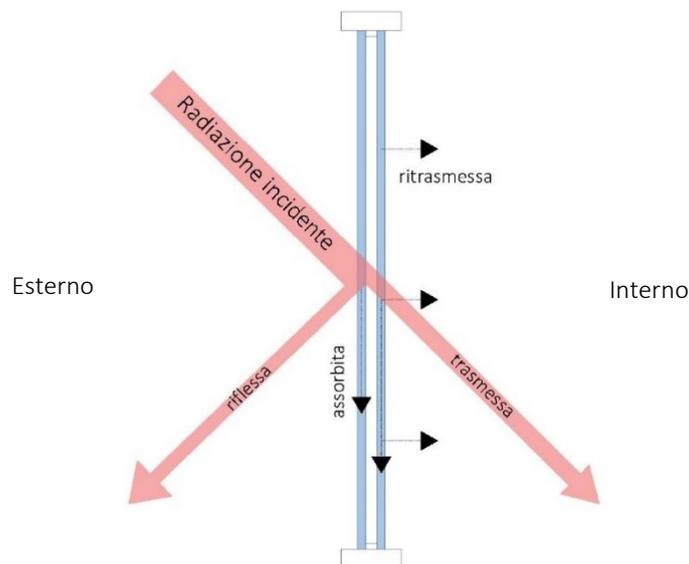
Prove di trazione del vetro (a), acciaio (b) e legno (c) (Wurm, 2007)

La natura dei difetti del materiale è il risultato del processo di produzione del vetro, che deteriora la superficie esterna di ogni pezzo quando viene tagliato, forato, lavorato ai bordi (levigatura, smerigliatura, lucidatura) o anche solo manipolato. In questo modo, i difetti agiscono come concentratori di stress quando vengono caricati in tensione in modo da rompersi la propagazione può iniziare da questi punti delicati.

PROPRIETÀ TERMICHE

Per poter utilizzare elementi in vetro in architettura è necessario considerare il loro comportamento dal punto di vista dell'isolamento termico. L'involucro trasparente di un edificio è infatti quello maggiormente soggetto alle dispersioni di calore e occorre ricorrere ad espedienti tecnologici per incrementare le caratteristiche termiche del vetro al fine di limitare l'utilizzo di impianti di riscaldamento e raffreddamento.

L'energia solare incidente su una vetrata si divide in tre componenti: essa può essere trasmessa, riflessa oppure assorbita per poi essere ritrasmessa.



Schematizzazione della trasmissione della radiazione solare attraverso il vetro

Per poter valutare le prestazioni del vetro occorre considerare l'energia totale trasmessa, tenendo conto che questi contributi variano a seconda della composizione del vetro, dal numero di lastre e dal loro spessore, dal gas in intercapedine e dai possibili rivestimenti. Nel periodo estivo, infatti, l'obiettivo principale è quello di ridurre l'ingresso dell'energia solare incidente sulle vetrate mentre, nel periodo invernale la priorità è limitare la perdita del calore per conduzione dall'interno all'esterno dell'edificio.

Per caratterizzare una vetrata dal punto di vista fisico è possibile analizzarne i parametri principali che ne descrivono il comportamento. Essi sono:

U → Trasmittanza termica (W/m^2K), definita come la quantità di calore che fluisce tra un ambiente interno e un ambiente esterno in presenza di una differenza di temperatura;

λ → Conducibilità termica ($W/m^{\circ}C$), dipende dalla natura del materiale e misura quanto esso sia soggetto a trasmettere calore per conduzione termica, quando i contributi al trasferimento di calore per convezione e per irraggiamento termico sono trascurabili;

a → Fattore di assorbimento, indica la percentuale di radiazione che viene assorbita dal componente rispetto alla totale incidente;

r → Fattore di riflessione, indica la percentuale di radiazione che viene riflessa dal componente rispetto alla totale incidente;

t → Fattore di trasmissione, indica la percentuale di radiazione che viene trasmessa dal componente rispetto alla totale incidente;

T_{sol} → Trasmissione solare, indica il rapporto tra la quantità di radiazione trasmessa dal componente vetrato e la totale radiazione incidente su tale componente;

T_{vis} → Trasmissione solare visibile, indica la porzione di luce visibile che passa attraverso il componente vetrato. Essa coinvolge le lunghezze d'onda tra 0,38 e 0,78 μm .

G → Fattore solare, è un parametro che varia tra 0 e 1 e misura l'energia termica solare trasmessa direttamente o indirettamente attraverso il componente vetrato considerando l'irradianza diretta e diffusa.

e → Emissività, è il rapporto tra l'energia irradiata da un materiale e quella irradiata da un corpo nero (ovvero un oggetto ideale che assorbe tutta la radiazione solare, quindi con emissività pari a 1) alla stessa temperatura. Nel caso di un materiale il valore di emissività è compreso tra 0 e 1.

Il vetro senza particolari trattamenti è chiamato vetro chiaro ed è caratterizzato da un elevato valore di trasmissione solare visibile e infrarossa ma anche di trasmittanza termica, per questi motivi il suo utilizzo garantisce un ingresso maggiore di luce naturale all'interno di un ambiente ma trasmette un grande quantità di energia solare, la quale, in situazioni climatiche che favoriscono le alte temperature, risulta essere un elemento negativo e impattante rendendo necessario un sistema di raffrescamento estivo.

Un'importante espediente per limitare le dispersioni è l'interposizione di una camera d'aria all'interno di due o più lastre di vetro, dando origine ad una vetrocamera. Interponendo aria secca o un gas nobile nella cavità tra due vetri è possibile incrementare in modo drastico l'isolamento di una vetrata, dal momento che l'aria o i gas come l'argon hanno una conducibilità termica molto inferiore a quella del vetro.

Al vetro chiaro, inoltre, possono essere aggiunti componenti metallici durante il processo di galleggiamento che conferiscono al vetro delle proprietà ottiche e termiche differenti. Una possibilità è rappresentata dal vetro colorato, che in genere tende a colorazioni come verde, blu, bronzo e grigio, che può essere utilizzato in architettura per facciate che possano filtrare calore e luce: i pigmenti metallici infatti riducono il passaggio dell'energia solare abbassando il valore di trasmittanza. Un'altra tipologia di vetro colorato è rappresentata dalla presenza di un rivestimento interno in ossidi metallici che riflette il calore all'interno o all'esterno dell'edificio, mantenendo in tal modo un più alto valore di trasmissione visibile pur riducendo il passaggio di calore.

Sempre depositando ossidi metallici sulla superficie di una lastra è possibile ottenere un vetro riflettente, ovvero un elemento in grado di riflettere verso l'esterno una parte dell'energia solare incidente evitando il surriscaldamento degli ambienti.

Un'altra tecnica possibile per limitare il surriscaldamento degli ambienti è quella dei rivestimenti basso-emissivi o a controllo solare. Si tratta ricoprire la lastra di vetro con una patina di ossidi metallici e metalli, creando sul vetro di base uno strato di adesione, uno strato d'argento, uno strato protettivo e infine lo strato di rivestimento. Il rivestimento basso-emissivo permette di ridurre al minimo la dispersione dell'energia irradiata dai corpi riscaldati all'interno dell'edificio, riflettendola all'interno, viene posto generalmente sulla superficie interna della lastra nelle vetrocamere.

2.2 Il vetro sottile

Il vetro sottile è un prodotto che è diventato popolare nell'ultimo secolo grazie al suo utilizzo nei dispositivi elettronici, in particolare nella realizzazione delle schermate degli smartphone, ma che ha rivelato caratteristiche interessanti che hanno attirato l'attenzione di altri campi, compresi l'ambito architettonico e di ingegneria strutturale. Si tratta di lastre di vetro di spessore inferiore a 2 mm, i cui vantaggi principali sono leggerezza, flessibilità e resistenza (Hundevad, 2014).

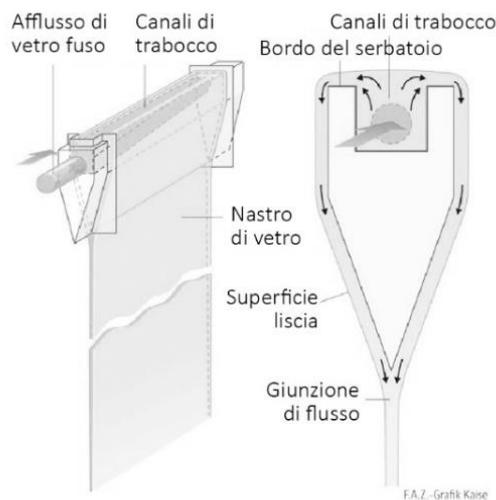
La composizione chimica del vetro sottile è stata studiata da Gomez nel 2011 e la possibilità di utilizzare il vetro sottile come materiale da costruzione è stata proposta prima da Lambert & O'Callaghan e successivamente da Hundevad. Quest'ultimo ha notato che la tendenza in architettura è quella di utilizzare in facciata vetrate sempre più grandi al fine di ottenere ambienti luminosi e ariosi, ma tale obiettivo ha portato alla produzione di pannelli sempre più pesanti dal momento che si è reso necessario l'ispessimento delle vetrate e la loro laminatura per criteri di sicurezza e per soddisfare i requisiti strutturali richiesti (Hundevad, 2014). Questa tendenza comporta più svantaggi poiché implica un maggiore utilizzo di materiale di supporto poiché è necessaria una maggiore capacità meccanica, ma anche più energia e manodopera nel trasporto e montaggio dei pannelli. Nell'ottica quindi di un risparmio in termini di materia prima ed energia di produzione ci si è interrogati sul modo di poter utilizzare minori quantitativi di vetro ottenendo risultati soddisfacenti.

Sebbene il vetro sottile sia un materiale fragile, è caratterizzato da un'alta resistenza ai graffi e agli urti. Le proprietà del vetro sottile rispetto al vetro comune dipendono dalla sua composizione ma in gran parte anche dal differente processo di lavorazione, che prevede che la superficie del vetro non abbia alcun tipo di contatto con dei solidi durante il processo di produzione. Il risultato finale è una lastra di ottima qualità che, avendo maggiore resistenza, consente al vetro di essere meno soggetto alle sollecitazioni di flessione, permettendogli anche di piegarsi con raggi di curvatura minori. Il raggio minimo è direttamente correlato allo spessore della lastra: più sottile è il vetro, minore è il raggio di curvatura che può raggiungere senza rompersi (Silveira, 2016).

È possibile produrre vetro di spessore così esiguo grazie ad appositi processi come quello di galleggiamento adattato ma ancor meglio tramite la fusione "overflow" o il processo "down-draw".

Questi due metodi sono caratterizzati da un processo di scorrimento verticale ed entrambi hanno il vantaggio di generare la lastra di vetro senza che esso sfiori il contenitore.

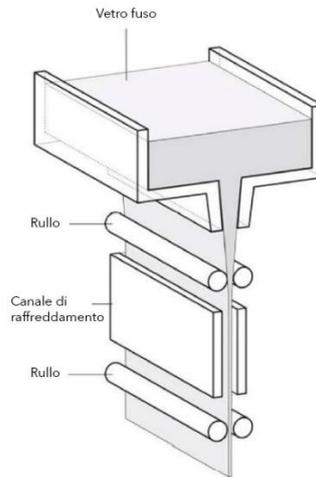
Il processo di fusione "overflow" o a trabocco è stato brevettato da Corning nel 1964 per l'industria dei parabrezza delle automobili, ma l'utilizzo di tale processo ha subito un considerevole incremento a partire dagli anni '80 per la produzione di schermi per computer e televisori. Il metodo "overflow" consiste nel versare il vetro fuso, dopo la fusione e miscelazione delle materie prime, in un serbatoio a forma di V. Quando il serbatoio è pieno, il vetro fuso "trabocca" da entrambi i lati e per effetto della gravità scorre verticalmente verso il basso finché i due flussi non si uniscono formando una superficie di vetro liscia. Dopo una fase di raffreddamento in cui il vetro raggiunge sufficiente rigidità, viene tagliato attraverso delle taglierine per realizzare lastre singole.



Processo a trabocco (Silveira, 2016)

Simile al processo a trabocco è il metodo "down-draw", che si ispira a tecniche antiche di fabbricazione del vetro e risale agli anni '70. In questo caso il serbatoio ha un foro sottile sul fondo, da cui può fluire il vetro fuso formando un "nastro" collegato alla fornace. Il vetro fuso viene poi raffreddato a temperatura ambiente mediante forni di ricottura. Dopo questo processo di raffreddamento controllato, il vetro viene tagliato in dimensioni specifiche.

Uno possibile sviluppo di queste tecniche è rappresentato dalla possibilità in futuro di produrre rotoli di vetro ultrasottile lunghi oltre 100 metri.



Processo down-draw (Forneris, 2020)

Una volta prodotto il vetro, sono necessarie alcune operazioni di post-elaborazione per soddisfare i requisiti di prestazioni, sicurezza, forma e aspetto. Per evitare rotture impreviste, vengono effettuate a prodotto finito delle misurazioni al fine di rispettare normative specifiche. Una volta che il vetro è stato tagliato ed eventualmente smussato, può essere eseguito un trattamento specifico per rinforzarlo che può essere di tipo fisico o chimico.

Il processo termico di tempra consiste nel sottoporre il vetro, dopo la ricottura, ad un ulteriore processo di riscaldamento (circa 600 °C) per poi farlo raffreddare velocemente tramite appositi getti d'aria. La superficie delle due facce si raffredda più velocemente dell'interno, in tal modo vi è una differente contrazione degli strati superficiali che comporta sforzi di compressione rispetto agli strati interni che raffreddano più lentamente e creano sforzi di trazione. Gli sforzi di compressione contrastano l'insorgere di difetti e crepe sulla superficie del materiale, incrementando la resistenza a flessione e agli urti.

La procedura che, però, viene generalmente impiegata per rafforzare il vetro sottile è quella della tempra chimica. È possibile infatti ottenere un prodotto più resistente immergendo il vetro in un bagno di sali di potassio a circa 350 °C. Il bagno dà luogo ad uno scambio tra ioni di diversa dimensione: gli ioni di sodio vengono sostituiti da ioni di

potassio, che sono più grandi. Poiché il volume del vetro deve rimanere costante, gli ioni vengono compressi per adattarsi allo spazio, generando uno strato uniforme sullo strato esterno. Rispetto alla tempra fisica questo processo interessa uno spessore minore della lastra quindi viene utilizzato maggiormente per vetri più sottili.

Sono state effettuate ricerche e studi sul vetro sottile in alcune tesi di laurea presso L'Università di Delft, che hanno rappresentato un punto di partenza per la definizione delle caratteristiche del materiale in ambito strutturale. In vetro ultrasottile, in questo contesto, rappresenta una soluzione interessante, infatti, mantiene la propria stabilità e forma anche all'aumentare delle temperature.

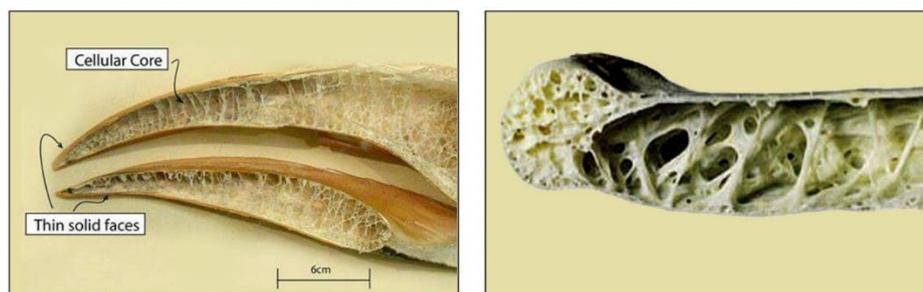
L'utilizzo di vetri sottili con uno spessore da 0,5 mm a 3 mm apre un campo inedito in ambito architettonico, che consente di giocare con la geometria dell'involucro trasparente. L'elevata flessibilità del vetro sottile consente nuove opzioni nella creazione di elementi curvi, tramite la piegatura del materiale piuttosto che implementando le cerniere in un sistema di pannelli rigidi pieghevoli. Ciò consente di realizzare facciate con vetri sottili curvati a freddo o vetri di sicurezza stratificati mediante laminazione di strati di vetro sottile che forniscono una migliore tenuta, maggiore semplicità di costruzione e robustezza.

2.3 Pannelli sandwich

Come è stato detto in precedenza, la necessità di fabbricare vetrate più ampie in edilizia comporta notevoli svantaggi dal punto di vista del peso e del consumo di materiale ed energia, ma d'altra parte l'utilizzo del vetro sottile da solo non è in grado di provvedere ai requisiti meccanici richiesti a causa della sua alta deformabilità e flessibilità. Le strutture a sandwich rappresentano una soluzione molto efficace per aumentare la rigidità degli elementi planari senza aumentarne il peso e potrebbero potenzialmente essere la soluzione al problema.

Un pannello sandwich è un elemento costituito da due fogli sottili, rigidi e resistenti costituiti da un materiale denso che sono legati con uno spesso strato di materiale a bassa densità, chiamato nucleo (Allen, 1969).

Le strutture sandwich sono utilizzate principalmente per applicazioni ad alte prestazioni in cui il peso dev'essere ridotto il più possibile, ad esempio strutture aeronautiche, imbarcazioni ad alta velocità e auto da corsa (Petras, 1998). In realtà la concezione della struttura a sandwich deriva da elementi presenti in natura con questa conformazione, infatti dall'inizio della vita sulla Terra si è formato e si è evoluto nel tempo materiale cellulare a bassa densità, ottimale per creare strutture in grado di supportare carichi di flessione elevati con un peso minimo.



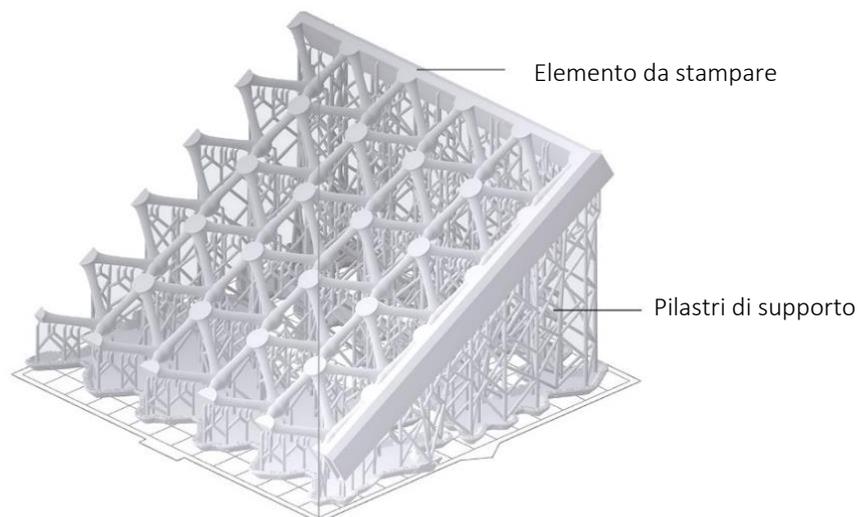
Sezione del becco di un uccello bucerotide (Dimitris, Vitalis. 2017)

Verrà analizzato il comportamento dei pannelli sandwich più nello specifico nel capitolo 3, in cui verrà definita una geometria per il nucleo tra le due lastre. Abbiamo visto le proprietà del vetro ma per quanto riguarda il materiale per la struttura da interporre tra i fogli esterni è stato scelto di utilizzare un materiale polimerico, a densità molto minore del vetro, che è possibile stampare tridimensionalmente tramite la produzione additiva.

2.4 Produzione additiva e PMMA

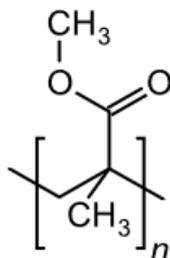
La produzione additiva è un processo industriale impiegato per fabbricare oggetti partendo da modelli 3D computerizzati ed è stata originariamente sviluppata su materiali polimerici, cere e laminati di carta e, solo successivamente, sono stati introdotti compositi, metalli e ceramiche. La materia prima deve essere preparata in uno stato compatibile con la tecnologia utilizzata, per esempio nella stereolitografia e nel getto d'inchiostro, il materiale deve essere in uno stato liquido che formerà un reticolo nel momento in cui verrà esposto alla radiazione UV appropriata. Una volta stampato l'oggetto è necessario un processo di post-elaborazione al fine di migliorare la microstruttura, ridurre la rugosità e rifinire la superficie. Le materie plastiche sono suddivise in polimeri amorfi, polimeri semicristallini e termoindurenti (Bourell, Kruth, Leu, Levy, Rosen, Beese, Clare, 2017).

Per il processo di estrusione del materiale, è preferibile l'utilizzo dei termoplastici amorfi, per via delle loro caratteristiche di fusione. Questi polimeri si ammorbidiscono in un ampio intervallo di temperature fino alla cosiddetta temperatura di smaltatura, formando un materiale avente la viscosità ideale per l'estrusione del materiale attraverso un ugello di diametro 0,2-0,5 mm. I processi di estrusione dei materiali richiedono strutture di supporto che devono essere successivamente rimosse durante la post-elaborazione. Nel caso del nostro nucleo è stata creata una struttura reticolare realizzata con lo stesso materiale ma con un design leggero e punti di contatto molto ridotti con l'elemento stampato in modo da rimuovere agevolmente il supporto una volta terminata la stampa.



Anteprima di stampa sul software PreForm

È stato scelto come materiale per il nucleo il PMMA ($C_5H_8O_2$) $_n$ ovvero il polimetilmetacrilato, una materia plastica formata da polimeri del metacrilato di metile, estere metilico dell'acido metacrilico.



Formula chimica del PMMA

La scelta è stata dettata dalle sue caratteristiche di elevata trasparenza e resistenza ai raggi UV, oltre al fatto che si tratta di un materiale economico e leggero. Il PMMA possiede caratteristiche simili al vetro per qualità di trasparenza se non addirittura migliori, inoltre a seconda delle percentuali della sua composizione può essere molto meno fragile e ha una buona lavorabilità. Possiede, inoltre, un'elevata resistenza meccanica, un alto modulo di Young, anche se non un elevato allungamento a rottura.

Riportiamo di seguito una tabella delle principali caratteristiche del polimetilmetacrilato.

	Metodo	Unità di Misura	PMMA	PMMA antiurto
Proprietà Fisiche				
Densità	ISO 1183	g/cm ³	1.19	1.15 - 1.17
Assorbimento d'acqua	ISO 62	%	0.3	0.33 - 0.38
Proprietà Ottiche				
Trasmissione luminosa	ASTM D 1003	%	92	90 - 91
Haze			0,3	0,4
Indice di giallo (Y.I)			0,3	0,5
Proprietà Meccaniche				
Resistenza a trazione	ISO 527	MPa	74	40 - 60
Allungamento a rottura	ISO 527	MPa	5	14946
Modulo di elasticità	ISO 527	MPa	3300	1800
Urto con intaglio	ISO 180	kJ/m ²	1.3	43986
Urto senza intaglio	ISO 179	kJ/m ²	44176	25 - 60
Rockwel Hardness - M scale	ASTM D 785		90	55 - 75
Resistenza all'abrasione	ASTM D 673		11	18 - 20
haze % 2000 Carborundum				
Proprietà Termiche				
Temp. di rammollimento	ISO 306 B	°C	111	100 - 108
Temp. di deflessione	ISO 75	°C	102	90 - 98
Temp. massima di esercizio		°C	80	70 - 75
Coeff. di Espansione Lineare	VDE 0304/1		6.7	7.5 - 10
Intervallo Termoformatura		°C	170 - 200	150 - 190

2.5 Tecnologie ad alta efficienza termica: VIG, AEROGEL, PCM

Oltre al vetro sottile e al PMMA è stata svolta una ricerca bibliografica sui materiali e le tecnologie che possono essere considerate nell'elaborazione del pannello sandwich al fine di incrementarne l'isolamento. Le più affini al prototipo che si è scelto di realizzare che sono state prese in considerazione sono: VIG, PCM e Aerogel.

