POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Tesi di laurea magistrale

Progettazione di pannelli compositi vetro-polimero per applicazioni strutturali



Relatore: Prof. Corrado Mauro **Candidato:** Forneris Paolo

Aprile 2020

Sommario

Il presente lavoro di tesi concerne la progettazione di pannelli compositi vetro-polimero nella fattispecie di pannelli sandwich, con ambedue gli strati esterni in vetro sottile ed uno strato intermedio in PET-G nella forma di una struttura a travatura organizzata in celle piramidali a base quadrata, denominata truss core.

Nell'ambito delle applicazioni strutturali ed architettoniche, i pannelli sandwich rappresentano una possibile innovazione che consente di realizzare grandi superfici vetrate con un peso ridotto, ma senza tralasciare resistenza e sicurezza.

La scelta del vetro sottile dimostra vantaggi per le sue alte caratteristiche resistenziali derivate dall'ottima temprabilità, oltre che per le sue proprietà ottiche. La scarsa rigidezza a taglio del vetro sottile è compensata dal truss core che ha anche il compito di mantenere la struttura a sandwich coesa e far lavorare insieme gli strati in vetro, una volta sottoposti a carico.

Il materiale adottato per lo strato intermedio è il PET-G, scelto per la sua buona trasparenza, il costo ridotto e la sua condiscendenza ad essere impiegato nei processi di fabbricazione additiva. Infatti, il truss core può presentare geometrie complesse, difficilmente ottenibili tramite i comuni metodi di lavorazione.

Inizialmente, la progettazione si orienta verso la costruzione di travi sandwich e l'analisi della freccia sotto carico avvalendosi di due differenti modelli, uno analitico ed uno basato sul metodo agli elementi finiti, al fine di confrontarli e capire i limiti e l'affidabilità del primo. In seguito, la maggior parte del lavoro è svolta basandosi sul secondo modello soltanto, col quale vengono discretizzati travi e pannelli sandwich. Quindi, si eseguono differenti analisi dell'evoluzione della freccia, previa l'applicazione di un carico, al variare di alcuni parametri salienti delle travi e dei pannelli sandwich, che comprendono: la lunghezza della trave o il lato del pannello; lo spessore del vetro; lo spessore del truss core; il diametro e l'inclinazione degli elementi del truss core. Nell'esposizione dei risultati delle analisi, vengono commentati i dati ottenuti, indicando come il comportamento complessivo delle strutture dipenda prevalentemente dalle caratteristiche e dalla disposizione degli strati in vetro.

Dall'ultima di queste analisi, riguardante i soli pannelli, si ricavano i dati necessari alla costruzione di un grafico di ausilio alla progettazione dei pannelli sandwich, che restituisce la lunghezza massima che il pannello può assumere per non superare la freccia limite considerata,

una volta sottoposto alla condizione di carico distribuito superficialmente di 1 kN/m². Oltre a ciò, vengono verificate le tensioni agenti negli strati in vetro e nel truss core e gli sforzi di taglio presenti a livello delle connessioni fra i vari strati.

Infine, nelle considerazioni finali viene espresso un giudizio sui pannelli sandwich progettati e, alla luce dei risultati ottenuti e di un evidente scarso sfruttamento dei materiali impiegati, viene proposta una nuova variante dello strato intermedio denominata grid core, cioè una struttura a graticcio a maglie larghe, applicata ad un nuovo pannello sandwich. Di quest'ultimo si svolge una breve analisi, individuando la freccia sotto carico, le tensioni all'interno dei componenti e gli sforzi di taglio all'interfaccia fra i vari strati ed esprimendo un primo giudizio sull'alternativa proposta.

Ringraziamenti

Nonostante sia una pratica sconsigliata, desidero innanzitutto ringraziare il mio relatore prof. Corrado Mauro. Il vivo interesse che mette nel suo lavoro e la spigliatezza di ragionamento hanno sempre costituito un importante stimolo nel proseguire la ricerca. Grazie anche per aver sempre dimostrato una grande disponibilità a chiarimenti e spiegazioni.

Non potrei assolutamente esimermi dal ringraziare quelli che sono stati i miei compagni d'alloggio Jacopo (Ja) e Tommaso (Tommy). È ormai da un po' di tempo che questa Wohngemeinschaft si è sciolta, ma è stato bello incontrarsi da praticamente perfetti sconosciuti, con età e interessi differenti (e nel mio caso pure l'università), e condividere due anni circa in quel di via Napione. Ho un solo rammarico: sarebbe stato bello passare un po' più di tempo libero insieme, ma il politecnico me ne ha richiesto parecchio.

Un grazie va a Carlo (the King), che nei momenti di malcelato rancore ha sempre cercato di farmi ragionare per obiettivi, invitandomi a lasciar da parte nervosismi ed ansie che, se da un lato potevano trovare giustificazione, dall'altra si rivelavano comunque inutili. Non so quanto io abbia recepito i tuoi discorsi, ma l'obiettivo è raggiunto, perfino nel bel mezzo di una pandemia.