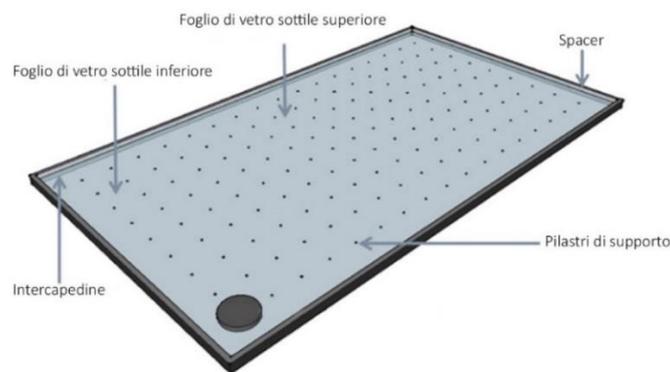
VIG

I "Vacuum insulated glazing", ovvero vetrate isolanti sottovuoto, sono una tecnologia emergente sviluppata circa 20-30 anni fa, per ottenere finestre ad alta prestazione termica poiché sono strutturati in modo da disperdere una minima quantità di calore nonostante lo spessore ridotto e hanno un'elevata trasmissione del visibile. Si tratta di due fogli di vetro separati da una cavità mediante una struttura di supporto costituita da piccoli pilastri che tengono distanziate le due lastre. Il ruolo del vuoto tra i due vetri è quello di minimizzare i fenomeni di conduzione e convezione che influiscono sul valore della trasmittanza. I primi esempi di VIG sono stati fabbricati negli anni Ottanta, ma solo negli anni Duemila si è pervenuti a risultati soddisfacenti grazie ad alcuni tentativi realizzati dal Nippon Sheet Glass Group. I prototipi consistevano in fogli di vetro dello spessore di 3, 4 o 5 mm inframmezzati da pilastri di altezza 0,2 mm e diametro 0.5 mm. È stato poi realizzato un coating basso emissivo su una delle due lastre in modo da raggiungere un valore di trasmittanza pari a $1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Per studiare e ottimizzare ulteriormente il comportamento termico di questa tecnologia sono stati analizzati sperimentalmente l'impatto delle emissività delle superfici delle lastre di vetro all'interno della cavità, il raggio del pilastro di supporto, la distanza tra un pilastro e l'altro e la conduttività termica dei materiali utilizzati.

Il trasferimento di calore radiativo tra le due superfici interne del vetro deve essere mantenuto il più basso possibile per essere in grado di ottenere buone prestazioni termiche da una vetratura sottovuoto. A questo proposito, Eames ha fornito un'indicazione circa l'incremento di calore radiativo che si scambia per varie combinazioni di diversi rivestimenti low-e per una differenza di temperatura tra la superficie interna ed esterna del vetro di 20° . I risultati hanno rivelato che il valore di

trasmissione della vetrata sottovuoto aumenta esponenzialmente con la conduttività termica del vetro, ma che tale valore dipende altresì dalla conduttività termica del pilastro di supporto (Cuce, Cuce, 2016).

Il pannello studiato in questa tesi può essere assimilato alla tecnologia VIG, essendo formato anch'esso da due fogli di vetro inframmezzati da pilastri, con la differenza che si è scelto di utilizzare il vetro sottile per le lastre e che il nucleo interno è costituito da una struttura piramidale che, come abbiamo potuto vedere nel capitolo precedente, e ha una presenza più massiva all'interno della cavità. Per questo motivo oltre a tenere in considerazione l'influenza del raggio dei pilastri si è reso necessario valutare un parametro in più rappresentato dall'angolo di inclinazione del pilastro.



AEROGEL ASSOCIATO A VACUUM GLAZING

La tecnologia ad aerogel consiste nel riempimento tra più lastre di vetro di un materiale amorfo e poroso super leggero, con una densità pari a circa 2200 Kg/m^3 , formato da aria e silice (Berardi, 2015). L'Aerogel è una miscela scoperta nei primi anni '30 da Kistler come risultato di una scommessa, ma da allora sono stati sviluppati vari prodotti utilizzando diverse materie prime per ottimizzare le sue proprietà, generalmente un gas e una sostanza allo stato solido, la più comune delle quali è la silice. I gel essiccati presenti nella miscela sono caratterizzati da un'elevata porosità, caratteristica che comporta un valore di conduttività termica inferiore rispetto all'aria. L'aerogel più comune si compone infatti dal 99,8% di aria e dal 0,2% di diossido di silicio (silice), il principale componente del vetro, per questo motivo è mille volte meno denso del vetro ed è la sostanza solida meno densa conosciuta.

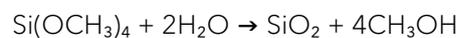
Questo materiale per le sue caratteristiche ha una trasmittanza molto bassa (di circa 0.013 W/m²K) e pertanto il suo utilizzo è molto vantaggioso dal punto di vista dell'isolamento termico, allo stesso tempo è leggero e permette il passaggio della trasmissione luminosa. Per quanto riguarda le proprietà ottiche i vetri ad aerogel, grazie al loro essere traslucidi, possono ridurre l'effetto di abbagliamento e migliorare il comfort visivo, tuttavia questa caratteristica influenza la qualità della visione.

Esistono due tipologie di Aerogel attualmente in produzione: aerogel monolitico e aerogel granulare. Gli aerogel di silice monolitici possono essere utilizzati sia in condizioni climatiche che prevedono raffrescamento sia in quelle che prevedono riscaldamento e sono caratterizzati da una maggiore trasmissione solare rispetto a quelli granulari, pari a circa il 90% contro il 50% di quelli granulari. Tuttavia, spesso si verificano incrinature durante la produzione di grandi pezzi di aerogel di silice monolitica. Al contrario l'Aerogel granulare ha una trasmissione luminosa molto inferiore ma delle caratteristiche ottimali dal punto di vista del risparmio energetico (Gao, Jelle, Ihara, Gustavsen, 2014).

Il processo di produzione di aerogel di silice prevede tre fasi principali:

- La preparazione del gel mediante processo sol-gel;
- L'invecchiamento del gel nella sua soluzione madre per evitare che si restringa durante l'asciugatura;
- L'essiccazione in condizioni speciali per impedire il collasso strutturale del gel.

L'obiettivo di questo processo è quello di avere un materiale essiccato con la stessa consistenza porosa del talco bagnato. Una reazione semplificata per l'aerogel di silice è:



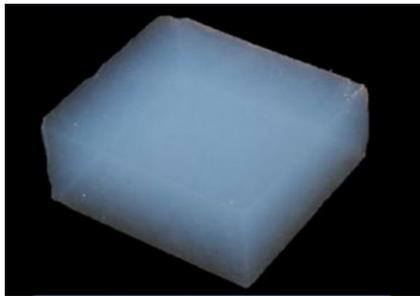
(Berardi, 2015)

Sebbene sia possibile raggiungere valori di trasmittanza molto bassi con diverse tecnologie per finestre, come per esempio i vetri stratificati a tre lastre con cavità riempite da gas e rivestimenti basso emissivi, si avrebbero delle soluzioni con un peso considerevolmente più alto che richiederebbe quindi una resistenza maggiore e più difficoltà di applicazione e montaggio.

I vacuum glazing associati ad aerogel risultano simili ai doppi vetri ma la cavità è riempita appunto con aerogel di silice, che essendo un materiale nanoporoso a bassa densità e bassa conducibilità termica, rappresenta un'ottima alternativa come soluzione di isolamento termico, oltre ad essere un materiale non tossico con buona resistenza al fuoco e buon isolamento acustico.

Le proprietà termiche e visive dell'aerogel dipendono dal solvente usato, la base di silice e il processo di produzione. L'aerogel è un materiale amorfo la cui densità è intorno a 2200 Kg/m^3 in termini di struttura dello scheletro, ma dato il fatto che i nanopori occupano più del 90% del volume totale del materiale composito, la densità apparente finale è compresa tra 50 e 200 Kg/m^3 . Grazie alle straordinarie dimensioni dei piccoli pori e all'elevata porosità, gli aerogel raggiungono una conducibilità termica notevolmente bassa ($0,005 - 0,02 \text{ W/mK}$), risultante da una relazione ben bilanciata tra la bassa conduttività dello scheletro solido, la bassa conduttività gassosa e la bassa trasmissione a infrarossi radiativi.

Nel caso del pannello preso in esame sono state prese in considerazione due possibilità: la prima contempla l'utilizzo dell'aerogel all'interno dell'intercapedine tra le due lastre di vetro sottile e la seconda invece prevede inserimento dell'aerogel all'interno del nucleo strutturale cavo al fine di aumentarne le proprietà di isolamento termico.



Aerogel monolitico



Aerogel granulare

PCM

Il materiale a cambiamento di fase (PCM) è una tecnologia che ha riscosso grande interesse nel mercato negli ultimi anni grazie alle sue proprietà termiche, come l'elevato calore latente e il processo di trasferimento del calore isotermico. La differenza principale di questo materiale rispetto alle altre tecnologie è che può assorbire o rilasciare una

grande quantità di calore latente al momento del cambiamento di fase. Inoltre, la temperatura del PCM rimane pressoché costante nel periodo di cambio di fase, il che significa che la temperatura superficiale dell'involucro edilizio non raggiunge valori troppo alti, evitando così un elevato trasferimento di calore (Hu, Heiselberg, 2018).

Il PCM è stato utilizzato in molte applicazioni edili, per esempio una delle applicazioni è la miscelazione di PCM con materiali da costruzione come cartongesso, intonaco, cemento o altri pannelli per pareti.

I materiali a cambiamento di fase utilizzati nei vetri di facciata di un edificio possono rappresentare una grande innovazione grazie alle proprietà di isolamento, traslucenza (che comporta un'illuminazione diffusa all'interno degli ambienti e capacità di accumulo termico. Quando l'interno dell'edificio in estate inizia a riscaldarsi oltre una certa temperatura, il PCM cambia stato "sciogliendosi" e assorbe l'energia termica che altrimenti porterebbe al surriscaldamento. Il PCM traslucido trasmette la maggior parte della luce visibile ma assorbe completamente la radiazione infrarossa. Dopo 8 ore, quando il PCM è completamente fuso, la temperatura esterna solitamente scende al di sotto del punto di fusione e il materiale inizia a ricristallizzarsi durante la fase notturna (www.glassx.ch).

Un esempio di PCM all'interno di una vetrata in ambito architettonico è riscontrabile nella casa di riposo Domat Ems degli Schwarz Architekten in Svizzera. Si tratta di un edificio ad alta efficienza energetica caratterizzato da una facciata quasi completamente vetrata esposta a sud in cui viene utilizzato un vetro innovativo chiamato Glass x in combinazione a vetro comune. Questo particolare vetro è un elemento di facciata prefabbricato adatto a costruzioni leggere ed è costituito da uno strato centrale in PCM inserito in vetri isolanti (www.schwarz-architekten.com).

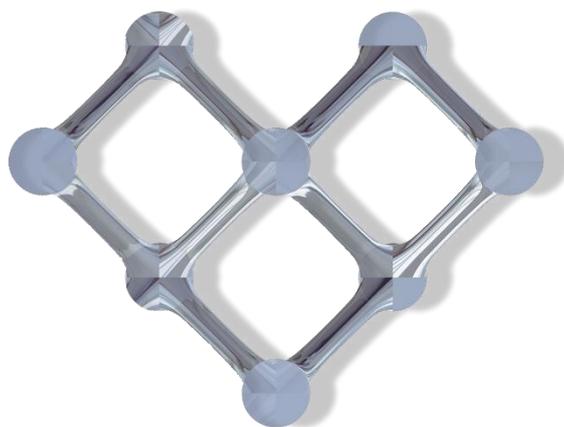


Alterswohnen, Domat Ems (schwarz-architekten.com)

CAPITOLO 3

CASI STUDIO E

CONCEPT ARCHITETTONICI



3.1 Casi Studio

In questo capitolo verranno analizzati alcuni casi studio e ambiti di applicazione architettonica con tecnologie che possono essere assimilabili al caso studiato e di interesse architettonico, osservandone la tecnologia e i principali vantaggi.

In futuro, lo sviluppo delle costruzioni sarà determinato da requisiti e vincoli sempre più esigenti. Nell'ambito del risparmio energetico in particolare si punterà sull'incremento nell'utilizzo dell'energia solare e la limitazione delle dispersioni, per questo motivo è utile capire come un prodotto possa essere efficace sotto più punti di vista e rappresentare una valida alternativa alle tecnologie tradizionali.

Di seguito verranno presentate sette schede di edifici con tecnologie per facciate vetrate ad alto isolamento termico che possono essere spunti interessanti per stratigrafia, ambito di applicazione, proprietà termiche o proprietà ottiche, in riferimento all'applicazione architettonica del pannello sandwich oggetto di studio.

Scheda 1

OFFICE BUILDING BISKUPSKA

Luogo: Ostrava, Repubblica Ceca

Anno: 2011

Architetto: Kuba & Pilař Architects

Destinazione d'uso: Uffici



Vista prospettica dell'Office Building



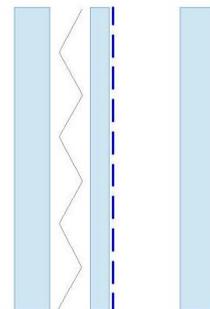
Vista dall'interno dell'Office Building

L'edificio, posto vicino alla piazza principale e al fiume Ostravice, è caratterizzato da una forma a parallelepipedo totalmente vetrato, che riprende lo sviluppo dell'isolato perimetrale. La facciata è composta da vetrate isolanti con all'interno una struttura metallica atta a schermare l'edificio dai raggi solari ma anche a garantire la privacy degli ambienti interni degli uffici. Essa, che ricorda la trama del nucleo del nostro pannello, è strutturata come una griglia scura in filigrana che conferisce alla facciata un effetto di semi trasparenza e lucentezza, inoltre il vetro funzionale garantisce all'interno degli ambienti un'illuminazione naturale diffusa e poco aggressiva evitando così fenomeni di abbagliamento. Nonostante la totale vetratura, durante il giorno la visuale dall'esterno risulta limitata garantendo la privacy degli occupanti, mentre i dipendenti dell'ufficio hanno una buona visuale verso l'esterno. Di notte l'effetto cambia e il cubo di vetro sembra essere illuminato dall'interno da installazioni luminose.

Tecnologia utilizzata: VETROCAMERA CON INSERTI METALLICI

Principali funzioni:

- Protezione solare e antiriflesso, (angolo di incidenza 60°)
- Ingresso solare ridotto nell'edificio
- Protezione antincendio secondo i requisiti
- Combinazione di privacy e vista parziale
- Luce diurna uniformemente diffusa



Sezione schematica

Scheda 2

CENTRAL LIBRARY SEATTLE

Luogo: Seattle, Stati Uniti

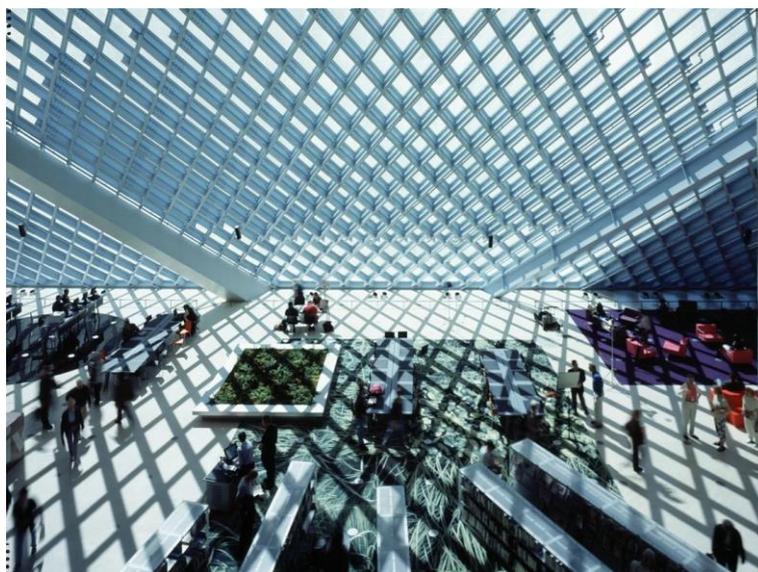
Anno: 2004

Architetto: Rem Koolhaas, Joshua Prince-Ramus

Destinazione d'uso: Biblioteca Centrale



Vista prospettica della Central Library di Seattle



Vista della copertura della Central Library di Seattle dall'interno

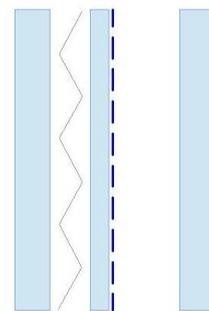
La Central Library di Seattle progettata da Rem Koolhaas è un edificio interamente realizzato in vetro e acciaio dalla forma geometrica anticonvenzionale costituito da più volumi sovrapposti. Ogni piano è definito dall'architettura e attrezzato per funzioni specifiche e prestazioni dedicate. Poiché ogni piattaforma è progettata per uno scopo unico, la loro dimensione, flessibilità e struttura variano. Gli spazi tra i piani funzionano come ambienti di scambio in cui si organizzano e si interfacciano le diverse funzioni disposte su più volumi con spazi per il lavoro, l'interazione e il gioco.

Le facciate dell'edificio sono caratterizzate da una maglia di travi metalliche inclinate in cui si inseriscono 10.000 pannelli di vetro isolante che ricordano la forma di diamanti, la maggior parte delle quali hanno un rivestimento di alluminio espanso che conferisce alla pelle esterna una lucentezza metallica. Questo caso studio è interessante per la luce diffusa che contraddistingue gli spazi interni destinati alla lettura, infatti anche in questo caso i vetri sono semi trasparenti e il pattern a maglia fine del piano intermedio consente una buona visuale verso l'esterno e gli inserti di alluminio svolgono anche la funzione di sistema selettivo direzionale della luce diurna.

Tecnologia utilizzata: VETROCAMERA CON INSERTI METALLICI

Principali funzioni:

- Sistema selettivo direzionale della luce diurna
- Buona visuale
- Protezione antincendio secondo i requisiti
- Luce diurna uniformemente diffusa



Sezione schematica

Scheda 3

THE NELSON ATKINS MUSEUM OF ART - Espansione

Luogo: Kansas city, Stati Uniti

Anno: 2007

Architetto: Steven Holl Architects

Destinazione d'uso: Museo d'arte



Vista dei padiglioni dell'estensione del Nelson Atkins Museum of art



Vista notturna di un padiglione del Nelson Atkins Museum of art

Il nuovo padiglione del Nelson Atkins Museum viene definito "Bloch Building" per la sua forma a parallelepipedo e si estende lungo il bordo orientale del campus. La struttura è caratterizzata da cinque blocchi di vetro, che attraversano il parco delle sculture e originano nuovi spazi e prospettive fondendo arte e architettura.

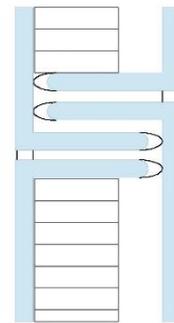
Il primo dei cinque padiglioni ospita uno spazio di accoglienza per il pubblico attraverso un ingresso molto luminoso con un caffetteria e una biblioteca d'arte, e sono presenti rampe di collegamento alle gallerie e al giardino. Le gallerie sono organizzate in sequenza in accordo con la progressione delle collezioni, e scendono gradualmente verso il parco. Un nuovo asse trasversale collega l'ingresso ai grandi spazi dell'edificio originale. Di notte, il volume di vetro è illuminato e attira i visitatori per eventi e attività. I molteplici strati di vetro traslucido dell'involucro raccolgono, diffondono e rifrangono la luce, dando l'impressione di blocchi di ghiaccio.

L'involucro traslucido della struttura è costituito prevalentemente da pannelli di vetro profilati a U e fornisce agli spazi espositivi un'illuminazione naturale. Sono stati utilizzati circa 350 mq di pannelli con lastre capillari che diffondono delicatamente la luce del giorno nelle sale espositive sotterranee.

Tecnologia utilizzata: PANNELLO CAPILLARE A NIDO D'APE

Principali funzioni:

- Protezione dai raggi UV
- Protezione antincendio secondo i requisiti
- Luce diurna uniformemente diffusa
- Buon isolamento termico
- Ottima illuminazione



Sezione schematica

Scheda 4

CITÉ DE L'OCÉAN ET DU SURF

Luogo: Biarritz, Francia

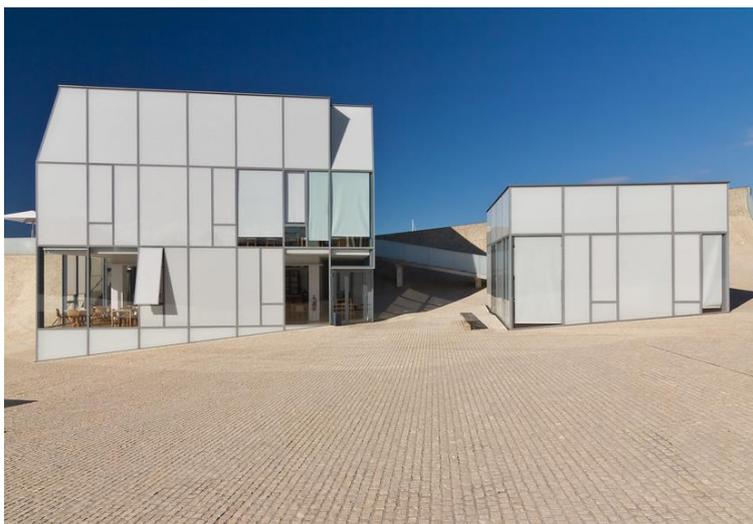
Anno: 2011

Architetto: Steven Holl Architects, Solange Fabião

Destinazione d'uso: Museo



Vista d'insieme della Cité de l'Océan et du Surf



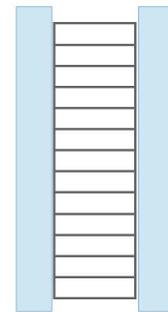
Vista frontale dei padiglioni della Cité de l'Océan et du Surf

Un edificio caratteristico per forma e tecnologia è quello del museo della “Cité de l’Océan et du Surf” a Biarritz. Si tratta di una costruzione dinamica e anticonvenzionale che si basa sull’idea di integrazione con il paesaggio e la topografia del luogo, infondendo al visitatore la sensazione di essere sotto la superficie dell’acqua. È costituito da cubi di vetro con pannelli geometrici che creano un interessante contrasto con le curve morbide dell’edificio. Le qualità spaziali dell’edificio si sperimentano già all’ingresso dove l’atrio e le rampe danno un’ampia veduta aerea delle aree espositive, mentre passano lungo la superficie curva dinamica che è animata da immagini in movimento e luce. Le vetrate sono traslucide e conferiscono agli spazi interni un’atmosfera di luce e apertura, inoltre il vetro isolante con lastre capillari diffonde la luce del giorno in profondità e in modo uniforme negli ambienti interrati, offrendo contemporaneamente un’ottima protezione dal sole e dall’abbagliamento e riducendo la necessità di illuminazione artificiale.

Tecnologia utilizzata: PANNELLO CON TUBI CAPILLARI

Principali funzioni:

- Isolamento termico ottimale
- Elevata trasmissione della luce
- Illuminazione uniforme e priva di ombre
- Luce diurna diffusa
- Protezione dai raggi UV
- Protezione antincendio secondo i requisiti



Sezione schematica

Scheda 5

JARMAN BUILDING, SCHOOL OF DRAMA FILM & VISUAL ARTS

Luogo: Canterbury, Regno Unito

Anno: 2009

Architetto: Hawkins\Brown

Destinazione d'uso: Università



Vista prospettica del Jarman Building



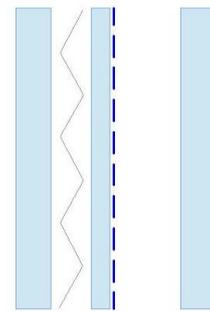
Vista frontale del Jarman Building e della piazza antistante

L'Università del Kent a Canterbury è costituita da un edificio che ospita una scuola di teatro, cinema e arti visive. È stato scelto un design semplice a blocco per essere inserito agevolmente all'interno del Campus di Canterbury, in cui sulle facciate nord, ovest ed est è presente un rivestimento a scandole metalliche, intervallato da strette finestre. Il fronte sud dell'edificio, che si affaccia su una piazza destinata ad essere un punto di arrivo al campus, è invece caratterizzato da due ordini di alte vetrate verticali sui due terzi inferiori della facciata, offrendo ai passanti all'esterno una vista sulla scuola. Sono stati scelti per questa esposizione dei pannelli di vetro isolante caratterizzati da inserti metallici nella cavità che consentono un'efficace protezione solare, un'elevata trasmissione della luce e una visuale libera verso l'esterno. All'interno della scuola viene utilizzata il più possibile la ventilazione naturale e i camini, inseriti su spazi a doppia altezza, sfruttano il flusso d'aria naturale, mentre i lucernari rivolti a nord controllano passivamente i guadagni di calore.

Tecnologia utilizzata: VETROCAMERA CON INSERTI METALLICI

Principali funzioni:

- Isolamento termico con inserti metallici
- Elevata trasmissione della luce
- Visuale libera
- Protezione dai raggi UV
- Protezione antincendio secondo i requisiti



Sezione schematica

Scheda 6

BIOHOTEL IM APFELGARTEN

Luogo: Honenbercha, Germania

Anno: 2011

Architetto: Deppisch Architekten

Destinazione d'uso: Hotel



Vista della facciata del Biohotel verso il meleto



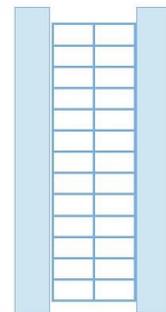
Vista della vetrata dall'interno di una delle stanze del Biohotel

L'edificio del Biohotel im Apfelparten a Honenbercha disegnato dallo studio Deppisch Architekten è un ottimo esempio di architettura sostenibile. La costruzione infatti si inserisce perfettamente nel contesto paesaggistico della zona, caratterizzato da alberi di mele, interpretando il *genius loci* del frutteto e allo stesso tempo è studiato tecnologicamente in modo da ridurre le emissioni di CO₂ praticamente a zero. L'edificio è scaldato totalmente da fonti di energia locali, in particolare i moduli fotovoltaici sul tetto provvedono a tutta l'elettricità necessaria, inoltre l'edificio è una costruzione componibile in legno prefabbricato e le stanze sono costruite con materiali riciclati o comunque con risorse rinnovabili rispettose dell'ambiente. Il vetro isolante adiacente ai lati delle porte finestre trasparenti dal pavimento al soffitto è stato dotato di inserti capillari bianchi traslucidi che fungono da schermatura. Il vetro funzionale diffonde la luce del giorno in modo uniforme e diffuso all'interno dell'hotel e i rami dei meli si riflettono come un affascinante gioco di luci e ombre.

Tecnologia utilizzata: SISTEMA CAPILLARE A LASTRE BIANCHE

Principali funzioni:

- Isolamento termico ottimale
- Elevata trasmissione della luce
- Illuminazione uniforme e priva di ombre
- Luce diurna diffusa
- Protezione dai raggi UV
- Protezione antincendio secondo i requisiti



Sezione schematica

Scheda 7

BERKELEY HOTEL - Pensilina

Luogo: Londra, Regno Unito

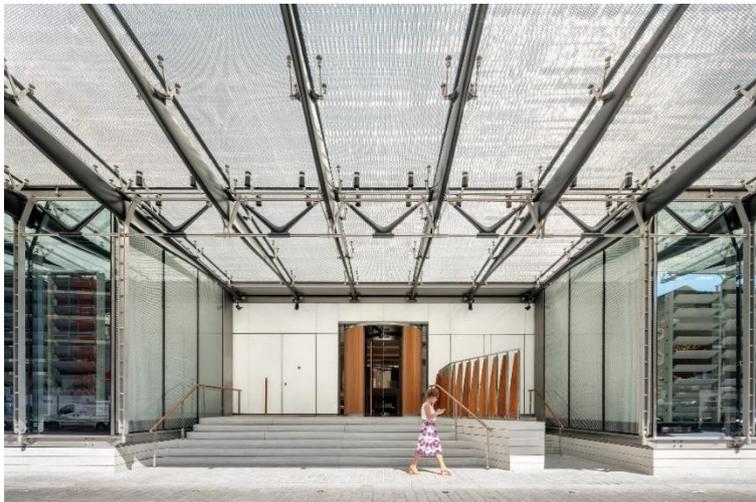
Anno: 2016

Architetto: Rogers Stirk Harbour & Partners

Destinazione d'uso: Hotel



Vista prospettica dell'ingresso al Berkeley Hotel



Vista renderizzata della pensilina all'ingresso del Berkeley Hotel

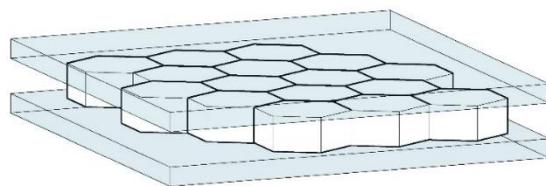
Il Berkeley Hotel, situato nel quartiere londinese di Knightsbridge, è interessante per il suo ingresso, in cui vengono usati per la copertura pannelli vetriati che possono essere assimilabili a quelli studiati in questa tesi. Infatti, la tettoia all'ingresso dell'hotel è una delle poche coperture realizzate con un pannello in vetro sandwich.

La nuova pensilina d'ingresso, con padiglioni vetriati che fiancheggiano le porte d'ingresso, è definita da un chiaro approccio strutturale. È composta da un soffitto in vetro di 28m x 10m e dal tetto che copre la zona di ingresso. Tutti i soffitti e i rivestimenti delle pareti laterali sono composti da pannelli in vetro sandwich alveolare sviluppati appositamente per questo progetto, mentre le pareti sono rivestite con vetro isolante. Il baldacchino è supportato da una serie di travi espresse in fibra di carbonio e il sistema di travi e vetrate è sostenuto dall'edificio esistente e da una serie di colonne in acciaio. La vetratura per il baldacchino e le pareti laterali ha un inserto a nido d'ape che riflette la luce di notte e dona all'edificio un senso di luce, ombra e movimento, offrendo vedute velate attraverso il vetro. Vengono utilizzati materiali tradizionali unitamente a materiali innovativi, nello specifico i pannelli sandwich utilizzati sono in vetro tamburato, composti da due lastre in vetro sottile a doppia pelle unite strutturalmente ad un nucleo alveolare in alluminio, ottenendo un pannello composito rigido e leggero con un singolare aspetto traslucido.

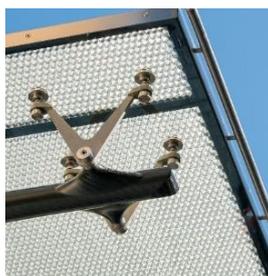
Tecnologia utilizzata: PANNELLO SANDWICH CON NUCLEO ALVEOLARE

Principali funzioni:

- Leggerezza
- Elevata trasmissione della luce
- Gioco di luci e ombre
- Elevata rigidezza



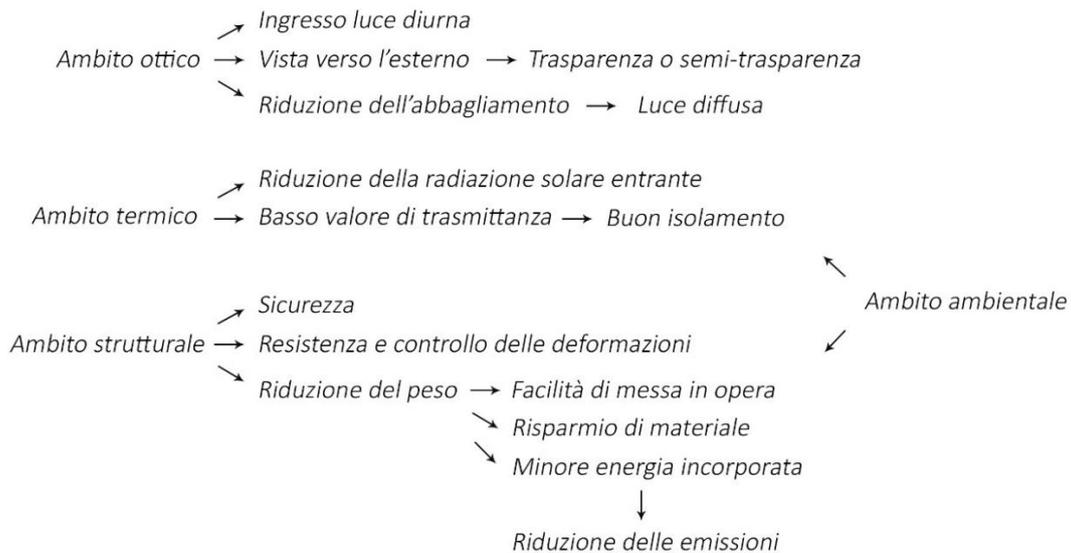
Sezione schematica



Dettaglio della pensilina

3.2 Ambiti di applicazione architettonica

Come è stato osservato nei casi studio presi in esame, i principali requisiti di prestazione che dovrebbe avere un pannello sandwich vetrato sono:



Le caratteristiche più problematiche da ottenere sono la resistenza strutturale e la trasmittanza termica, e nei capitoli successivi vedremo come incrementarle. La geometria del pannello che intendiamo ottenere, infatti, dovrebbe presentare dei significativi vantaggi dal punto di vista termico e strutturale e soprattutto in termini di leggerezza ma per contro la visibilità è ridotta leggermente dalla presenza della struttura interna e ancor più nei casi con aerogel interno. La presenza del nucleo, però, potrebbe essere studiata per proporre dei concept che ottimizzino la sua funzione e lo rendano efficace anche sotto altri punti di vista, per esempio come schermatura solare. Questo pannello sandwich infatti può implementare il valore architettonico di una costruzione ampliando la gamma di possibilità esistenti per i progettisti, grazie alla traslucenza della plastica stampata in 3D, il nucleo può assumere la funzione di schermo contro la luce diurna, permettendone però la penetrazione parziale e attenuandone l'abbagliamento, oltre a garantire agli occupanti maggiore privacy nell'esercizio delle attività all'interno della struttura. In base all'esposizione della facciata, infatti, può essere vantaggioso non avere

la radiazione diretta e potrebbe essere possibile studiarne una forma che per inclinazione impedisca ai raggi solari di penetrare negli ambienti interni in certe fasi dell'anno, inoltre la presenza di aerogel all'interno del pannello sandwich dà come effetto un'illuminazione diffusa. Per questo motivo gli ambiti di applicazione più ottimali sono quelli che concernono edifici che necessitano di grandi spazi luminosi per esempio biblioteche, scuole, musei oppure i pannelli possono essere molto congeniali nel caso di coperture trasparenti.

Certo, l'utilizzo del pannello con il nucleo interno non è ottimale nei casi in cui sia richiesta una vetrata completamente trasparente, dal momento che, fino ad ora, la produzione additiva con modellazione a deposizione fusa non consente la produzione di oggetti totalmente trasparenti, ottenibile magari con altri metodi di produzione. Un'idea di concept interessante, a tal proposito, è quella di creare un gioco di geometrie nella facciata alternando pannelli a ridotta visibilità a pannelli totalmente trasparenti.



Fotoinserimento rappresentativo della vista attraverso il pannello sandwich

Il valore della produzione additiva si traduce nella produzione relativamente rapida dei prototipi principali rispetto ad altri metodi e consente anche processi di progettazione più rapidi. Pertanto, è possibile studiare e produrre con questo metodo facciate dalle forme più irregolari e testarle strutturalmente. Il vetro sottile, a questo proposito, si adatta anche maggiormente ad essere piegato ed è quindi possibile la valutazione di facciate vetrate curve.

Inoltre, la leggerezza della struttura porta ad una facilità maggiore di montaggio e ad una riduzione della quantità di materiale utilizzato. Quest'ultima circostanza è interessante perché si può tradurre in una diminuzione degli impatti ambientali, poiché è richiesta meno energia per il processo di produzione del vetro sottile temprato rispetto al vetro soda-calcico standard, con conseguente riduzione delle emissioni di CO₂.

Di seguito vengono riportati alcuni concept architettonici di utilizzo del pannello, in facciata (figura A), in copertura (figura B), in alternanza a vetrate trasparenti (figura C) e in facciata curva (figura D).

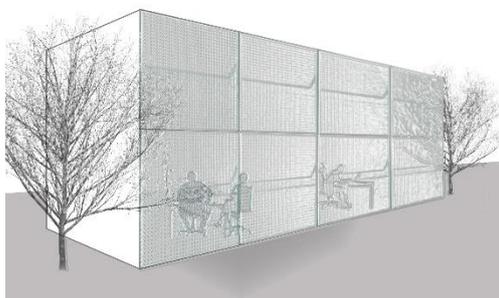


Figura A

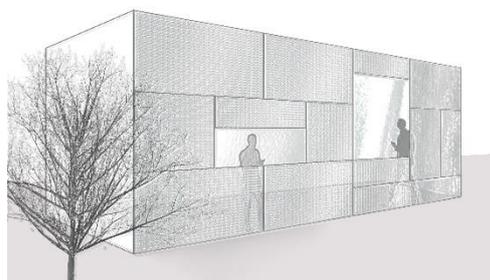


Figura C

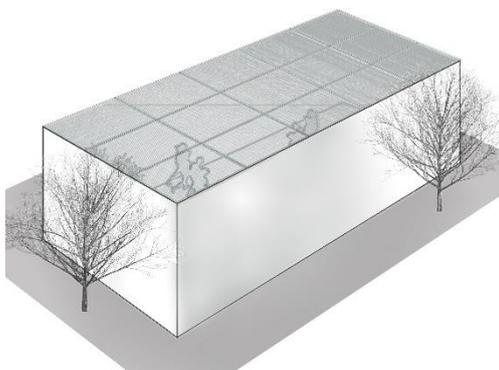


Figura B

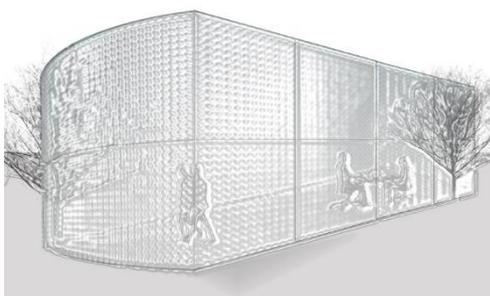
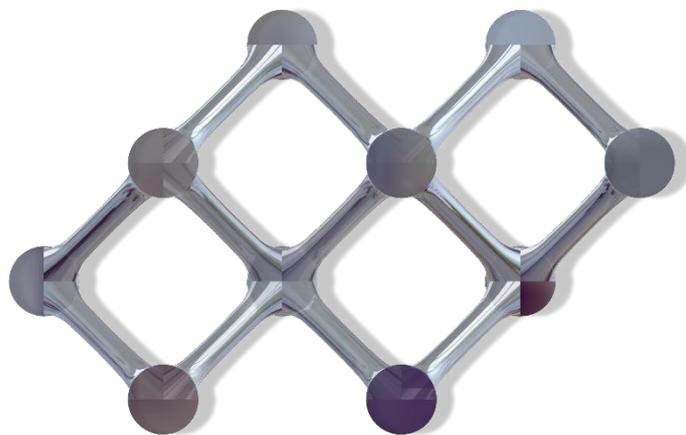


Figura D

CAPITOLO 4

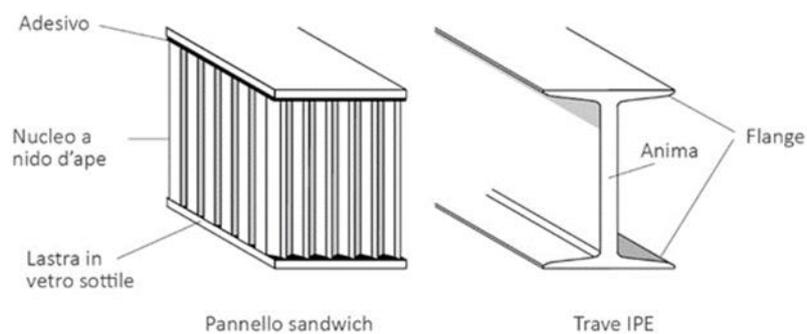
ANALISI STRUTTURALE



4.1 Struttura dei pannelli sandwich

Come è stato visto nel capitolo 2, un pannello sandwich è definito da due facce superficiali - nel nostro caso costituite da vetro sottile - intermezze da una struttura interna denominata nucleo, generalmente costituita da un materiale a bassa densità.

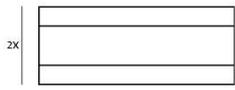
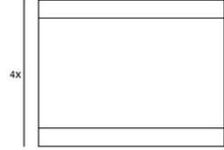
La concezione della struttura di un pannello sandwich si basa sull'idea di trasferire gli sforzi agenti sul pannello tra le sue superfici in modo che funzioni come una struttura omogenea. Nello specifico il comportamento strutturale di un pannello sandwich può essere paragonato a quello di una trave, per esempio ai profilati metallici IPE (Lazzaroni, 2018).



Confronto pannello sandwich e trave IPE

Le facce, infatti, forniscono una rigidità a flessione che permette di sopportare le sollecitazioni indotte dal momento flettente lavorando sia in tensione che in compressione, mentre il ruolo del nucleo è duplice: separa le facce di una distanza progettata mantenendo l'intero momento d'inerzia della sezione e fornisce resistenza al taglio, trasferendo gli sforzi tra le superfici del pannello e impedendo alle lastre di slittare (Akilo, 2018). Un aumento dello spessore della struttura a sandwich porta all'aumento

della rigidità del pannello e maggiore è la separazione tra le lastre maggiore è il momento di inerzia, con un aumento di peso poco incisivo, dando luogo a una struttura efficiente per resistere ai carichi di flessione e deformazione. La deformazione di un pannello sandwich è composta da componenti di flessione e taglio. La rigidità a flessione dipende dal Modulo di Young (E) del materiale delle lastre, mentre la rigidità al taglio dipende dal Modulo di taglio (G) del nucleo.

Confronto in termini di peso e rigidità fatto da Campbell Jr			
	Materiale solido	Pannello sandwich	Pannello sandwich più spesso
			
Rigidità	1	7	37
Resistenza a flessione	1	3,5	9,2
Peso	1	1,03	1,06

Proprietà meccaniche di un pannello pieno e di due pannelli sandwich al variare dello spessore

Per queste ragioni i pannelli sandwich sono ampiamente utilizzati nelle applicazioni ad alte prestazioni in cui sono richiesti requisiti di leggerezza, come nell'ambito dell'ingegneria aeronautica, ma possono essere utilizzate anche per applicazioni architettoniche. Le strutture sandwich sono molto efficienti normalmente in applicazioni in cui è fondamentale un elevato rapporto rigidità/peso, per esempio, negli elementi orizzontali in cui il carico agisce perpendicolarmente all'elemento e si aggiunge al carico generale applicato alla struttura. Per i pannelli sandwich utilizzati nelle applicazioni più critiche vengono comunemente utilizzati materiali compositi: per le lastre è possibile scegliere alternative economiche come l'acciaio, l'alluminio o il compensato, mentre per il nucleo sono più indicati polimeri, alluminio o legno. Per ridurre al minimo il peso, i materiali interni vengono utilizzati sotto forma di schiume, con una struttura a nido d'ape oppure con una costruzione ondulata.

Nel caso di applicazioni architettoniche in cui si vuole ottenere un elemento trasparente, è possibile ideare un pannello sandwich formato da lastre di vetro e nucleo interno in resina o materiale polimerico trasparente. Il vetro è un materiale con elevata resistenza a compressione ma a causa di inevitabili imperfezioni e difetti, la sua resistenza alla trazione è relativamente bassa. Anche la geometria del nucleo dev'essere tenuta in considerazione sia dal punto di vista strutturale sia estetico poiché trovandosi all'interno di lastre di vetro sarà visibile. Esistono diverse possibilità per la progettazione del nucleo, ognuna presenta alcuni vantaggi e alcuni svantaggi.

TIPOLOGIE DI NUCLEO

In letteratura sono descritte due topologie principali per quanto concerne l'anima tra le due lastre, ovvero nuclei omogenei e nuclei non omogenei. Quest'ultimo può essere suddiviso in quattro categorie:

- a) Supporto puntuale
- b) Supporto unidirezionale
- c) Supporto regionale
- d) Supporto bidirezionale

(Vitalis, Veer, Oikonomopoulou, 2018)



Figura A. Supporto puntuale



Figura B. Supporto unidirezionale



Figura C. Supporto regionale

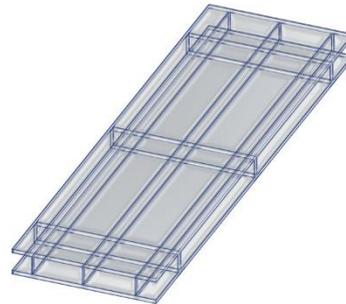


Figura B. Supporto bidirezionale

Sulla base di questa classificazione, fatta da Ashby, Wadley e Thomsen, inizialmente sono stati progettati, costruiti e testati da ricercatori dell'Università di Delft sette diversi pannelli, rappresentativi di tutte le alternative non omogenee. Per gli elementi centrali sono stati impiegati oggetti preconfezionati e standardizzati come ciotole di vetro e bicchieri per garantire che tutti gli elementi abbiano le stesse esatte dimensioni con tolleranze controllate (Vitalis, Veer, Oikonomopoulou, 2018).

Le lastre di vetro devono essere in grado di assorbire il momento flettente lavorando sia in tensione che in compressione e il nucleo deve tenere separati i due fogli e aumentarne il momento di inerzia.

Sebbene il materiale del nucleo abbia caratteristiche meccaniche inferiori rispetto alle facce, deve essere abbastanza rigido da assorbire le sollecitazioni di taglio, garantendo che durante la flessione si evitino o si riduca il più possibile lo scorrimento reciproco tra le facce. Inoltre, deve essere in grado di assorbire le sollecitazioni di compressione senza schiacciare o deformare, mantenendo le lastre più piane possibile.

A seguito delle prove di flessione effettuate sui prototipi delle quattro tipologie di nucleo, è emerso che il comportamento strutturale di tutte le soluzioni di pannello sandwich sia migliore rispetto a quello di un semplice vetro stratificato. In secondo luogo, i pannelli sandwich in vetro non sono solo più rigidi ma anche più resistenti delle sezioni piene dello stesso peso, infatti, si prevede che quest'ultimo fallisca sotto un carico inferiore a 1000 N mentre alcuni pannelli sandwich hanno resistito 8 volte questo carico. Infine, confrontando i pannelli con supporto regionale ai pannelli con supporto lineare, quest'ultimo fornisce una migliore interazione al taglio e quindi una maggiore rigidità ma il primo presenta valori più elevati di rigidità rispetto al peso, dal momento che i distanziatori regionali sono cavi e molto più leggeri rispetto a quelli continui e lineari. Tale caratteristica è importante da considerare nell'ambito di un progetto edilizio con pannelli sandwich in vetro, poiché il peso ha una notevole influenza sui costi, sull'energia incorporata e sulle dimensioni della sottostruttura.