Grazie ad Alessandro (Sandro), in qualche modo compagno di "sventure", ma anche compagno insieme a Carlo delle serate torinesi (e pure cuneesi) della "Torino by night".

Grazie anche a Fabrizio (Bellots) che al primo anno di magistrale, dopo il mio stop di qualche anno, mi ha aiutato a ritrovare il ritmo e a riportare alla mente ciò che non era più così chiaro, sorbendosi pure delle mie arrabbiature – peraltro a torto – senza mai irritarsi. Ti sono riconoscente, davvero.

Grazie a mio cugino e vicino di casa Mattia (Matti) che ha in qualche modo sempre cercato di spronarmi quando balzava fuori il discorso tesi.

Immancabile – anzi – rinnovato il sentitissimo ringraziamento alla mia famiglia (nelle persone di mio fratello, mia sorella, mio cognato, mia cognata e i miei nipoti) e in particolar modo ai miei genitori, non solo perché senza di loro probabilmente non sarebbe stato nemmeno possibile, non solo per la fiducia che sempre ripongono in me, ma questa volta anche per la (grande) pazienza e comprensione dimostrate. Non credo che io ne sarei stato capace.

Infine, dedicherei qualche parola anche a me stesso. Non tanto perché lo studio, gli esami, questo lavoro di tesi dopotutto sono opera mia; certo, questo ha un indiscutibile peso ed un grande valore, ma più che altro perché mi ero posto un traguardo. Ho incontrato delle difficoltà, è vero, ma l'ho raggiunto.

Anzi, l'ho superato.

Bravo.

Paolo Forneris

Indice

| | Indice | | 7 | |
|---|---------|-------------------------------------|-------------|--|
| 1 | Introd | uzione | 11 | |
| | 1.1 O | biettivo | 12 | |
| | 1.2 Le | e strutture a sandwich | 12 | |
| | 1.3 Pr | rogettazione | 14 | |
| 2 | Struttu | ire sandwich | 7 11 | |
| | 2.1 Ip | pannelli sandwich | 15 | |
| | 2.2 To | opologia del core | 16 | |
| | 2.2.1 | Core omogenei | 17 | |
| | 2.2.2 | Core non omogenei | 18 | |
| | 2.2.2 | 2.1 Supporto bidirezionale | 18 | |
| | 2.2.2 | 2.2 Supporto monodirezionale | 19 | |
| | 2.2.2 | 2.3 Supporto "a zona" | 19 | |
| | 2.2.2 | 2.4 Supporto puntuale | 20 | |
| | 2.2.2 | 2.5 Altre topologie | 20 | |
| | 2.3 | Truss core | 21 | |
| | 2.3.1 | Space frame | 21 | |
| | 2.3.2 | Configurazioni | 22 | |
| 3 | Vetro e | e vetro sottile | 25 | |
| | 3.1 Pr | roprietà del vetro | 25 | |
| | 3.1.1 | Proprietà chimiche | 25 | |
| | 3.1.2 | Proprietà fisiche | 28 | |
| | 3.2 Pr | rodotti in vetro | 30 | |
| | 3.2.1 | Vetro piano | 31 | |
| | 3.2.2 | Vetro colato | 32 | |
| | 3.2.3 | Vetro sottile e ultrasottile | 35 | |
| | 3.3 Tı | rattamenti e lavorazioni secondarie | 37 | |
| | 3.3.1 | Trattamenti termici di rinforzo | 38 | |
| | 3.3. | 1.1 Tempra termica | 39 | |

| | 3.3.1 | 1.2 Tempra chimica | 40 |
|----------------|--------|--|----|
| | 3.3.2 | Laminazione | 42 |
| 3.3.3 3.3.4 | | Vetrocamera | 46 |
| 3.3.4 | | Rivestimenti | 47 |
| 4 | Fabbri | cazione additiva | 49 |
| | 4.1 Pr | ocesso | 50 |
| | 4.2 Te | ceniche di FA | 51 |
| | 4.2.1 | Stereolitografia | 52 |
| | 4.2.2 | Sinterizzazione laser selettiva | 54 |
| | 4.2.3 | Fused deposition modelling | 55 |
| | 4.2.4 | 3-dimensional printing | 56 |
| | 4.2.5 | Polyjet | 57 |
| | 4.3 M | ateriali per la fabbricazione additiva | 58 |
| 5 | Modell | azione del composto vetro-polimero | 61 |
| | 5.1 Co | omposizione di base del pannello sandwich in vetro | 61 |
| | 5.2 No | omenclatura dei pannelli sandwich | 62 |
| | 5.3 M | odello analitico | 62 |
| | 5.3.1 | Teoria della trave sandwich | 62 |
| 4 | 5.3.2 | Comportamento strutturale | 65 |
| | 5.3.2 | 2.1 Cedimento delle facce esterne | 65 |
| | 5.3.2 | 2.2 Cedimento a taglio del core | 66 |
| | 5.3.2 | 2.3 Deflessione massima | 66 |
| | 5.3.2 | 2.4 Cedimento a trazione o in compressione degli elementi del truss core . | 67 |
| | 5.3.2 | 2.5 Buckling degli elementi del truss core | 67 |
| | 5.3.2 | 2.6 Wrinkling | 68 |
| | 5.3.3 | Truss core | 68 |
| | 5.3.3 | 3.1 Densità relativa | 69 |
| | 5.3.3 | 3.2 Modulo elastico e modulo di resistenza a taglio equivalenti | 69 |
| | 5.4 M | odello FEM | 70 |
| | 5.4.1 | Discretizzazione | 71 |
| | 5.4.2 | Test del modello | 73 |
| | 5.4.2 | 2.1 Errore energetico | 74 |
| | 5.4.2 | 2.2 Convergenza valori di tensione | 75 |