Un altro elemento importante che deve essere considerato è il collegamento tra la struttura interna e i fogli di vetro, che tipicamente è costituito da connessioni adesive e deve essere in grado di trasferire le sollecitazioni e limitare gli scivoli reciproci.

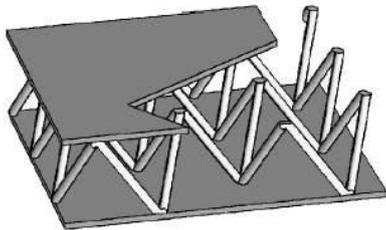
Per dimostrare il potenziale dei pannelli compositi in vetro sottile, è stato realizzato da ricercatori dell'Università di Delft un piccolo prototipo di pannello composito in vetro sottile 80 x 350 mm con un nucleo in fibra aramidica a nido d'ape e lastre esterne in vetro sottile rinforzato chimicamente di spessore pari a due millimetri, incollati tra loro da fogli intercalari SentryGlas. Il provino risultante è stato sottoposto a un carico di 1,5 kN in una

prova di flessione a 3 punti e il test ha dimostrato una soddisfacente interazione strutturale tra il vetro sottile e il nucleo in fibra aramidica a nido d'ape dando luogo ad un pannello composito sottile ma resistente.

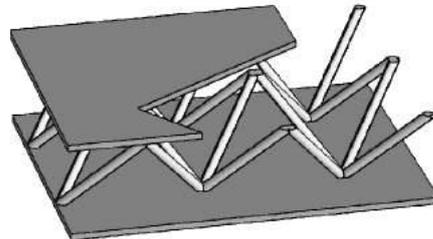
4.2 Definizione del modello

A seguito del lavoro di revisione della letteratura, è stato scelto come modello da analizzare quello del nucleo a struttura piramidale proposto da Michele Akilo dell'Università di Delf (Akilo, 2018). La geometria piramidale a celle aperte è una delle opzioni possibili per sostenere le sollecitazioni e fornire un comportamento rigido nel pannello. Inoltre, questa opzione fornisce un modello interessante che consente una trasparenza parziale e migliora il potenziale del vetro sottile, dal momento che l'obiettivo finale di questa ricerca è quello di proporre una scelta di facciata rigida e leggera che possa essere introdotta nel mercato dell'architettura in alternativa al comune vetro stratificato.

Un altro modello che si presta in modo ottimale a questi obiettivi è il nucleo tetraedrico, infatti sono entrambi realizzati con disposizione continua di elementi di capriata. La differenza tra loro è solo nel numero di elementi che convergono in ciascun punto. Per entrambe le opzioni è possibile trovare in letteratura soluzioni numeriche già sviluppate.



Conformazione di un nucleo tetraedrico



Conformazione di un nucleo piramidale

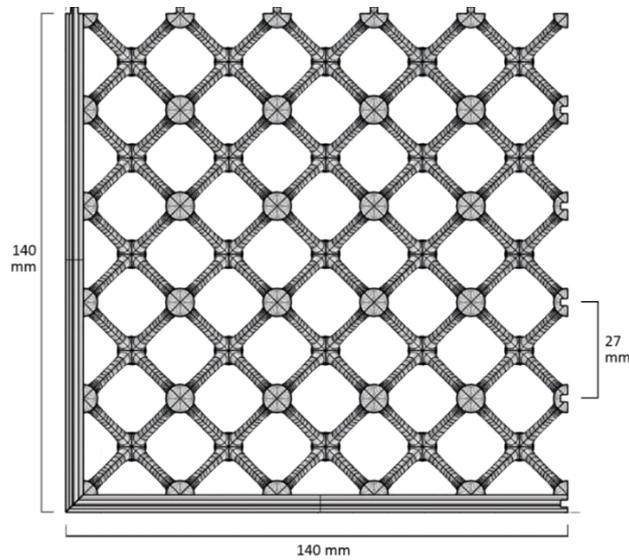
Il modello piramidale, che unisce quattro pilastri in ciascun nodo, dà luogo ad un sistema ortogonale che può garantire un'elevata resistenza e rigidità legate alla densità del nucleo. Il campione con un nucleo reticolare piramidale è risultato essere circa 125 volte più rigido del materiale di cui è composto.

Come punto di partenza è stato deciso di utilizzare una cella unitaria quadrata con un angolo di 45° . Per quanto riguarda l'altezza sono stati presi in considerazione i pannelli studiati da Michele Akilo (Akilo, 2018), che ha scelto un'altezza di 11 mm per il nucleo del suo pannello sandwich, e quello di Tim Neeskens (Lazzaroni, 2018) che ha invece

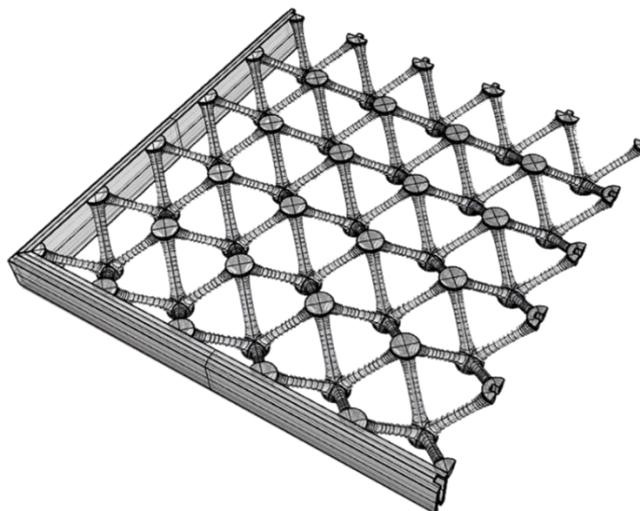
preferito un'anima di altezza 16 mm, che gli ha permesso di usarlo come elemento di copertura.

La struttura è stata quindi modellata tridimensionalmente tramite il software Rhino, creando una maglia di lato 14 cm, assemblabile tramite degli agganci. La dimensione è stata scelta in funzione della stampante 3D con cui successivamente è stato stampato il nucleo in resina.

Esso è costituito una struttura alta 15 mm formata da pilastrini disposti a piramide, con angolo di 45° , raggio al centro di 4 mm e agli estremi di 8 mm, che confluiscono in punti di contatto distanziati gli uni dagli altri di 27 mm.



3D della struttura elaborato con Rhino (vista in pianta)



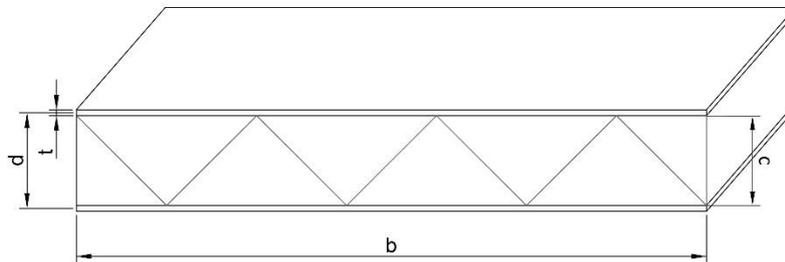
3D della struttura elaborato con Rhino (vista prospettica)

4.3 Calcolo della rigidezza flessionale e della deformazione di un pannello

Una volta definiti la geometria e materiali, è stato dunque possibile procedere con la valutazione delle caratteristiche meccaniche del pannello sandwich. Il modello analitico per il calcolo della rigidezza e della deflessione del pannello si basa sulla teoria delle travi sandwich (Allen, 1969). Partendo dai calcoli effettuati da Paolo Forneris (Forneris, 2020) nella sua tesi di laurea, sono state calcolate come primo step la rigidità flessionale D e la resistenza al taglio AG considerando la lastra come una trave, attraverso le formule:

$$D_{trave} = E_f \frac{bt^3}{6} + E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12}$$

$$AG = \frac{Gbd^2}{c}$$



Rappresentazione schematica della trave sandwich

Dove:

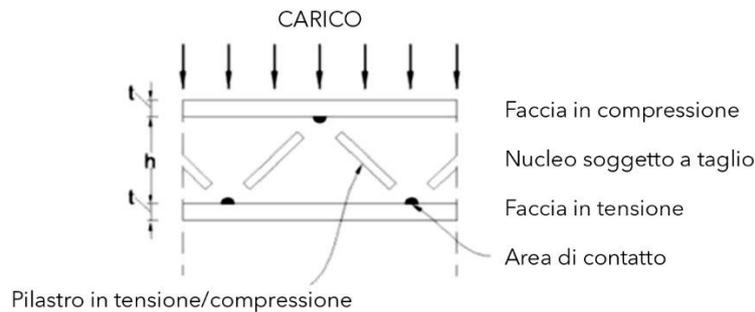
E_f è il modulo elastico delle lastre di vetro;

E_c è il modulo elastico del nucleo in PMMA;

G è il modulo al taglio del PMMA.

Si considera per i calcoli una trave sandwich semplicemente appoggiata con un carico distribuito su tutta l'ampiezza della trave. In caso di nucleo continuo ed omogeneo, le modalità di cedimento che possono verificarsi comprendono il cedimento delle facce esterne dovuto sia a tensioni sia a compressioni eccessive, cedimento della struttura interna o della connessione tra facce e il nucleo per sforzi di taglio eccessivi. È, inoltre,

fondamentale tenere conto anche della deflessione della trave, che deve essere definita al di sotto di un certo limite (Forneris, 2020).



Rappresentazione schematica del comportamento di un pannello sandwich sottoposto ad un carico distribuito

Tenendo presenti le condizioni di vincolo e di carico introdotte e considerando le deformazioni dovute a flessione e a taglio, la deflessione massima si ha in mezzeria e può essere calcolata come:

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{PL^4}{D} + \frac{PL^2}{8AG} = W_{max}$$

Dove:

W_{max} è la deflessione massima ammissibile e dipende dalla lunghezza del pannello;

D è la rigidezza a flessione della trave sandwich;

AG è la rigidezza a taglio della trave sandwich;

P è il carico distribuito per unità di lunghezza (N/m);

L è il lato del pannello;

Per semplificare, consideriamo come limite di deflessione per il pannello progettato il rapporto riportato dall'Eurocode 3 per gli stati limite per le coperture, pari a:

$$W_{lim} = \frac{L}{250}$$

L'obiettivo del progetto è minimizzare il comportamento flessibile del vetro sottile soggetto ad un carico, ottenendo un'indicazione circa la dimensione massima che può avere il pannello al fine di poter essere utilizzato in sicurezza, operando successivamente un confronto in termini di peso e spessore delle lastre di vetro.

Per i calcoli è stato considerato un pannello quadrato di lato pari ad un metro, con nucleo interno di altezza 15 mm e lastre di vetro di spessore 1 mm.

Il modulo elastico del vetro è noto, mentre per quanto riguarda il modulo elastico del nucleo è necessario tenere conto della geometria della struttura per il calcolo dei moduli E e G. Per i modelli piramidali e tetraedrici sono disponibili alcune formule analitiche, che consentono di valutare il modulo elastico normale E33 e il modulo al taglio trasversale modulo G13 di un nucleo continuo equivalente.

Considerando dunque la forma piramidale della struttura, il modulo elastico e il modulo al taglio del nucleo possono essere calcolare come:

$$\frac{E_{33}}{E_S} = \rho \sin^4 \omega = \frac{\pi \sin^3 \omega}{2 \cos^2 \omega} \left(\frac{d}{l}\right)^2 ;$$

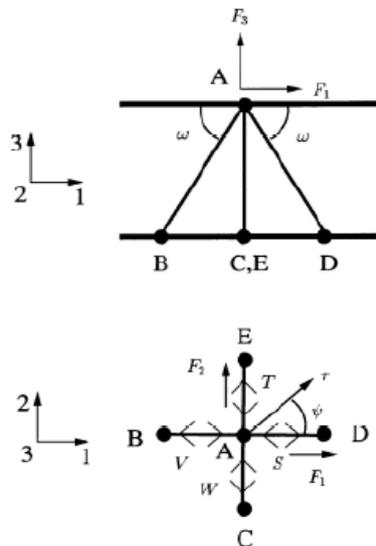
$$\frac{G_{13}}{E_S} = \frac{\rho}{8} \sin^2 2\omega = \pi \sin \omega \left(\frac{d}{l}\right)^2$$

Dove:

E_S è il modulo di Young del PMMA, pari a 73000 MPa;

ρ è la densità relativa, calcolata come $\rho = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\cos^2 \omega \sin \omega} \left(\frac{d}{l}\right)^2$;

ω è l'angolo di inclinazione dei pilastri.



Schema di applicazione delle forzanti per ottenere le proprietà equivalenti (Forneris, 2020)

Caratteristiche e dimensioni del pannello:

$b = 1000 \text{ mm}$	$E_f = 73000 \text{ MPa}$
$d = 16 \text{ mm}$	$E_c = 3300 \text{ MPa}$
$t = 1 \text{ mm}$	$E_{33} = 146,6 \text{ MPa}$
$c = 15 \text{ mm}$	$G_{13} = 293,2 \text{ MPa}$

Calcolo della rigidezza:

$$D = 73000 \frac{1000 * 1^3}{6} + 73000 \frac{1000 * 1 * 16^2}{2} + 146,6 \frac{1000 * 15^3}{12} = 9'397'402,17 \text{ N/mm}^2$$

Dal momento che non si tratta di una trave ma di una lastra è necessario fare un ulteriore passaggio nel calcolo della rigidezza D , ovvero moltiplicare il risultato che abbiamo ottenuto per $\frac{1}{(1-\nu)}$ dove ν è il coefficiente di Poisson che dipende dal materiale e rappresenta il grado in cui esso si restringe o si dilata trasversalmente in presenza di una sollecitazione monodirezionale longitudinale.

$$D_{lastra} = \frac{1}{(1-\nu)} \left[E_f \frac{bt^3}{6} + E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12} \right]$$

$$D_{lastra} = \frac{1}{(1-0,22)} \left[73000 \frac{1000 * 1^3}{6} + 73000 \frac{1000 * 1 * 16^2}{2} + 146,6 \frac{1000 * 15^3}{12} \right]$$

$$= 9'875'370 \text{ N/mm}^2$$

È ora possibile calcolare l'abbassamento W_a in mm che avrebbe la lastra soggetta ad un carico di 1 KN/m^2 , verificando che esso sia inferiore a $L/250$.

L'abbassamento è stato calcolato tramite la tabella *Numerical Factors $\alpha, \beta, \gamma, \delta, n$ for Uniformly Loaded and Simply Supported Rectangular Plates* presente nel volume *Theory of Plates and Shells* di Stepan Prokof'evič Timošenko, in cui calcolando la deformazione

massima come $W_{max} = \alpha \frac{qa^4}{D}$, viene fornito il fattore α in funzione del rapporto tra i lati della lastra, dove:

q è il carico uniformemente distribuito che grava sulla lastra, pari a 1 KN/m²;

a è il lato della lastra, pari a 1 m;

D è la rigidezza flessionale della lastra.

b/a	$w_{max} = \alpha(qa^4)/D$	$(M_x)_{max} = \beta qa^2$	$(M_y)_{max} = \beta_1 qa^2$	$(Q_x)_{max} = \gamma qa$	$(Q_y)_{max} = \gamma_1 qa$	$(V_x)_{max} = \delta qa$	$(V_y)_{max} = \delta_1 qa$	R $= nqa^2$
	α	β	β_1	γ	γ_1	δ	δ_1	n
1	0,00406	0,0479	0,0479	0,338	0,338	0,420	0,420	0,065
1,1	0,00485	0,0554	0,0493	0,360	0,347	0,440	0,440	0,070
1,2	0,00564	0,0627	0,0501	0,380	0,353	0,455	0,453	0,074
1,3	0,00638	0,0694	0,0503	0,397	0,357	0,468	0,464	0,079
1,4	0,00705	0,0755	0,0502	0,411	0,361	0,478	0,471	0,083
1,5	0,00772	0,0812	0,0498	0,424	0,363	0,486	0,480	0,085
1,6	0,00830	0,0862	0,0492	0,435	0,365	0,491	0,485	0,086
1,7	0,00883	0,0908	0,0486	0,444	0,367	0,496	0,488	0,088
1,8	0,00931	0,0948	0,0479	0,452	0,368	0,499	0,491	0,090
1,9	0,00974	0,0985	0,0471	0,459	0,369	0,502	0,494	0,091
2	0,01013	0,1017	0,0464	0,465	0,370	0,503	0,496	0,092
3	0,01223	0,1189	0,0406	0,493	0,372	0,505	0,498	0,093
4	0,01282	0,1235	0,0384	0,498	0,372	0,502	0,500	0,094
5	0,01297	0,1246	0,0375	0,500	0,372	0,501	0,500	0,095
∞	0,01302	0,1250	0,0375	0,500	0,372	0,500	0,500	0,095

Fattori numerici $\alpha, \beta, \gamma, \delta, n$ per piastre rettangolari caricate uniformemente (Timošenko, 1964)

Per $b/c = 1$ (lastra quadrata) si ha $\alpha = 0,00406$.

$$W_{max} = \alpha \frac{qa^4}{D} = 0,00406 \frac{0,001 * 1000^4}{9 \cdot 875 \cdot 370} = 0,41$$

$$\frac{L}{250} = \frac{1000}{250} = 4$$

$0,41 < 4 \rightarrow$ verificato

Dal momento che la struttura è ampiamente verificata, è interessante indagare quanto grande può essere la lastra affinché il rapporto resti verificato:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_{max} < \frac{L}{250} \\ D = \frac{1}{(1-\nu)} \left[E_f \frac{lt^3}{6} + E_f \frac{lt d^2}{2} + E_c \frac{lc^3}{12} \right] \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha \frac{ql^4}{D} < \frac{L}{250} \\ D = \frac{1}{(1-\nu)} \left[E_f \frac{lt^3}{6} + E_f \frac{lt d^2}{2} + E_c \frac{lc^3}{12} \right] \end{array} \right. \rightarrow \begin{array}{l} D = 9.397.402,17 \text{ N/m}^2 \\ L = 2100 \text{ m} \end{array}$$

Risolvendo il sistema si ha che il lato massimo che può avere la lastra affinché la struttura sia verificata è 2100 mm, calcoliamo anche in questo caso l'abbassamento:

$$W_{max} = \alpha \frac{qa^4}{D} = 0,00406 \frac{0,001 * 2100^4}{9.397.402,17} = 8$$

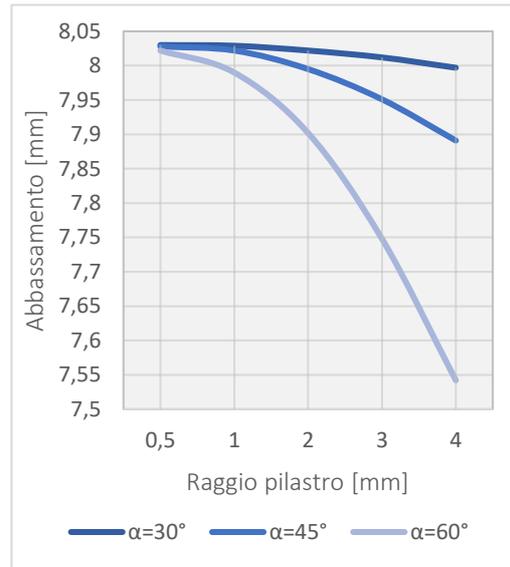
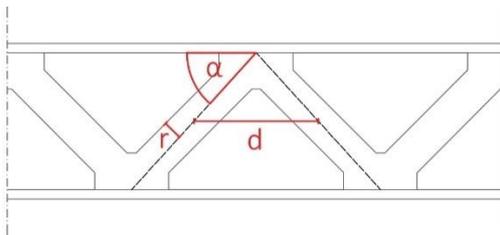
$$\frac{L}{250} = \frac{2100}{250} = 8,4$$

$$8 < 8,4 \quad \rightarrow \quad \text{verificato}$$

Infine, relativamente ad un pannello di lato 210 cm, è possibile osservare la variazione della deformazione in funzione di altri parametri, ovvero:

- Raggio del pilastro (r)
- Angolo di inclinazione del pilastro (α)

r [mm]	Wa [mm]		
0,0005	8,03	8,028	8,022
0,001	8,029	8,022	7,99
0,002	8,022	8,00	7,902
0,003	8,012	7,951	7,748
0,004	7,997	7,891	7,542
α	30°	45°	60°



4.4 Considerazioni in funzione del peso

Andrebbero fatte alcune valutazioni anche in funzione del peso, dal momento che ad una lastra più grande corrisponde un peso maggiore che può influire sulla difficoltà di trasporto e di montaggio. Come detto precedentemente, infatti, il vetro sottile può vincere alcune delle sfide affrontate nella costruzione come l'abbassamento del peso totale degli edifici con un risparmio di materiale e riducendo gli impatti ambientali. Considerando che approssimativamente il vetro ha un peso di 2,5 Kg/m² per ogni millimetro di spessore, è facile notare come un pannello sandwich con lastre di vetro sottile sia notevolmente più leggero rispetto ad un normale vetro camera, con lastre spesse mediamente 3-6 mm, pur mantenendo le stesse prestazioni strutturali.

Ponendo, per esempio, di impostare un peso massimo di 50 kg per pannello, è possibile calcolare la grandezza massima del lato ottenibile restando al di sotto di questo peso.

Considerando le due lastre di vetro di spessore un millimetro e sapendo che il nucleo in PMMA ha un volume di circa l'8% del volume totale dell'intercapedine, possiamo impostare tale equazione in funzione del lato massimo l :

$$\begin{aligned}
 & \text{Massa nucleo} + \text{Massa lastre} \leq 50 \text{ Kg} \\
 & (l^2 * s_i * 0,08 * d_{pmma}) + (2 * l^2 * s_v * d_v) \leq 50 \\
 & l^2(0,015 * 0,08 * 1180) + l^2(2 * 0,001 * 2600) \leq 50 \\
 & l^2(1,42 + 5,2) \leq 50 \\
 & l^2 \leq \frac{50}{6,62} \quad l \leq \sqrt{\frac{50}{6,62}} \quad l \leq 2,75 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Dove:

d_{pmma} → Densità del PMMA, pari a 1,18 g/cm³ ovvero 1180 Kg/m³

d_v → Densità del vetro, pari a 2,6 g/cm³ ovvero 2600 Kg/m³

s_i → Spessore dell'intercapedine tra le due lastre, pari a 0,015 m

s_v → Spessore di ogni lastra di vetro, pari a 0,001 m

Avendo osservato che il lato massimo ottenibile affinché il pannello sia verificato strutturalmente è di dimensione inferiore a 2,80 m possiamo avere la certezza che non superi i 50 kg di peso, infatti considerando un pannello di dimensione 2,10 x 2,10 m si avrà:

$$2,10^2(0,0101 * 1180) + 2,10^2(2 * 0,001 * 2600) = \mathbf{28,2 Kg}$$

È possibile impostare la stessa equazione variando lo spessore delle lastre, vedendo quanto cambierebbe la dimensione massima del lato di un pannello affinché resti sotto i 50 kg di peso, aumentando la quantità di vetro utilizzato:

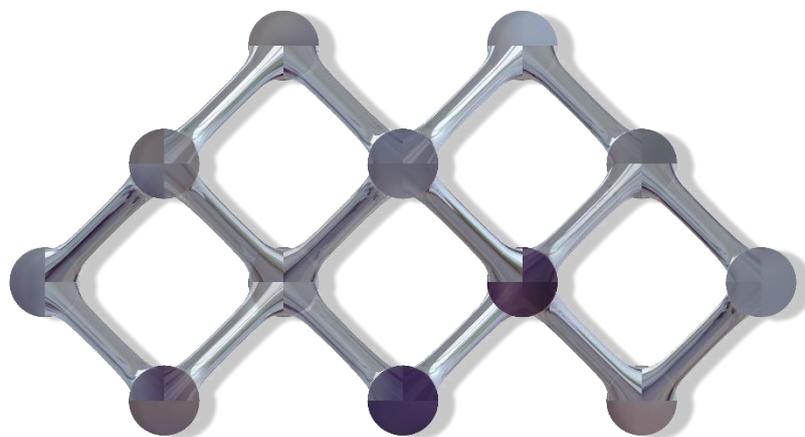
$$l^2(0,015 * 0,08 * 1180) + l^2(2 * 0,003 * 2600) \leq 50$$

$$l^2 (1,42 + 15,6) \leq 50$$

$$l^2 \leq \frac{50}{17,02} \quad l \leq \sqrt{\frac{50}{17,02}} \quad \mathbf{l \leq 1,71}$$

CAPITOLO 5

ANALISI TERMICA



5.1 Introduzione alle prestazioni termiche di pannelli sandwich

Rispetto alle tesi di ricerca prese in esame, che hanno indagato il comportamento strutturale di pannelli sandwich sopra descritti, questo lavoro di tesi si interroga sulle proprietà che questo tipo di vetrata può raggiungere dal punto di vista termico. In architettura l'aspetto di fisica termica influisce notevolmente sia sul comfort del soggetto che abita sia per quanto riguarda l'impatto energetico dell'edificio, di conseguenza grazie ad un buon isolamento termico si può pervenire, oltre ad un miglioramento del comfort dell'occupante, anche ad un ammortizzamento dei costi sulla lunga durata.

Il principale obiettivo dell'involucro di un edificio è di mantenere il più possibile il calore già presente in un edificio ottimizzando il coefficiente di scambio del calore ovvero intervenendo sul valore di trasmittanza. Allo stesso modo, massimizzare il guadagno della luce solare ha un effetto positivo sugli elementi costruttivi trasparenti dell'involucro dell'edificio nel periodo di riscaldamento.

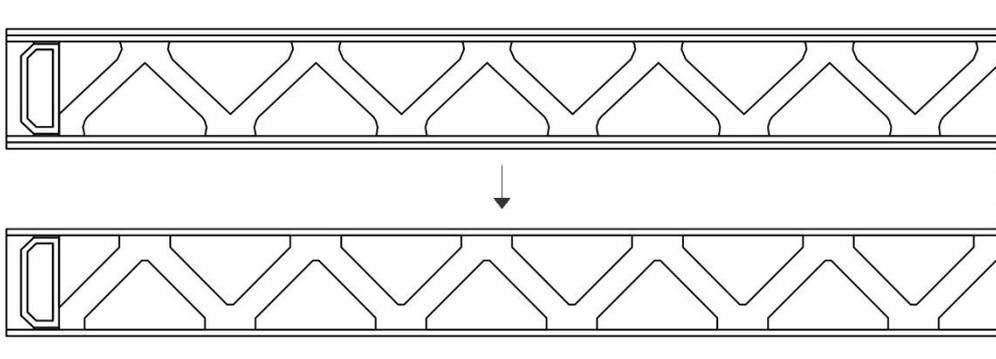
Oltre al notevole impatto degli edifici sul consumo globale di energia, bisogna tenere conto della crescente importanza che rivestono le problematiche ambientali correlate alla costruzione e all'utilizzo di un edificio, dal momento che le emissioni di gas serra emesse da essi in molti paesi sviluppati rappresentano il 30% delle emissioni totali. L'energia che viene consumata negli edifici dipende dalle dispersioni di energia attraverso l'involucro dell'edificio a causa dello scarso isolamento termico degli elementi edilizi esistenti, in particolare delle finestre. Sebbene le finestre contribuiscano alla ventilazione interna degli ambienti, all'ingresso della luce naturale e al guadagno di calore tramite radiazione solare, esse comportano infatti un enorme dispendio di energia che dipende dalla trasmittanza dell'elemento, ovvero la quantità di flusso di calore che viene scambiata da un materiale per unità di superficie e unità di differenza di temperatura. Per un edificio tipico i valori di trasmittanza sono $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ per le coperture, $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ per le partizioni opache esterne e $2,00 \text{ W/m}^2\text{K}$ per quanto

concerne le parti finestrate. Questa differenza di valori ci mostra come l'involucro trasparente sia responsabile del 60% delle dispersioni di calore rispetto alle altre partizioni dell'edificio. Per tale motivo, nell'ottica di ideare un prodotto efficiente sotto più di punti di vista, sono stati eseguiti dei calcoli per poter valutare il valore di trasmittanza che potrebbe avere il pannello sandwich declinato in varie combinazioni di materiali e quanto potrebbe essere incrementato al fine di limitare le dispersioni.

La riduzione dello spessore delle lastre di vetro del pannello al minimo comporta un risparmio significativo di materiale e peso ma per contro, come si può intuire, peggiora notevolmente l'isolamento termico della facciata a causa delle dispersioni attraverso l'elemento trasparente, raggiungendo valori di trasmittanza molto elevati e non rispettando quindi la normativa inerente agli standard per gli involucri trasparenti. Considerando, però, il pannello a sandwich come una vetrocamera è possibile valutare l'inserimento di un gas nell'intercapedine tra le due lastre e contemplarne l'inserimento anche all'interno della struttura del nucleo nel caso fosse cava. Infine, si possono ottimizzare le prestazioni termiche attraverso dei coating da applicare ad una o entrambe le lastre di vetro sottile.

5.2 Semplificazione del modello

Dopo aver valutato i materiali e le tecnologie più adeguate agli obiettivi che si intendono raggiungere, è stato osservato che il pannello sandwich oggetto della tesi può essere equiparabile ad un Vacuum Glazing per la sua conformazione ed è stata valutata tra i vari casi la possibilità di inserire all'interno del pannello la tecnologia Aerogel, mentre non è stata vagliata l'ipotesi di utilizzare materiali a cambiamento di fase anche se potrebbe essere un altro valido spunto di ricerca. Per poter eseguire i calcoli necessari a determinare la trasmittanza del pannello sandwich ideato è stata effettuata una semplificazione del modello, a partire dalla configurazione tridimensionale definita su Rhino, pervenendo ad una schematizzazione della sezione bidimensionale su Autocad.



A partire da tale sezione sono state proposte più alternative per il calcolo della trasmittanza, da effettuarsi in primo luogo per via analitica e successivamente confrontato con i valori ottenuti tramite il software di calcolo in due dimensioni Bisco.

Per il calcolo della trasmittanza abbiamo considerato, come nel capitolo precedente, un pannello quadrato di lato un metro, formato da due lastre di vetro sottile (1 mm) e nucleo interno avente le stesse misure che proposte precedentemente per l'analisi strutturale. È stato fatto un confronto tra la sezione priva del nucleo centrale e quella in presenza della struttura interna piramidale, con una ulteriore differenziazione tra l'utilizzo di un nucleo "pieno" costituito quindi interamente da PMMA e quello di un nucleo cavo (con pareti di spessore 0,5 mm) contenente aria, argon o aerogel. Una volta operata questa differenziazione sono stati calcolati e analizzati diversi casi, in primo luogo quelli inerenti

alla sezione priva del core interno e successivamente quelli su una sezione identica ma in presenza della struttura in PMMA.

Sono stati analizzati i seguenti casi:

SEZIONE PRIVA DI NUCLEO

- Caso 1. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro non trattato di spessore 1 mm ciascuna, con intercapedine d'aria.
- Caso 2. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro non trattato, con intercapedine riempita da argon per il 90% e da aria per restante il 10%.
- Caso 3. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro, di cui una non trattata e l'altra, quella verso l'esterno, rivestita con coating basso emissivo (emissività 0,03), con intercapedine riempita da argon per il 90% e da aria per il 10%.
- Caso 4. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro, di cui una non trattata e l'altra, quella verso l'esterno, rivestita con coating basso emissivo (emissività 0,01), con intercapedine riempita da argon per il 90% e da aria per il 10%.
- Caso 5. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro con coating basso emissivo (emissività 0,03) su entrambe le lastre e intercapedine 90% argon e 10% aria.
- Caso 6. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro con coating basso emissivo (emissività 0,01) su entrambe le lastre e intercapedine 90% argon e 10% aria.
- Caso 7. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro non trattato, con intercapedine riempita da aerogel.

SEZIONE CON NUCLEO STRUTTURALE

- Caso 1. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro non trattato, con intercapedine d'aria e nucleo strutturale in PMMA pieno.
- Caso 2. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro non trattato con intercapedine riempita da argon per il 90% e da aria per restante il 10%, e nucleo strutturale in PMMA pieno.
- Caso 3. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro, di cui una non trattata e l'altra, quella verso l'esterno, rivestita con coating basso emissivo (emissività 0,03) con intercapedine riempita da argon per il 90% e da aria per il 10%, e nucleo strutturale in PMMA pieno.
- Caso 4. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro non trattato con intercapedine 90% argon e 10% aria e nucleo strutturale in PMMA cavo riempito con aria.
- Caso 5. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro non trattato con intercapedine 90% argon e 10% aria e nucleo strutturale in PMMA cavo riempito con aerogel.
- Caso 6. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro, di cui una non trattata e l'altra, quella verso l'esterno, rivestita con coating basso emissivo (emissività 0,03) con intercapedine 90% argon e 10% aria e nucleo strutturale in PMMA cavo riempito con aria.
- Caso 7. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro, di cui una non trattata e l'altra, quella verso l'esterno, rivestita con coating basso emissivo (emissività 0,03) con intercapedine 90% argon e 10% aria e nucleo strutturale in PMMA cavo riempito con aerogel.
- Caso 8. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro, non trattate, con intercapedine di aerogel nucleo strutturale in PMMA pieno.
- Caso 9. Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro, non trattate, con intercapedine di aerogel nucleo strutturale in PMMA cavo riempito con aerogel.

5.3 Requisiti da raggiungere

I valori di trasmittanza che auspichiamo di ottenere dovranno risultare minori di quelli forniti dal Decreto Legislativo 192/2005 a cui si faceva riferimento nel capitolo 1 a seconda della zona climatica in cui si intende costruire.

Il coefficiente di trasmissione termica dell'infisso è individuato normalmente attraverso prove in laboratorio; in assenza di valori sperimentali il valore di U può essere calcolato mediante le formule fornite dalla UNI EN ISO 10077:2002.

La trasmittanza termica della vetrata U può essere calcolata analiticamente tramite la seguente equazione:

$$U = \frac{1}{Rse + \sum_{j=1}^n \frac{si}{\lambda i} + \sum_{j=1}^m Rj + Rsi}$$

dove:

Rse è la resistenza termica superficiale esterna;

λi è la conduttività termica del vetro o del materiale dello strato *i*;

si è lo spessore della lastra di vetro o del materiale dello strato *i*;

Rsi è la resistenza termica superficiale interna.

Rj è la resistenza termica dell'intercapedine *j*.

Per quanto riguarda la conduttività termica λi della lastra di vetro si considera pari a $\lambda = 1,0 \text{ W}/(\text{mK})$, mentre le resistenze termiche superficiali si rifanno alla tabella sottostante.

Resistenze termiche superficiali		
Posizione della finestra	Interno <i>Rsi</i> m ² K/W	Esterno <i>Rse</i> m ² K/W
Verticale, o con angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale, <i>a</i> , della vetrata tale che $90^\circ \geq a \geq 60^\circ$	0,13	0,04
Verticale, o con angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale, <i>a</i> , della vetrata tale che $60^\circ \geq a \geq 0^\circ$	0,10	0,04

Successivamente al calcolo analitico la trasmittanza è stata calcolata attraverso il software Bisco.

BISCO è un programma di analisi termica che permette di calcolare il trasferimento di calore allo stato stazionario in oggetti bidimensionali, costituiti da materiali diversi e sottoposti a condizioni al contorno diverse. Viene inizialmente caricato un file Cad sul programma in formato dxf, avendo precedentemente differenziato i livelli del disegno in base al materiale utilizzato. A quel punto BISCO richiede l'immissione di dati per l'associazione dei colori bitmap con le proprietà fisiche dei materiali e le condizioni al contorno, generando un'immagine colorata in formato bitmap.

In seguito, il software calcola una triangolazione per i colori del materiale, grazie alla quale vengono calcolate le temperature nei nodi, da cui è possibile derivare tutti i flussi di calore. BISCO consente di calcolare le quantità termiche come definito dalle norme europee: fattore di temperatura, trasmittanza termica lineare, trasmittanza termica del telaio di una finestra.

Il fattore di temperatura è un'espressione adimensionale della temperatura superficiale interna minima per valutare il rischio di condensa superficiale. Può essere valutato solo in presenza di condizioni con temperature diverse tra interno ed esterno. La formula di valutazione data dalla norma EN ISO 10211-2 è:

$$f = \frac{\theta_{si,min} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e}$$

dove:

f è il fattore di temperatura;

θ_i è la temperatura delle condizioni al contorno interne, espressa in °C;

θ_e è la temperatura delle condizioni al contorno esterne, espressa in °C;

$\theta_{si,min}$ è la temperatura superficiale interna minima, espressa in °C.

Vengono utilizzati i coefficienti liminari interno (h_i) ed esterno (h_e) rispettivamente pari a 8,13 e 23,25 W/m²K, dai quali è possibile calcolare le resistenze:

$$R_{si} = \frac{1}{8,13} = 0,13 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

$$R_{se} = \frac{1}{23,25} = 0,04 \left[\frac{m^2 K}{W} \right]$$

La trasmittanza termica lineare è un termine di correzione per l'influenza 2D di un ponte termico quando si calcola il flusso di calore (per differenza di temperatura unitaria tra entrambi gli ambienti) dalle trasmittanze termiche.

La trasmittanza termica equivalente è un valore U di un elemento unidimensionale equivalente (avente una certa larghezza di riferimento) con lo stesso flusso di calore attraverso di esso dell'elemento 2D originale. Essa è calcolata, sempre secondo la EN ISO 10211-2, come:

$$U_{eq} = \frac{\Phi}{(\theta_i - \theta_e) \times (l_1 + l_2)}$$

dove:

U_{eq} è la trasmittanza termica equivalente;

Φ è il flusso di calore totale che attraversa l'elemento;

θ_i è la temperatura delle condizioni al contorno interne, espressa in °C;

θ_e è la temperatura delle condizioni al contorno esterne, espressa in °C;

l_1 è la lunghezza del primo elemento laterale;

l_2 è la lunghezza del secondo elemento laterale;

La trasmittanza può essere calcolata anche come:

$$U = \frac{\Phi}{\Delta T * A}$$

dove:

U è la trasmittanza del pannello;

Φ è il flusso di calore scambiato per unità di superficie;

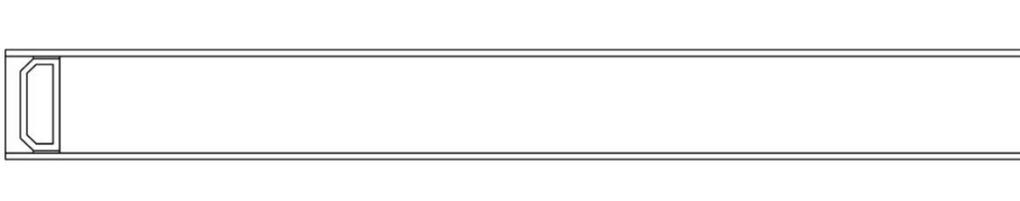
ΔT è la differenza di temperatura tra esterno e interno (ovvero 20 °C);

A è la superficie attraverso la quale avviene lo scambio di calore.

5.4 Calcolo della trasmittanza pannello in assenza del nucleo centrale

CASO 1

Pannello di dimensioni 1 metro x 1 metro, costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime non trattato di spessore 1 mm ciascuna, con intercapedine d'aria di spessore 15 mm.



Caso 1	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Intercapedine - Aria	0,015	0,024	

La trasmittanza è stata calcolata prima analiticamente attraverso la formula citata in precedenza e solo successivamente attraverso il software Bisco. La trasmittanza attesa sarà piuttosto alta dal momento che il vetro camera è formato da due lastre di spessore molto ridotto che quindi non isolano termicamente a sufficienza la finestra.

Calcolo analitico

Per prima cosa è stata calcolata la resistenza dovuta alle lastre di vetro

$$R_v = \frac{s_1 + s_2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Per quanto riguarda la resistenza termica dovuta all'intercapedine d'aria si fa riferimento alla UNI EN ISO 10077-1:2018 che fornisce i valori di resistenza termica delle intercapedini d'aria a seconda dello spessore e dei trattamenti superficiali delle lastre di

vetro. In questo caso, per uno spessore di 15 mm ed entrambe le lastre non trattate, la resistenza data dall'intercapedine R_c è data pari a $0,186 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Calcoliamo infine la trasmittanza del pannello mettendo a denominatore le resistenze che abbiamo preso in esame unitamente alla resistenza superficiale interna R_i e alla resistenza superficiale esterna R_e .

$$U = \frac{1}{R_i + R_e + R_v + R_c} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,186} = \mathbf{2,79 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Calcolo attraverso Bisco

Dopo aver disegnato la sezione 2D del pannello su Autocad, è stato possibile esportarla in formato dxf e aprirla tramite lo strumento BiscoDxf che permette la creazione di un file BMP come richiesto da Bisco. Per ogni livello creato è stata possibile l'assegnazione di un materiale inserendo nell'apposito spazio accanto al livello un numero compreso tra 0 e 255 in modo che a seconda del materiale selezionato siano importate le relative proprietà di conduttività termica, vengono poi impostate le condizioni al contorno (esterno e interno). Dopo aver definito l'estensione bitmap, la risoluzione dei pixel e lo schema di colorazione è possibile calcolare il bitmap da importare sul software Bisco vero e proprio.

Una volta aperto il file BMP su Bisco è possibile definire il tipo di cavità del vetro camera preso in considerazione, in questo caso viene impostato EQUIMAT, ovvero viene definita come un materiale equivalente, inserendo poi i dati relativi alle caratteristiche dell'intercapedine d'aria (conduttività pari a $0,024 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) e alla direzione del flusso di calore per una cavità non ventilata. L'emissività delle lastre di vetro viene impostata pari a $0,84$ nel caso di lastre non trattate con rivestimento basso-emissivo.

Viene avviato il calcolo che ci fornisce il flusso di calore Q grazie al quale otteniamo il valore di trasmittanza e i relativi output grafici.

In questo caso è stata ottenuta una conduttività equivalente della cavità d'aria pari a $0,085 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ e un flusso di calore Q pari a $57,5 \text{ W/m}^2$.

Calcoliamo quindi la resistenza dell'intercapedine tenendo conto della conduttività equivalente fornita dal programma.

$$R_c = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,085} = 0,176 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Infine, calcoliamo la trasmittanza in funzione del flusso di calore Q con la formula:

$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{57,5}{20 * 1} = \mathbf{2,88 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

CASO 2

Pannello di dimensioni 1 metro x 1 metro, costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime non trattato, con intercapedine riempita da argon per il 90% e da aria per restante il 10%.



Caso 2	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Intercapedine - Aria + Argon 90 %	0,015	0,017	

Calcolo analitico

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$Rv = \frac{s1 + s2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

La conduttività equivalente dell'intercapedine non ventilata è calcolata come

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * d$$

Dove:

h_c è il coefficiente di scambio termico convettivo (dalla superficie calda alla superficie fredda) e tiene conto dei parametri C1, C2, C3, i quali possono essere derivati secondo EN 673 in funzione della conduttività del gas presente nella cavità, dello spessore della cavità e pendenza del vetro, e considera inoltre la massima differenza di temperatura superficiale nella cavità dell'aria;

h_r è il coefficiente di scambio termico radiativo e tiene conto della massima e della minima differenza di temperatura superficiale nella cavità dell'aria e delle emissività ai lati caldi e freddi della cavità;

d è lo spessore della cavità.

La conduttività equivalente per un'intercapedine riempita da aria al 10% e da argon al 90% e lastre di vetro non trattate con rivestimento basso-emissivo, è pari a:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,085$$

Pertanto, la resistenza esercitata dall'intercapedine tra le due lastre sarà:

$$R_c = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,085} = 0,176 \text{ m}^2\text{K/W}$$

E la trasmittanza del vetro camera:

$$U = \frac{1}{R_i + R_e + R_v + R_c} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,176} = \mathbf{2,87 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Calcolo con Bisco

Vengono eseguiti gli stessi passaggi descritti per il primo caso ma impostando una diversa conduttività per quanto riguarda la cavità tra le lastre, riferita quindi ad aria + argon (pari a 0,017 W/m°C) e non più a quella dell'aria (pari a 0,024 W/m°C). Una volta avviato il calcolo però otteniamo un flusso di calore Q pressoché identico al primo caso ovvero di 57,5 W/m².

$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{57,5}{20 * 1} = \mathbf{2,88 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

CASO 3

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime, di cui una non trattata e l'altra, quella verso l'esterno, rivestita con coating basso-emissivo (emissività 0,03), con intercapedine riempita da argon per il 90% e da aria per il 10%.



Caso 3	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,03
Intercapedine - Aria + Argon 90 %	0,015	0,017	

Calcolo analitico

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$Rv = \frac{s_1 + s_2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

La conduttività equivalente dell'intercapedine tra le lastre tiene conto dell'emissività per cui in questo caso sarà:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,029$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di aria e argon:

$$Rc = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,029} = 0,517 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{Ri + Re + Rv + Rc} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,517} = 1,45 \text{ W/m}^2\text{K}$$

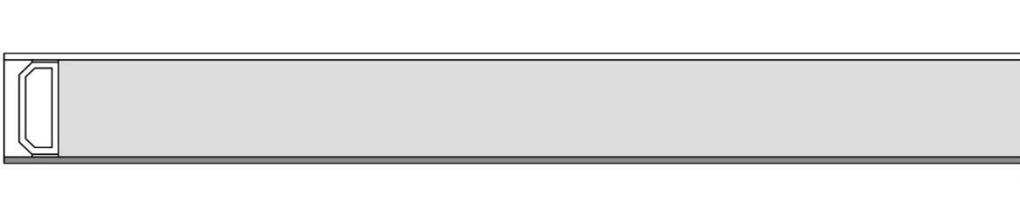
Calcolo con Bisco

Vengono effettuati i passaggi precedenti ma impostando l'emissività di una delle due lastre pari a 0,3. Si ottiene così un flusso termico molto inferiore rispetto ai casi precedenti, pari a 29 W/m².

$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{29}{20 * 1} = 1,45 \text{ W/m}^2\text{K}$$

CASO 4

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime, di cui una non trattata e l'altra, quella verso l'esterno, rivestita con coating basso-emissivo (emissività 0,01), con intercapedine riempita da argon per il 90% e da aria per il 10%. Procediamo nello stesso modo dei casi precedenti e riportiamo solo i risultati.



Caso 4	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,01
Intercapedine - Aria + Argon 90 %	0,015	0,017	

Calcolo manuale

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$Rv = \frac{s1 + s2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di aria e argon, tenendo conto del coating bassoemissivo:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,028$$

$$Rc = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,028} = 0,536 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{Ri + Re + Rv + Rc} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,536} = \mathbf{1,41 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Calcolo con Bisco

Q=28,5 W/m²

$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{28,5}{20 * 1} = \mathbf{1,43 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

CASO 5

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime con coating basso-emissivo (emissività 0,03) su entrambe le lastre e intercapedine 90% argon e 10% aria.



Caso 5	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,03
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,03
Intercapedine - Aria + Argon 90 %	0,015	0,017	

Calcolo manuale

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$Rv = \frac{s_1 + s_2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di aria e argon, tenendo conto del coating bassoemissivo:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,028$$

$$Rc = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,028} = 0,536 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{Ri + Re + Rv + Rc} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,536} = 1,41 \text{ W/m}^2\text{K}$$

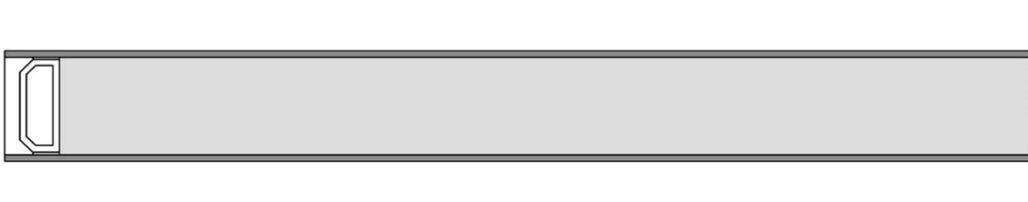
Calcolo con Bisco

$$Q=28,5 \text{ W/m}^2$$

$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{28,5}{20 * 1} = \mathbf{1,43 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

CASO 6

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime con coating basso-emissivo (emissività 0,01) su entrambe le lastre e intercapedine 90% argon e 10% aria.



Caso 6	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,01
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,01
Intercapedine - Aria + Argon 90 %	0,015	0,017	

Calcolo manuale

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$Rv = \frac{s1 + s2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di aria e argon, tenendo conto del coating bassoemissivo:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,027$$

$$Rc = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,027} = 0,556 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{Ri + Re + Rv + Rc} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,556} = 1,37 \text{ W/m}^2\text{K}$$

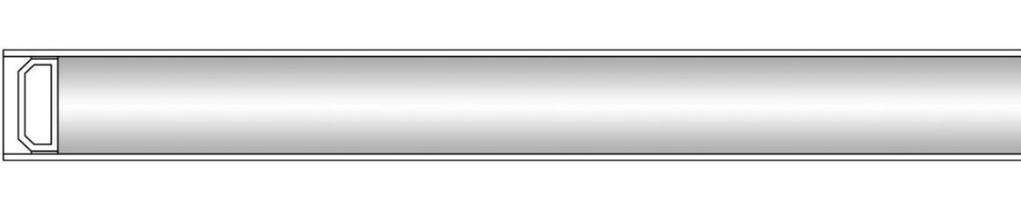
Calcolo con Bisco

$Q=28 \text{ W/m}^2$

$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{28}{20 * 1} = 1,40 \text{ W/m}^2\text{K}$$

CASO 7

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime non trattato, con intercapedine riempita da aerogel.



Caso 7	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Intercapedine - Aerogel	0,015	0,014	

Calcolo manuale

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$Rv = \frac{s1 + s2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di Aerogel:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,014$$
$$Rc = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,014} = 1,071 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{Ri + Re + Rv + Rc} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 1,071} = \mathbf{0,80 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

Calcolo con Bisco

Q=16,5 W/m²

$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{16,5}{20 * 1} = \mathbf{0,83 \text{ W/m}^2\text{K}}$$

In questo ultimo caso possiamo osservare che nonostante non sia presente nessun coating basso-emissivo sulle lastre di vetro la trasmittanza è notevolmente inferiore ai casi precedenti.

5.5 Calcolo della trasmittanza pannello in presenza del nucleo centrale

Come detto in precedenza, è stata operata una semplificazione della geometria del nucleo strutturale posto all'interno dell'intercapedine tra i due vetri, valutandone due opzioni: nucleo pieno e nucleo cavo. Anche in questo caso è stato considerato un pannello di dimensioni 1 metro x 1 metro con lastre di vetro sottile da 1 mm e intercapedine di 15 mm.

Per poter valutare le caratteristiche termiche sono stati considerati per i calcoli i seguenti parametri:

Raggio del pilastro $a = 0.002 \text{ m}$

Conduttività PMMA $Kp = 0.18 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Conduttività aria $\lambda a = 0.024 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Conduttività Aerogel $Ka = 0.014 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Lunghezza del braccio $p = 0.02 \text{ m}$

Angolo di inclinazione del pilastro $\alpha = 45^\circ$

dai quali è stato possibile ricavare:

Resistenza PMMA

$$Rp = \frac{p^2}{2Kp*a} = \frac{0,02^2}{2*0,18*0,002} = 0,63 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Conduttività PMMA cavo + aria

$$Kpa = \frac{Kp+\lambda a}{2} = \frac{0,18+0,025}{2} = 0.103 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Resistenza PMMA cavo + aria

$$Rpa = \frac{p^2}{2Kpa * a} = \frac{0,02^2}{2 * 0,103 * 0,002} = 1,10 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Conduttività PMMA cavo + Aerogel

$$K_{pg} = \frac{K_p + K_a}{2} = \frac{0,18 + 0,014}{2} = 0,97 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

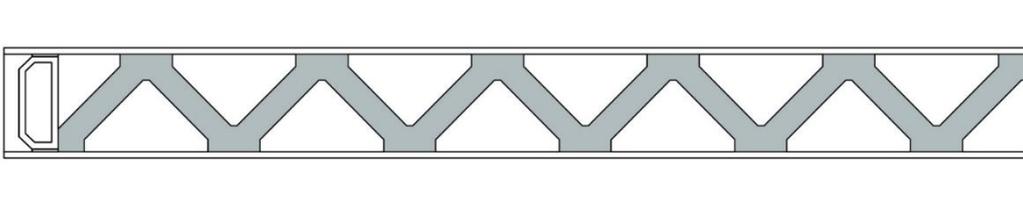
Resistenza PMMA cavo + Aerogel

$$R_{pg} = \frac{p^2}{2K_{pg} \cdot a} = \frac{0,02^2}{2 \cdot 0,97 \cdot 0,002} = 1,16 \text{ m}^2\text{K/W}$$

In questo caso sono stati analizzati nove casi a seconda del gas iniettato nell'intercapedine e dei rivestimenti basso-emissivi su una o entrambe le lastre di vetro. Inoltre, per ogni tipologia è stata identificata la zona climatica di applicazione in base al valore di trasmittanza ottenuto.

CASO 1

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime non trattato, con intercapedine d'aria e nucleo strutturale in PMMA pieno.



Caso 1	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Intercapedine - Aria	0,015	0,024	
Struttura PMMA piena	0,015	0,18	

Calcolo analitico

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$Rv = \frac{s1 + s2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di aria:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,078$$

$$Rc = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,078} = 0,192 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza pesata dell'intercapedine (Cavità di aria + struttura in PMMA):

$$Rcp = \left(\frac{1}{Rc} + \frac{1}{Rp} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,192} + \frac{1}{0,63} \right)^{-1} = 0,147 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{Ri + Re + Rv + Rcp} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,147} = 3,14 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Calcolo con Bisco

$Q=65 \text{ W/m}^2$

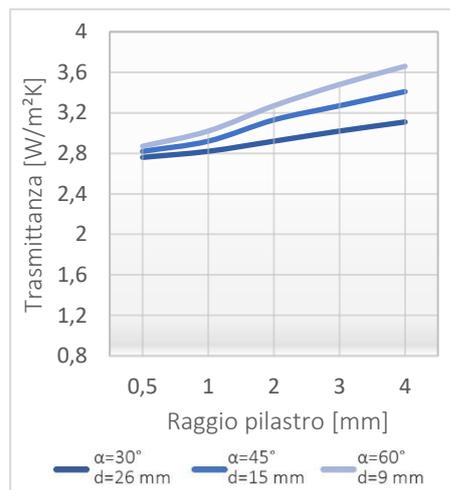
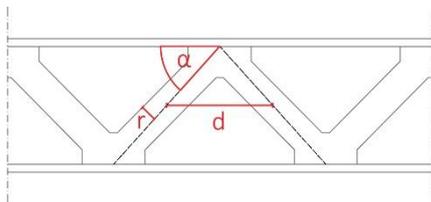
$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{65}{20 * 1} = 3,25 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Valore di trasmittanza pesato:

$$\frac{3,14 + 3,25}{2} = 3,19 \frac{W}{m^2K} \quad \rightarrow \quad \text{Zona climatica A}$$

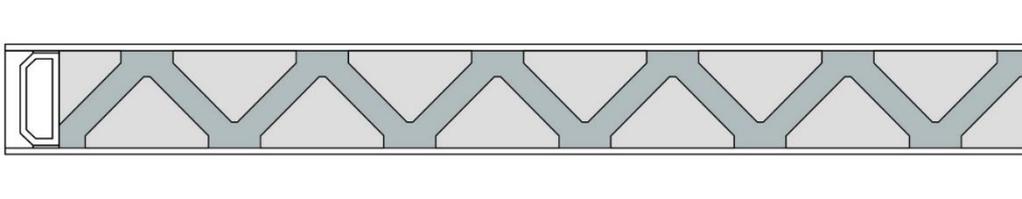
Variazione della trasmittanza in base a raggio del pilastro e distanza tra pilastri:

r [mm]	U [W/m ² K]		
0,5	2,76	2,82	2,87
1	2,82	2,92	3,02
2	2,92	3,14	3,27
3	3,02	3,27	3,48
4	3,11	3,41	3,66
α	30°	45°	60°



CASO 2

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime non trattato con intercapedine riempita da argon per il 90% e da aria per restante il 10%, e nucleo strutturale in PMMA pieno.



Caso 2	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Intercapedine - Aria + argon 90%	0,015	0,017	
Struttura PMMA piena	0,015	0,18	

Calcolo analitico

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$Rv = \frac{s_1 + s_2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di aria e argon:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,077$$

$$Rc = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,077} = 0,195 \text{ m}^2\text{K/W}$$

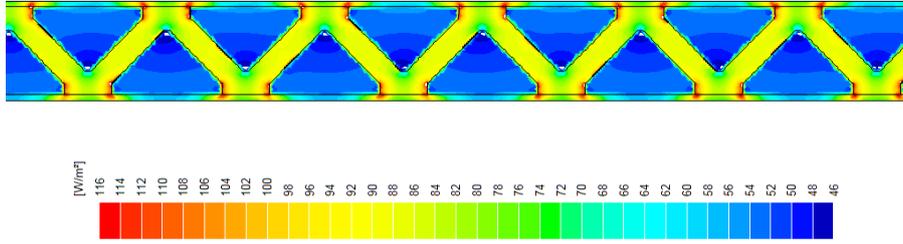
Resistenza pesata dell'intercapedine (Cavità di aria + struttura in PMMA):

$$Rcp = \left(\frac{1}{Rc} + \frac{1}{Rp} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,195} + \frac{1}{0,63} \right)^{-1} = 0,149 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{Ri + Re + Rv + Rcp} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,149} = 3,11 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Calcolo con Bisco



$Q=63 \text{ W/m}^2$

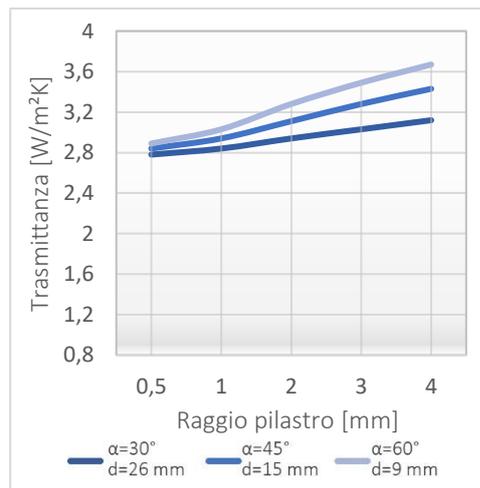
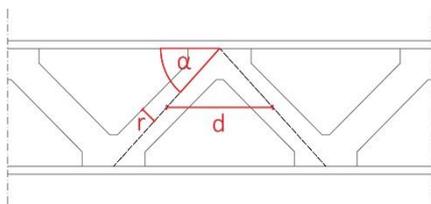
$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{63}{20 * 1} = 3,15 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Valore di trasmittanza pesato:

$$\frac{3,11 + 3,15}{2} = 3,13 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \rightarrow \quad \text{Zona climatica A}$$

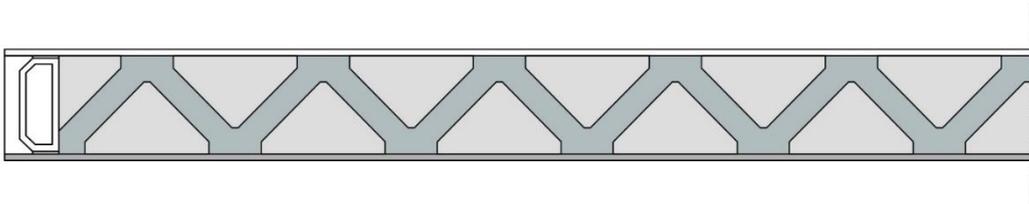
Variazione della trasmittanza in base a raggio del pilastro e distanza tra pilastri:

r [mm]	U [W/m ² K]		
0,5	2,78	2,84	2,89
1	2,84	2,94	3,03
2	2,94	3,11	3,28
3	3,03	3,28	3,49
4	3,12	3,43	3,67
α	30°	45°	60°



CASO 3

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime, di cui una non trattata e l'altra, quella verso l'esterno, rivestita con coating basso-emissivo (emissività 0,03) con intercapedine riempita da argon per il 90% e da aria per il 10%, e nucleo strutturale in PMMA pieno.



Caso 3	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,03
Intercapedine - Aria + argon 90%	0,015	0,017	
Struttura PMMA piena	0,015	0,18	

Calcolo analitico

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$R_v = \frac{s_1 + s_2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di aria e argon, tenendo conto del coating basso-emissivo:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,033$$

$$R_c = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,033} = 0,455 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza pesata dell'intercapedine (Cavità di aria e argon + struttura in PMMA):

$$R_{cp} = \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_p} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,455} + \frac{1}{0,63} \right)^{-1} = 0,263 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{R_i + R_e + R_v + R_{cp}} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,263} = 2,30 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Calcolo con Bisco



$Q=55 \text{ W/m}^2$

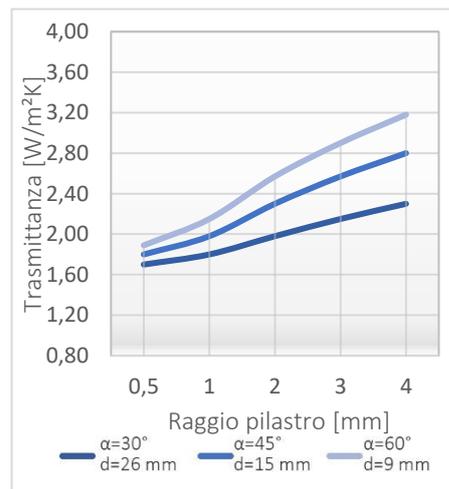
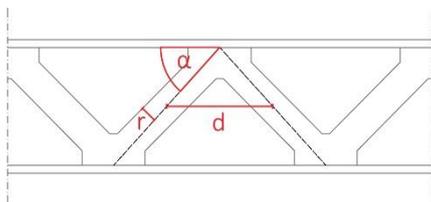
$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{55}{20 * 1} = 2,75 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Valore di trasmittanza pesato:

$$\frac{2,30 + 2,75}{2} = 2,52 \frac{W}{m^2K} \quad \rightarrow \quad \text{Zona climatica A,B}$$

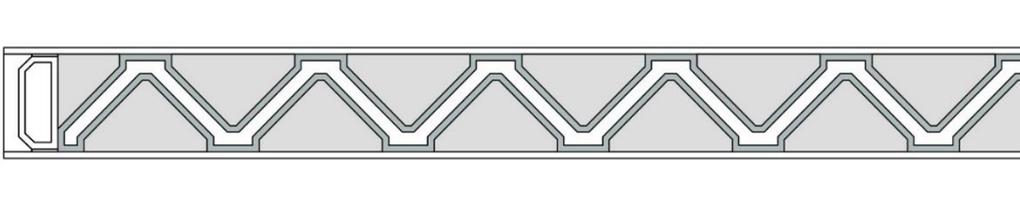
Variazione della trasmittanza in base a raggio del pilastro e distanza tra pilastri:

r [mm]	U [W/m²K]		
	30°	45°	60°
0,5	1,70	1,80	1,89
1	1,80	1,98	2,15
2	1,98	2,30	2,57
3	2,15	2,57	2,90
4	2,30	2,80	3,18
α	30°	45°	60°



CASO 4

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime non trattato con intercapedine 90% argon e 10% aria e nucleo strutturale in PMMA cavo riempito con aria.



Caso 4	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Intercapedine - Aria + argon 90%	0,015	0,017	
Struttura PMMA cava con aria	0,015	0,103	

Calcolo analitico

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$Rv = \frac{s_1 + s_2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di aria e argon:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,077$$

$$Rc = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,077} = 0,195 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza pesata dell'intercapedine (Cavità di aria e argon + struttura in PMMA cava con aria):

$$Rcp = \left(\frac{1}{Rc} + \frac{1}{Rpa} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,195} + \frac{1}{1,10} \right)^{-1} = 0,165 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{Ri + Re + Rv + Rcp} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,165} = 2,95 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Calcolo con Bisco

$$Q=61 \text{ W/m}^2$$

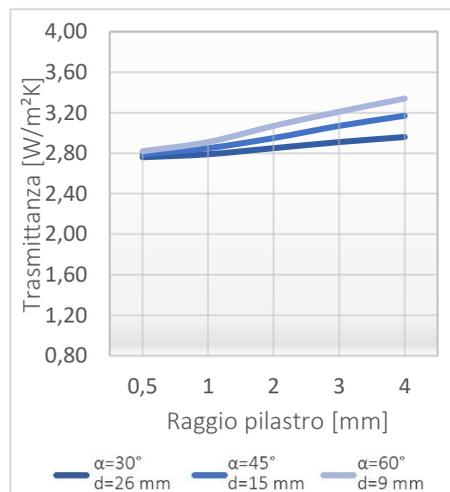
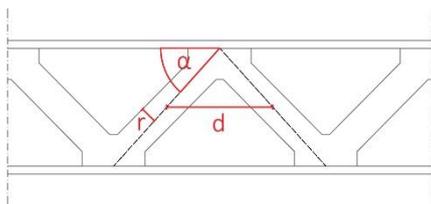
$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{61}{20 * 1} = 3,05 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Valore di trasmittanza pesato:

$$\frac{2,95 + 3,05}{2} = 3,00 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \rightarrow \quad \text{Zona climatica A, B}$$

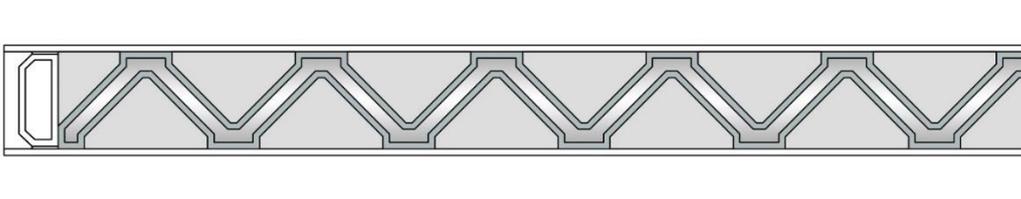
Variazione della trasmittanza in base a raggio del pilastro e distanza tra pilastri:

r [mm]	U [W/m ² K]		
0,5	2,76	2,79	2,82
1	2,79	2,85	2,91
2	2,85	2,95	3,07
3	2,91	3,07	3,21
4	2,96	3,17	3,34
α	30°	45°	60°



CASO 5

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime non trattato con intercapedine 90% argon e 10% aria e nucleo strutturale in PMMA cavo riempito con aerogel.



Caso 5	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Intercapedine - Aria + argon 90%	0,015	0,017	
Struttura PMMA cava con Aerogel	0,015	0,97	

Calcolo analitico

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$R_v = \frac{s_1 + s_2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di aria e argon:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,077$$

$$R_c = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,077} = 0,195 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza pesata dell'intercapedine (Cavità di aria e argon + struttura in PMMA cava con Aerogel):

$$R_{cp} = \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{pg}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,195} + \frac{1}{1,16} \right)^{-1} = 0,167 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{R_i + R_e + R_v + R_{cp}} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,167} = 2,94 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Calcolo con Bisco

$Q=51 \text{ W/m}^2$

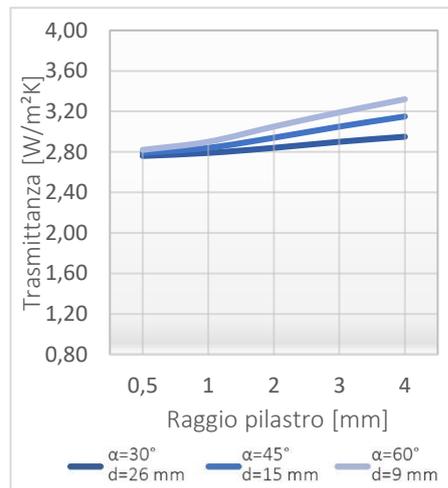
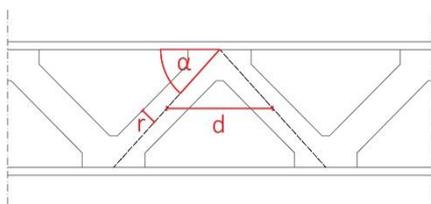
$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{51}{20 * 1} = 2,55 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Valore di trasmittanza pesato:

$$\frac{2,94 + 2,55}{2} = 2,74 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \rightarrow \quad \text{Zona climatica A, B}$$

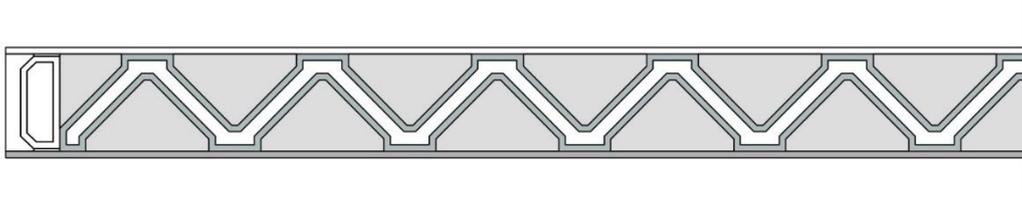
Variazione della trasmittanza in base a raggio del pilastro e distanza tra pilastri:

r [mm]	U [W/m ² K]		
0,5	2,76	2,79	2,82
1	2,79	2,84	2,90
2	2,84	2,94	3,05
3	2,90	3,05	3,19
4	2,95	3,15	3,32
α	30°	45°	60°



CASO 6

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime, di cui una non trattata e l'altra, quella verso l'esterno, rivestita con coating basso-emissivo (emissività 0,03) con intercapedine 90% argon e 10% aria e nucleo strutturale in PMMA cavo riempito con aria.



Caso 6	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,03
Intercapedine - Aria + argon 90%	0,015	0,017	
Struttura PMMA cava con aria	0,015	0,103	

Calcolo analitico

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$R_v = \frac{s_1 + s_2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di aria e argon, tenendo conto del coating basso-emissivo:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,035$$

$$R_c = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,035} = 0,429 \text{ m}^2\text{K/W}$$

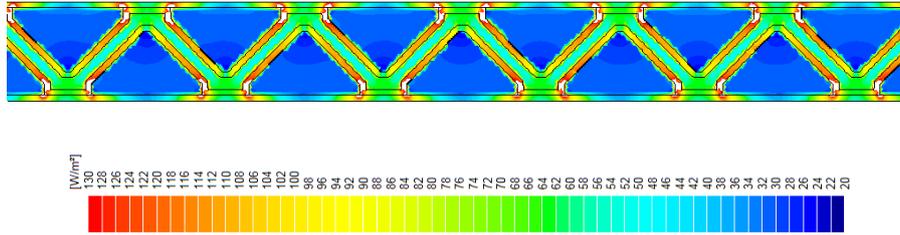
Resistenza pesata dell'intercapedine (aria e argon + struttura cava con aria):

$$R_{cp} = \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{pa}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,429} + \frac{1}{1,10} \right)^{-1} = 0,308 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{R_i + R_e + R_v + R_{cp}} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,308} = 2,08 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Calcolo con Bisco



$Q=48 \text{ W/m}^2$

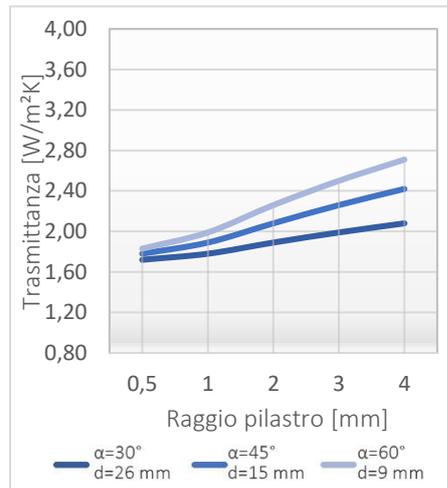
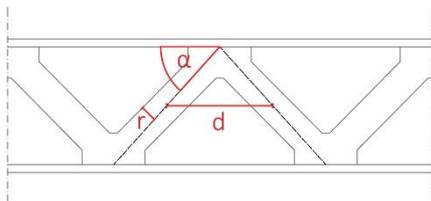
$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{48}{20 * 1} = 2,4 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Valore di trasmittanza pesato:

$$\frac{2,08 + 2,4}{2} = 2,24 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \rightarrow \quad \text{Zona climatica A, B, C}$$

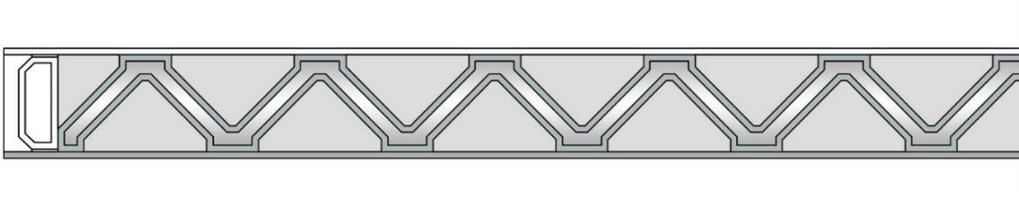
Variazione della trasmittanza in base a raggio del pilastro e distanza tra pilastri:

r [mm]	U [W/m²K]		
0,5	1,72	1,78	1,83
1	1,78	1,89	1,99
2	1,89	2,08	2,26
3	1,99	2,26	2,50
4	2,08	2,42	2,71
α	30°	45°	60°



CASO 7

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime, di cui una non trattata e l'altra, quella verso l'esterno, rivestita con coating basso-emissivo (emissività 0,03) con intercapedine 90% argon e 10% aria e nucleo strutturale in PMMA cavo riempito con aerogel.



Caso 7	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,03
Intercapedine - Aria + argon 90%	0,015	0,017	
Struttura PMMA cava con Aerogel	0,015	0,97	

Calcolo analitico

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$Rv = \frac{s_1 + s_2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di aria e argon, tenendo conto del coating basso-emissivo:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,035$$

$$Rc = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,035} = 0,429 \text{ m}^2\text{K/W}$$

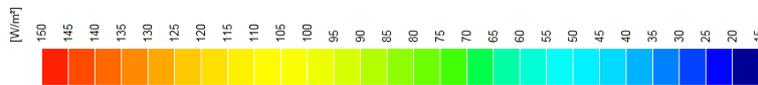
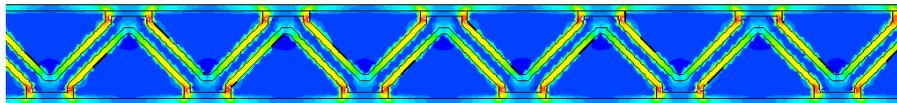
Resistenza pesata dell'intercapedine (Cavità di aria e argon + struttura in PMMA cava con Aerogel):

$$Rcp = \left(\frac{1}{Rc} + \frac{1}{Rpg} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{0,429} + \frac{1}{1,16} \right)^{-1} = 0,313 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{Ri + Re + Rv + Rcp} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,313} = 2,06 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Calcolo con Bisco



$Q=41 \text{ W/m}^2$

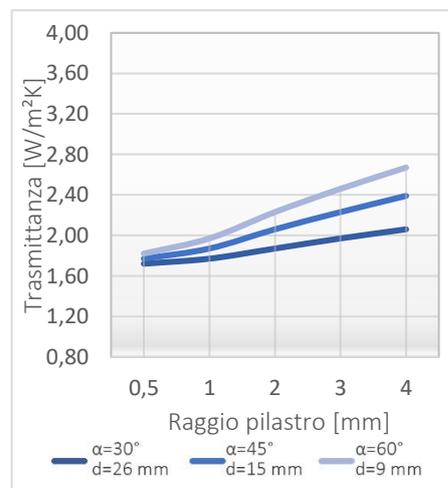
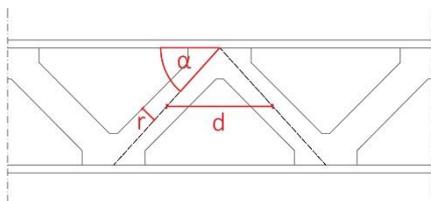
$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{41}{20 * 1} = 2,05 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Valore di trasmittanza pesato:

$$\frac{2,06 + 2,05}{2} = 2,06 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \rightarrow \quad \text{Zona climatica A, B, C, D}$$

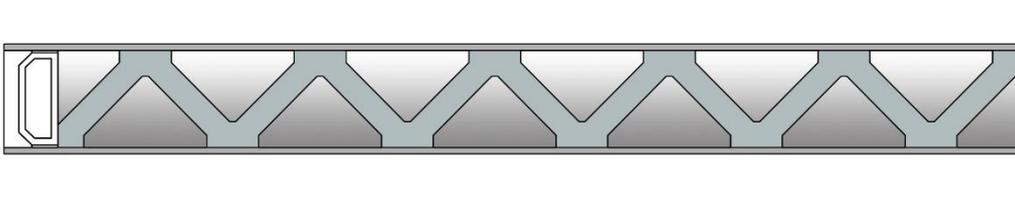
Variazione della trasmittanza in base a raggio del pilastro e distanza tra pilastri:

r [mm]	U [W/m²K]		
0,5	1,72	1,77	1,82
1	1,77	1,87	1,97
2	1,87	2,06	2,23
3	1,97	2,23	2,46
4	2,06	2,39	2,67
α	30°	45°	60°



CASO 8

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime non trattato con intercapedine riempita da aerogel e nucleo strutturale in PMMA pieno.



Caso 5	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Intercapedine - Aerogel	0,015	0,014	
Struttura PMMA pieno	0,015	0,18	

Calcolo analitico

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$Rv = \frac{s_1 + s_2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di aerogel:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,013$$

$$Rc = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,013} = 1,165 \text{ m}^2\text{K/W}$$

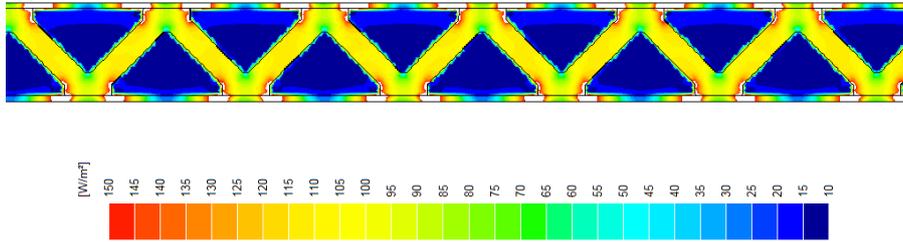
Resistenza pesata dell'intercapedine (Cavità aerogel + struttura in PMMA cava con Aerogel):

$$Rcp = \left(\frac{1}{Rc} + \frac{1}{Rpg} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{1,165} + \frac{1}{0,63} \right)^{-1} = 0,407 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{Ri + Re + Rv + Rcp} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,581} = 1,73 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Calcolo con Bisco



$Q=37 \text{ W/m}^2$

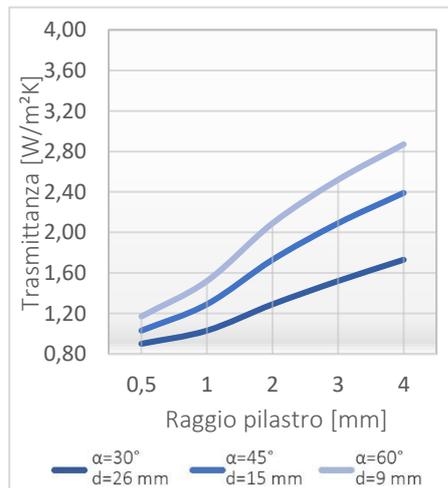
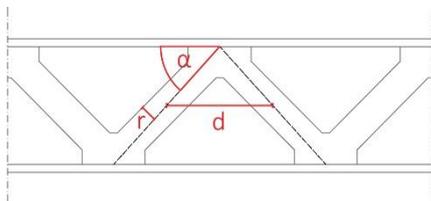
$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{37}{20 * 1} = 1,85 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Valore di trasmittanza pesato:

$$\frac{1,73 + 1,85}{2} = 1,79 \frac{W}{m^2K} \quad \rightarrow \quad \text{Zona climatica A, B, C, D, E}$$

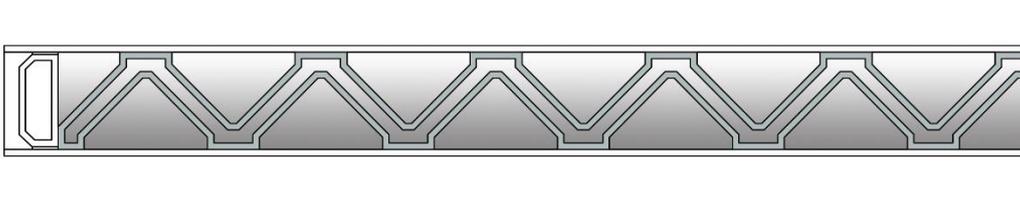
Variazione della trasmittanza in base a raggio del pilastro e distanza tra pilastri:

r [mm]	U [W/m²K]		
0,5	0,90	1,03	1,17
1	1,03	1,29	1,52
2	1,29	1,73	2,09
3	1,52	2,09	2,52
4	1,73	2,39	2,87
α	30°	45°	60°



CASO 9

Pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime non trattato con intercapedine riempita da aerogel e nucleo strutturale in PMMA cavo riempito con aerogel.



Caso 5	Spessore s (m)	Conduttività λ (W/m°C)	Emissività
Lastra 1 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Lastra 2 - Soda lime glass	0,001	1	0,84
Intercapedine - Aerogel	0,015	0,014	
Struttura PMMA cava con Aerogel	0,015	0,97	

Calcolo analitico

Resistenza esercitata dalle lastre di vetro:

$$R_v = \frac{s_1 + s_2}{\lambda} = \frac{0,002}{1} = 0,002 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Resistenza esercitata dall'intercapedine di aerogel:

$$\lambda_{eq} = (h_c + h_r) * 0,15 = 0,013$$

$$R_c = \frac{s}{\lambda} = \frac{0,015}{0,013} = 1,165 \text{ m}^2\text{K/W}$$

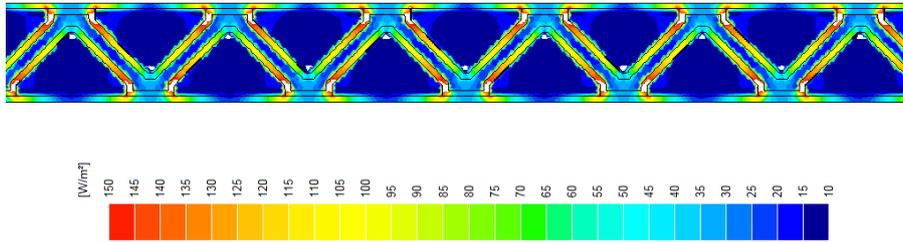
Resistenza pesata dell'intercapedine (Cavità aerogel + struttura in PMMA cava con Aerogel):

$$R_{cp} = \left(\frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_{pg}} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{1,165} + \frac{1}{1,16} \right)^{-1} = 0,581 \text{ m}^2\text{K/W}$$

Calcolo della trasmittanza:

$$U = \frac{1}{R_i + R_e + R_v + R_{cp}} = \frac{1}{0,13 + 0,04 + 0,002 + 0,581} = 1,33 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Calcolo con Bisco



$Q=28 \text{ W/m}^2$

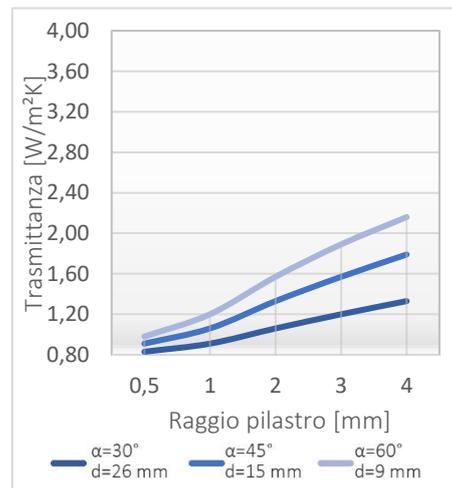
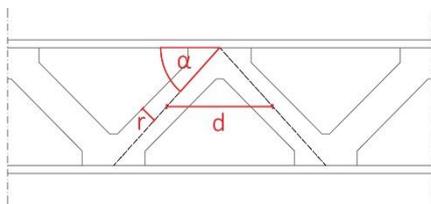
$$U = \frac{Q}{\Delta T * A} = \frac{28}{20 * 1} = 1,40 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Valore di trasmittanza pesato:

$$\frac{1,33 + 1,40}{2} = 1,36 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad \rightarrow \quad \text{Zona climatica A, B, C, D, E, F}$$

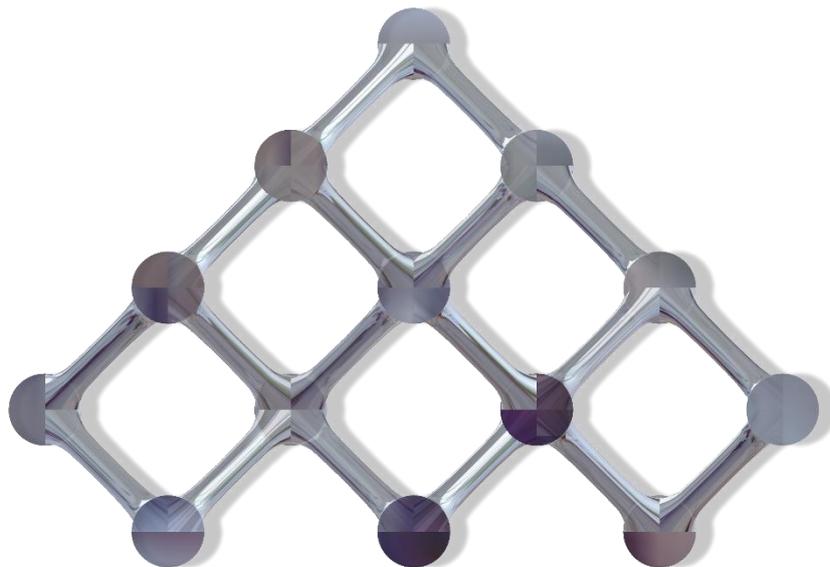
Variazione della trasmittanza in base a raggio del pilastro e distanza tra pilastri:

r [mm]	U [W/m²K]		
0,5	0,83	0,91	0,98
1	0,91	1,06	1,20
2	1,06	1,33	1,57
3	1,20	1,57	1,89
4	1,33	1,79	2,16
α	30°	45°	60°



CAPITOLO 6

CONFRONTO PRESTAZIONE STRUTTURALE E TERMICA

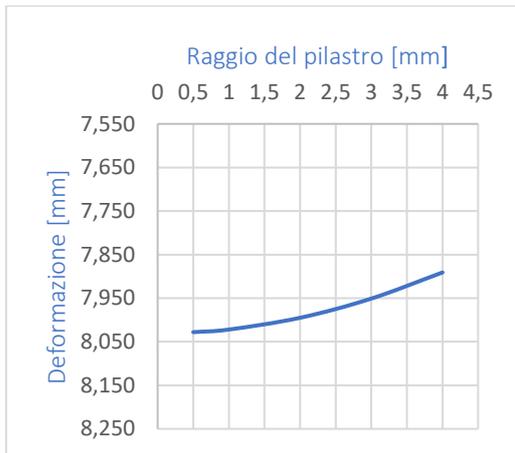
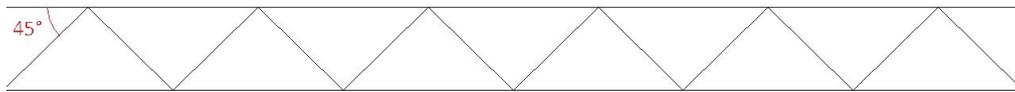


6.1 Confronto tra la prestazione strutturale e la prestazione termica del pannello sandwich

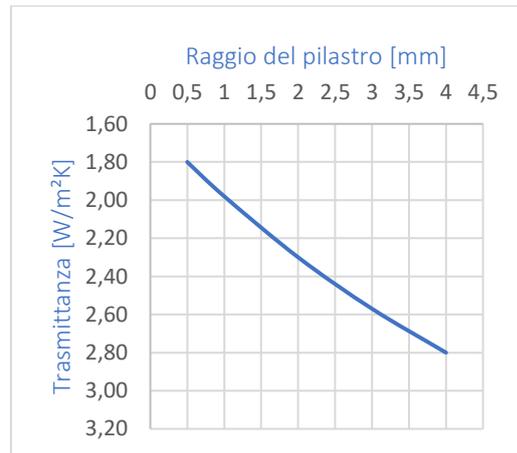
In base alle ricerche svolte e ai calcoli effettuati nei capitoli 3 e 4, è possibile effettuare un confronto tra i risultati ottenuti dal punto di vista della deformazione e quelli relativi all'isolamento termico che dipendono dal valore di trasmittanza. Nello specifico, si può notare che al variare della geometria del nucleo, in particolare angolo di inclinazione e raggio dei pilastri, cambiano sia la performance strutturale che quella termica, anche se in modo antitetico tra di loro. Infatti, dal punto di vista strutturale la deformazione risulta essere minore in presenza di pilastri interni a raggio maggiore e all'aumentare dell'angolo che si forma tra quest'ultimo e la lastra di vetro superiore (struttura interna più fitta). Al contrario, per quanto riguarda l'ambito fisico termico, il valore di trasmittanza è inferiore quando il nucleo interno è caratterizzato da una struttura meno fitta, quindi pilastri più distanziati e minori punti di contatto che possono causare ponti termici e quando i pilastri sono più sottili.

Considerando per esempio il caso 3 delle opzioni analizzate termicamente in presenza del nucleo interno, ovvero il caso di un pannello costituito da due lastre in vetro chiaro soda lime, di cui una non trattata e l'altra con rivestimento basso-emissivo con intercapedine riempita da argon per il 90% e da aria per il 10%, e nucleo strutturale in PMMA pieno, effettuiamo un confronto con le prestazioni strutturali di un pannello quadrato di lato 210 cm con tre diverse inclinazioni del pilastro interno.

Inclinazione 45° - Distanza tra i pilastri 15 mm

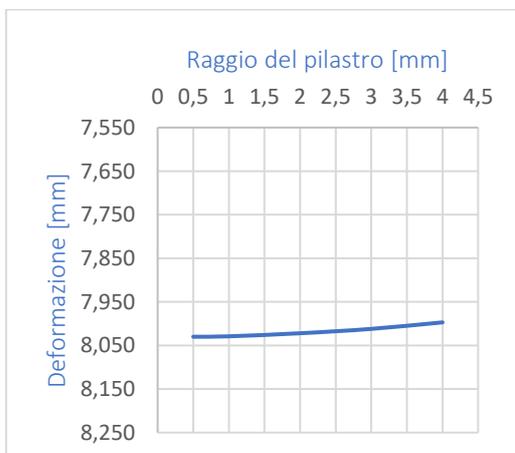
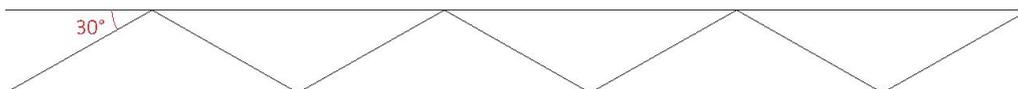


Prestazione strutturale all'aumentare del raggio del pilastro inclinato di 45°

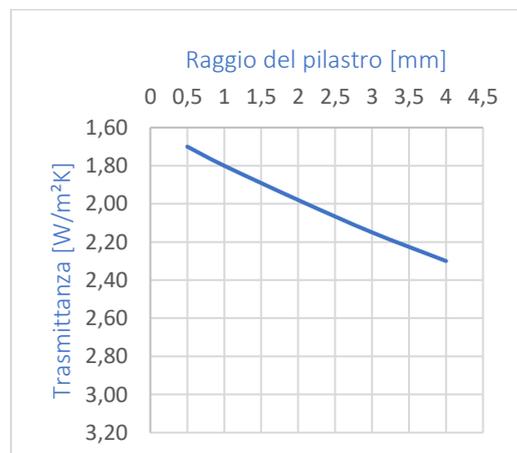


Prestazione termica all'aumentare del raggio del pilastro inclinato di 45°

Inclinazione 30° - Distanza tra i pilastri 26 mm

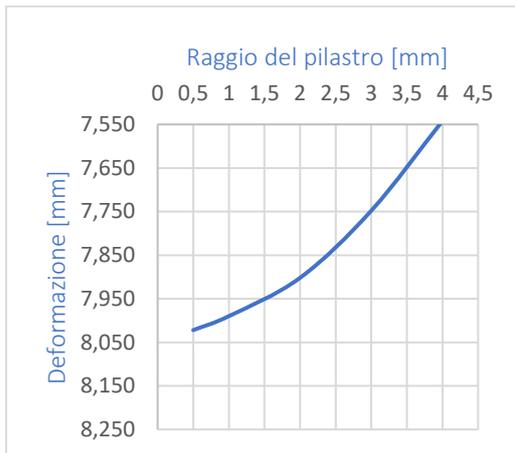
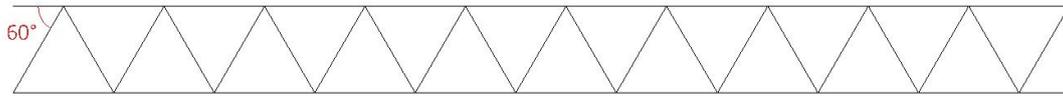


Prestazione strutturale all'aumentare del raggio del pilastro inclinato di 30°

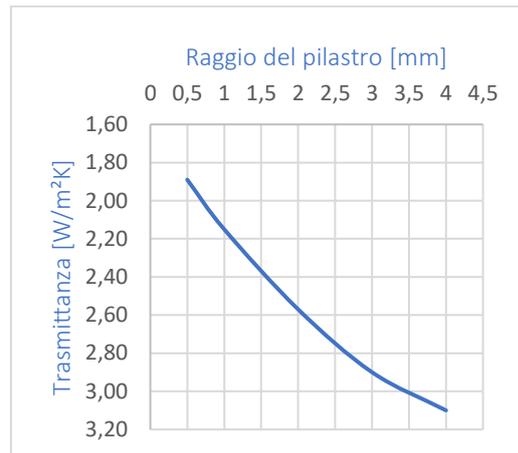


Prestazione termica all'aumentare del raggio del pilastro inclinato di 30°

Inclinazione 60° - Distanza tra i pilastri 9 mm



Prestazione strutturale all'aumentare del raggio del pilastro inclinato di 60°

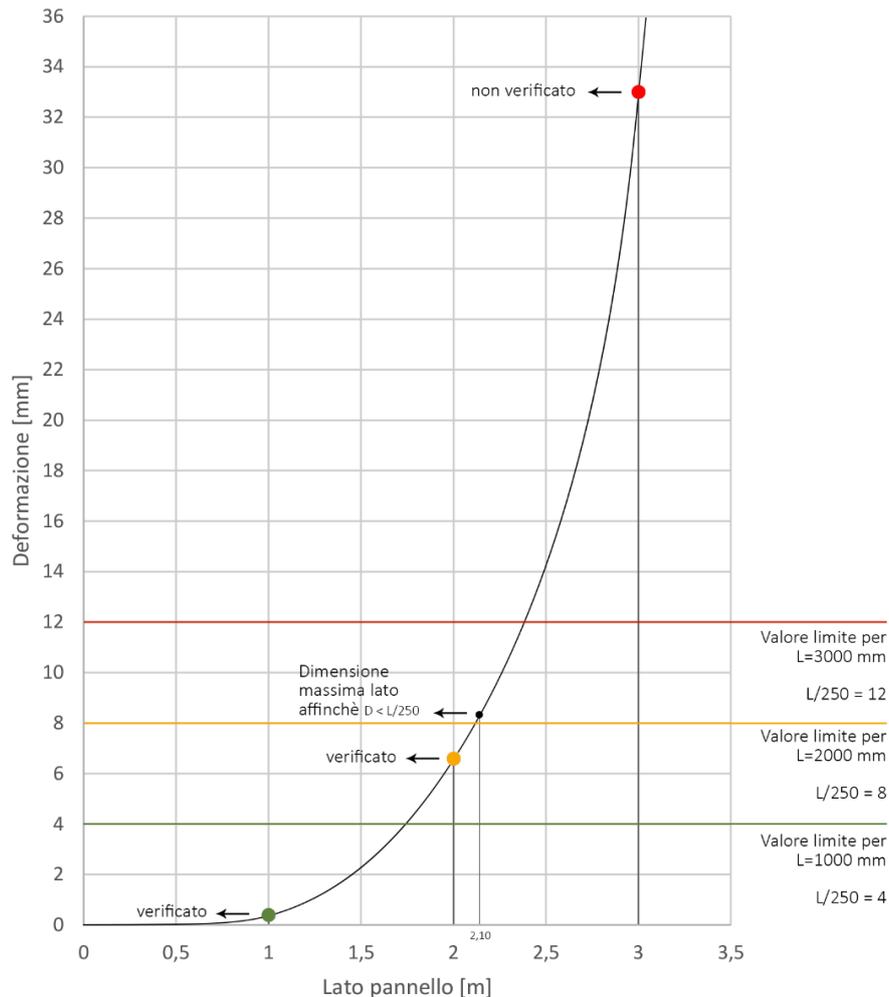


Prestazione termica all'aumentare del raggio del pilastro inclinato di 60°

Come si può notare dai grafici quando la prestazione strutturale migliora quella termica diminuisce e viceversa, sebbene possiamo fare alcune considerazioni: trattandosi di scale diverse il variare della deformazione è molto meno rilevante rispetto al variare dei valori di trasmittanza, pertanto dal momento che la prestazione strutturale risulta ampiamente verificata è conveniente utilizzare dei pilastri a raggio minore, inoltre il caso in cui i pilastri sono più inclinati (inclinazione 60°) e sono minori i punti di contatto è il caso in cui il delta della variazione è inferiore per entrambi gli ambiti ma con valori molto positivi in ambito termico e meno performanti dal punto di vista della deformazione.

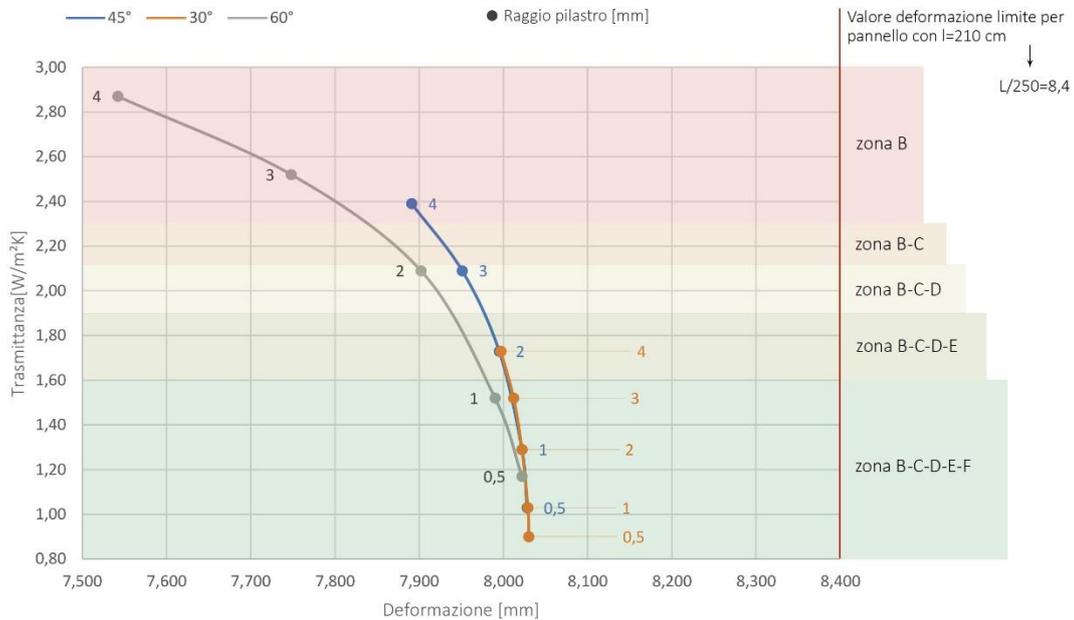
Tuttavia, l'isolamento del pannello può essere incrementato anche con espedienti che non sono di impatto sulla performance strutturale, come per esempio i rivestimenti basso-emissivi o la presenza di gas in intercapedine.

Per quanto riguarda la performance strutturale, è stato definito come limite il caso in cui la deformazione sia pari a $L/250$. Prendendo in considerazione tre possibili dimensioni del pannello (1 m, 2 m, 3 m) si può osservare come la deformazione aumenti esponenzialmente con la grandezza della lastra.



Prendendo quindi in esame la dimensione massima del pannello affinché i requisiti siano rispettati ($L=2,10$ m) è possibile intervenire per migliorare la performance termica. Infatti, come detto precedentemente, è possibile diminuire il valore di trasmittanza senza condizionare la prestazione strutturale, agendo sui materiali in intercapedine o sui rivestimenti delle lastre di vetro. Considerando per esempio il caso 8 delle analisi termiche della sezione con il nucleo, in cui il valore di trasmittanza è notevolmente più basso grazie alla presenza di aerogel in intercapedine, è possibile osservare come con gli stessi valori di deformazione sia possibile raggiungere un livello di isolamento termico notevolmente migliore. Nel grafico seguente sono riassunti i valori di trasmittanza e di

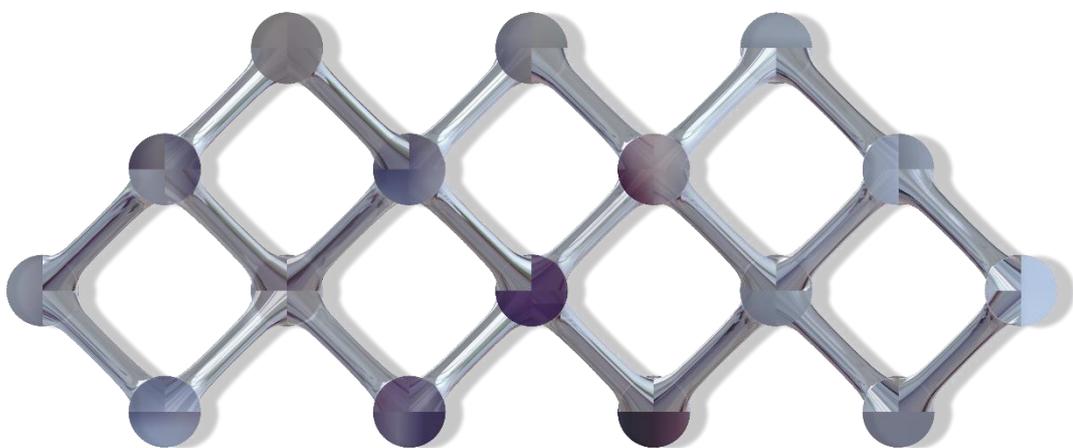
deformazione per un pannello di lato 210 cm con aerogel in intercapedine, evidenziando la zona climatica di possibile applicazione.



In questo grafico è evidente come la deformazione, al restringimento dei pilastri e al diminuire dell'inclinazione, aumenti fino a raggiungere un valore massimo con scarsa variazione, mentre la trasmittanza ha un range sensibilmente minore con l'inclinazione a 30°. Si può quindi presumere che sia più vantaggioso l'utilizzo di un nucleo interno con una struttura meno fitta quando si intende privilegiare un maggiore isolamento, per esempio costruendo in zone con un clima meno temperato. Quando questo non sia necessario e in linea generale, è possibile considerare delle soluzioni di compromesso come quella utilizzata nel pannello sandwich studiato in questa tesi.

CAPITOLO 7

CONCLUSIONI



7.1 Conclusioni

Il lavoro di tesi presentato ha riguardato lo studio di un pannello composito in vetro sottile con un nucleo piramidale stampato tridimensionalmente in PMMA. È stato visto come il vetro sottile può rappresentare un ottimo punto di partenza per delle soluzioni architettoniche innovative grazie alle sue caratteristiche di resistenza, flessibilità e trasparenza. D'altra parte, il vetro sottile da solo non può fornire una rigidità flessionale sufficiente come tipicamente garantito da materiali costruttivi standard, quindi una soluzione è rappresentata dalla tecnica di costruzione a sandwich che, grazie alla presenza di un nucleo interno tra due lastre di vetro sottile, ne aumenta la rigidità. Oltre alla definizione, a seguito di ricerche di letteratura, della geometria e del materiale per la costruzione del nucleo del pannello, sono stati effettuati dei calcoli per prevedere il comportamento strutturale e termico di tale prodotto, valutandone vantaggi e svantaggi. L'obiettivo di questo progetto è la valutazione di un prodotto innovativo in campo edilizio che sia performante da più punti di vista nell'ottica della sostenibilità di un progetto architettonico, ricercando soluzioni che possano migliorarne la trasmittanza al fine di renderlo un elemento di facciata con buone proprietà di isolamento, limitando così le dispersioni e quindi riducendo l'energia necessaria al comfort degli occupanti.

Nel capitolo 3 si è indagato il comportamento strutturale del pannello sandwich per il quale, a seguito di alcune valutazioni, è stata scelta una conformazione di nucleo a reticolo piramidale e ne sono stati calcolati i valori di rigidezza a flessione e a taglio e la deformazione massima per un pannello di lato 1 metro, osservando che il limite di deflessione è ampiamente rispettato. Inoltre, è stata determinata una dimensione massima che può raggiungere il pannello, da utilizzare in facciata o in copertura di un edificio, affinché i requisiti siano rispettati e la deformazione resti inferiore al coefficiente $L/250$ (dove L è il lato del pannello) fornito dalla normativa, pervenendo ad una soluzione di pannello quadrato di lato 210 cm. È stato infine calcolato il peso di tale elemento costruttivo, verificando che fosse inferiore a 50 kg.

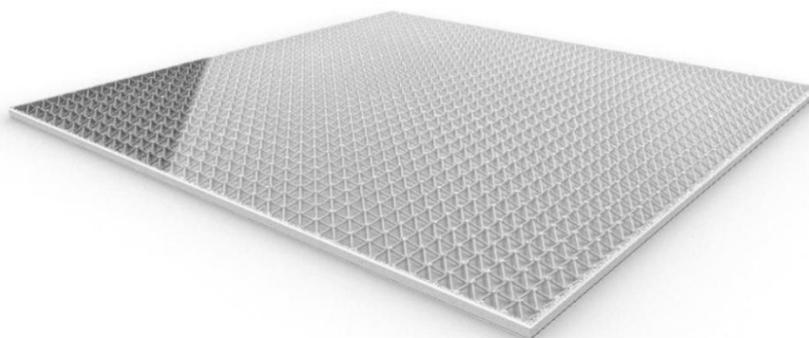
Il capitolo 4 ha invece riguardato l'ambito di fisica tecnica inerente all'isolamento termico, procedendo all'identificazione di diverse tipologie per il pannello studiato nei capitoli precedenti, in base alla presenza o all'assenza del nucleo interno, di rivestimento basso-emissivo sulle lastre, alla presenza di gas o aerogel nell'intercapedine o all'interno dello stesso nucleo nel caso di struttura cava. È stata quindi calcolata la trasmittanza del pannello per ogni caso sia analiticamente sia attraverso il Software Bisco, ed è stato osservato che la presenza di una struttura tra le due lastre compromette in modo significativo le prestazioni termiche rispetto ad un normale vetrocamera. In ogni caso, è possibile pervenire comunque a delle buone performance termiche se viene inserito un materiale come l'aerogel in intercapedine oppure vengono utilizzati rivestimenti basso-emissivi sulle lastre. Per ogni caso analizzato, è stata infine identificata la zona climatica di applicazione in base alle normative vigenti, di cui si riporta una tabella riassuntiva:

Pannello sandwich con nucleo in PMMA	Trasmittanza [W/m ² K]	Zona climatica di applicazione
Caso 1 - Nucleo pieno, intercapedine aria	3,19	A
Caso 2 - Nucleo pieno, inter. Aria + argon (90%)	3,13	A
Caso 3 - Nucleo pieno, inter. Aria + argon (90%) con rivestimento bassoemissivo	2,52	A-B
Caso 4 - Nucleo cavo con aria, inter. Aria + argon (90%)	3,00	A-B
Caso 5 - Nucleo cavo con Aerogel, inter. Aria + argon (90%)	2,74	A-B
Caso 6 - Nucleo cavo con aria, inter. Aria + argon (90%) con rivestimento bassoemissivo	2,24	A-B-C
Caso 7 - Nucleo cavo con Aerogel, inter. Aria + argon (90%) con rivestimento bassoemissivo	2,06	A-B-C-D
Caso 8 - Nucleo pieno, inter. Aerogel	1,79	A-B-C-D-E
Caso 9 - Nucleo cavo con Aerogel, inter. Aerogel	1,36	A-B-C-D-E-F

È stato poi operato un confronto tra la performance strutturale e quella termica, notando come siano in controtendenza rispetto alla variazione della geometria del nucleo, nello specifico inclinazione e raggio dei pilastri. In conclusione, è possibile affermare che, per

i calcoli svolti, la soluzione di pannello sandwich analizzata - con pilastri di raggio 2 mm e inclinazione a 45° - rappresenta un buon compromesso che non penalizza in modo rilevante né la performance strutturale né quella termica, sebbene, dal momento che la variazione della deformazione è meno significativa di quella della trasmittanza, in linea generale le soluzioni più favorevoli tra quelle proposte sono quelle che privilegiano l'ambito termico, grazie alla presenza di un nucleo interno meno fitto e più leggero, con possibilità di incremento delle proprietà isolanti con altri espedienti tecnologici. Per tali motivi, però, si può concludere che la struttura ideata per il nucleo sia sovradimensionata dal punto di vista strutturale e di conseguenza il materiale utilizzato è scarsamente sfruttato e che sia possibile ipotizzare di alleggerirla nell'ottica di un risparmio di materiale, costo ed emissioni, e per pervenire ad un miglioramento dal punto di vista dell'isolamento termico. Per quanto riguarda l'ipotesi di utilizzo di un nucleo cavo è stato possibile osservare che, sebbene il valore di trasmittanza sia leggermente minore rispetto alla struttura piena, non rappresenta una vera e propria soluzione al problema delle dispersioni di calore, mentre è molto più efficace l'utilizzo di un rivestimento basso-emissivo o di un materiale con un isolamento ottimale come l'aerogel che però penalizza la visibilità e rappresenta una maggiorazione in termini di costo ed emissioni.

È possibile affermare infine che sia possibile contemplare la realizzazione di un pannello sandwich ipotizzando una geometria del nucleo interno meno fitta e testandola dal punto di vista strutturale. L'ottimizzazione di queste caratteristiche, in aggiunta a quelle considerate in questa tesi, può concretizzarsi in un elemento costruttivo ideale per vetrate ampie, resistenti e con buone qualità di isolamento termico, che permetta l'ingresso della luce solare diffondendola all'interno dell'edificio, riducendo in minima parte la visibilità dell'esterno, qualità che rendono questa tecnologia adeguata a destinazioni d'uso come biblioteche, spazi espositivi, uffici, grandi ingressi e sale per conferenze.



Vista renderizzata del pannello sandwich oggetto di studio

BIBLIOGRAFIA

Akilo M. A., *Design and analysis of a composite panel with ultra-thin glass faces and a 3d-printed polymeric core*, Master thesis, Tu Delft, 2018.

Ali H., Hayat N., Farukh F., Imran S., Kamran M. S., Ali H. M., *Key design features of multi vacuum glazing for windows: a review*, 2016.

Allen H. G., *Analysis and design of structural sandwich panels*, Elsevier, 1969.

Berardi U., *The development of a monolithic aerogel glazed window for an energy retrofitting project*, Applied Energy, Volume 154, 2015, Pag. 603-615.

Bourell D., Kruth J. P., Leu M., Levy G., Rosen D., Beese A. M., Clare A., *Materials for additive manufacturing*, CIRP Annals, Volume 66, Edizione 2, 2017, Pag. 659-681.

Cha J., Kim S. Park K., Lee D. R., Jo J., Kim S., *Improvement of window thermal performance using aerogel insulation film for building energy saving*, J Therm Anal Calorim, Volume 116, 2014, Pag. 219-224.

Cho S., Seok-Hyun K., *Analysis of the Performance of Vacuum Glazing in Office Buildings in Korea: Simulation and Experimental Studies*, 2017.

Cuce E., Cuce P. M., *Vacuum glazing for highly insulating windows: Recent developments and future prospects*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 54, 2016, Pag. 1345-1357.

Eisazadeh N., Allacker K., De Troyer F., *Investigating the Energy Efficiency, Environmental and Daylighting Performance of Coated Glazing*, Challenging Glass 6 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Delft University of Technology, 2018.

Favoino F., Overend M., Jin Q. *The optimal thermo-optical properties and energy saving potential of adaptive glazing technologies*, Applied Energy, Volume 156, 2015.

Fornieris P., *Progettazione di pannelli compositi vetro-polimero per applicazioni strutturali*, Tesi di laurea magistrale, 2020.

Gao T., Petter Jelle B., Ihara T., Gustavsen A., *Insulating glazing units with silica aerogel granules: The impact of particle size*, Applied Energy, Volume 128, 2014, Pag. 27-34.

Gastaldi M., Bertolini L., *Introduzione ai materiali per l'architettura*, Terza Edizione, CittàStudi Edizioni, 2011.

- Ghosh A., Norton B., *Advances in switchable and highly insulating autonomous (selfpowered) glazing systems for adaptive low energy buildings*, Renewable Energy, Volume 126, 2018, Pag. 1003-1031.
- Guidi M., *Thin Glass Cold Bent Sandwich Panel*, Master of Science in Building Engineering, Delft University of Technology, 2019.
- Hu Y., Heiselberg P. K., *A new ventilated window with PCM heat exchanger - Performance analysis and design optimization*, Energy & Buildings, Volume 169, 2018, Pag. 185-194.
- Hundevad, J., *Super lightweight glass structures - a study*, GlassCon Global, 2014 .
- Kantha Rao K., Jayathirtha Rao K., Sarwade A.G., Sarath Chandra M. *Strength Analysis on Honeycomb Sandwich Panels of different materials*, International Journal of Engineering Research and Applications, Hyderabad, 2012.
- Lambert H., & O'Callaghan J., *Ultra-thin High Strength Glass Research and Potential Applications*, Glass Performance Days, 2013.
- Lazzaroni L., *Structural Design and Experimental Validation of an Innovative Hybrid Lightweight Sandwich Glass Panel*, Master Thesis, University of Pisa, 2018.
- March G., *Zero energy buildings: Key role for RE at UK housing development*, Refocus, Volume 3, Edizione 3, 2002, Pag. 58-61.
- Miri B., *Flexible Transparency With Smart Materials: A study on adaptive thin glass facade developed with Shape Memory Alloy*, Master Thesis, TU Delft University, 2018.
- Neugebauer J., Wallner-Novak M., Lehner T., Wrulich C., Baumgartner M., *Movable Thin Glass Elements in Façades*, Challenging Glass 6 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass, Delft University of Technology, 2018.
- Petras A., *Design of Sandwich Structures. Doctor of Philosophy Dissertation*, Cambridge University Engineering Department, 1998.
- Rezaei, Shannigrahi, Ramakrishna. *Advanced transparent facades: market available products and associated challenges in building performance simulation*. National University of Singapore, 2016.
- Rezaei, Shannigrahi, Ramakrishna. *A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment*, Solar Energy Materials & Solar Cells, Volume 159, 2017, Pag. 26-51.

Schipper R., *Glass - The Material*, Lecture Notes CIE4215 - Facade Design Plus, TU Delft University, 2015.

Schittich, Staib, Balkow, Schuler, & Sobek, *Glass as a building material*. In *Glass Construction Manual*, 2007.

Silveira R. R., *Flexible Transparency - A study on thin glass adaptive facade panels*. Master Thesis, TU Delft University, 2016.

Silveira R. R., (Ultra) *Thin Glass - Development of low mass curved adaptive panels/structures*, Faculty of Architecture and the Built Environment, Delft University, 2016.

Suresh B., Sadineni, Srikanth Madala, Robert F., Boehm, *Passive building energy savings: A review of building envelope components*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 15, Edizione 8, 2011, Pag. 3617-3631.

Teich M., *Merging Two Façade Types into a New Product: Glass Sandwich Panel*, *Challenging Glass 5 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*, Ghent University, 2016.

Timoshenko S. P., *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill Higher Education, Seconda edizione, 1964.

Vitalis D., Veer F., Oikonomopoulou F., *Design and Experimental Testing of All Glass Sandwich Panels: An Experimental and Numerical Study for the Glass Floors of the Acropolis Museum*, *Challenging Glass 6 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*, Delft University of Technology, 2018.

Weimar T., Andrés López S., *Research on Thin Glass-Polycarbonate Composite Panels*, *Challenging Glass 6 - Conference on Architectural and Structural Applications of Glass*, Delft University of Technology, 2018.

Wurm J., *Glass Structures - Design and Construction of Self-Supporting Skins*, Birkhäuser, 2007.

Manual BISCO v11.0w, PHYSIBEL, 2016.

Okalux, *In Between*, 2012.

SITOGRAFIA

<https://it.wikipedia.org>

<https://www.bottegaenergia.com/normativa-energetica.html>

<https://formlabs.com>

<https://www.glassx.ch/>

<https://www.agc-yourglass.com/>

<https://challengingglass.com/>