| | 5.4.2.3 Convergenza valori di freccia | | | |
|---|--|-----|--|--|
| | 5.4.2.4 Conclusioni | | | |
| 6 | Analisi parametriche | 77 | | |
| | 6.1 Calcolo analitico della freccia | | | |
| | 6.1.1 Calcolo della freccia – travi sandwich | | | |
| | 6.1.2 Calcolo della freccia – pannelli sandwich | | | |
| | 6.2 Parametri delle analisi | 79 | | |
| | 6.3 Analisi parametrica 1 | | | |
| | 6.4 Analisi parametrica 2 | | | |
| | 6.5 Analisi parametrica 3 | | | |
| | 6.6 Analisi parametrica 4 | | | |
| 7 | Analisi dei risultati e conclusioni | 93 | | |
| | 7.1 Grafico di progetto | | | |
| | 7.1.1 Premessa | | | |
| | 7.1.2 Significato e individuazione della lunghezza massima | | | |
| | 7.1.3 Costruzione del grafico | | | |
| | 7.2 Tensioni e forze agenti nei pannelli | | | |
| | 7.2.1 Tensioni nelle lastre di vetro | | | |
| | 7.2.2 Taglio all'interfaccia vetro-polimero | | | |
| | 7.2.3 Tensioni normali nel truss core | | | |
| | 7.3 Considerazioni finali | 107 | | |
| | 7.3.1 Nuova ipotesi di alleggerimento | 108 | | |
| | 7.3.1.1 Risultati ottenuti | | | |
| | Bibliografia | 115 | | |

Capitolo 1 Introduzione

Il vetro è un materiale di origini molto antiche, la cui nascita può essere fatta risalire già alle prime civiltà organizzate che si svilupparono in Mesopotamia pochi millenni prima dell'anno zero; era certamente molto differente da come lo intendiamo noi ora e si trattava per lo più di paste vitree usate nella creazione e decorazione di monili e suppellettili varie.

Trovando in esso delle caratteristiche uniche e di grandissima utilità, l'uomo ha condotto uno sviluppo continuo del materiale che ha subito un'eccezionale accelerazione dapprima nei secoli XVIII e XIX, con le rivoluzioni industriali, e dopo, nel XX secolo, con la standardizzazione della sua produzione che ne ha abbattuto i costi, rendendolo di fatto un materiale comune e ormai fondamentale nella vita quotidiana della collettività e del singolo.

Recentemente il vetro ha trovato nuove larghe applicazioni nei mondi dell'elettronica, per esempio come elemento protettivo degli schermi di smartphone e tablet, ma anche dell'architettura e dell'ingegneria strutturale.

Infatti, dopo secoli in cui è stato relegato, principalmente per motivi tecnologici e quindi anche di costo, alla realizzazione di piccole aperture nelle pareti degli edifici, oggi è possibile innalzare le medesime pareti avvalendosi di strutture che vedono il vetro come uno – se non addirittura il primo – dei principali materiali da costruzione. Questo ha portato e sta conducendo tuttora verso una nuova concezione degli edifici che, seppur mantenendo i loro volumi e le loro funzioni, possono apparire in alcuni casi addirittura immateriali, confondendosi con i colori dell'ambiente circostante e permettendo allo stesso tempo una comunicazione fra quest'ultimo e l'ambiente interno (figura 1.1).

Questo forte interesse corrisponde anche ad una sempre maggiore richiesta di miglioramento delle proprietà del vetro, o dello sviluppo di nuove. In caso di un impiego strutturale, è

fondamentale che sia efficiente dal punto di vista delle caratteristiche meccaniche, delle proprietà termiche e di quelle ottiche, ma anche dal lato fondamentale della sicurezza, che può rappresentare una fonte di grandi criticità, specialmente per un materiale fragile.



Figura 1.1: La Elbphilarmonie, sala concerti di Amburgo.

1.1 Obiettivo

L'obiettivo del presente lavoro di tesi si colloca nello sviluppo di soluzioni innovative per il vetro come materiale strutturale.

Le caratteristiche di resistenza del vetro possono essere davvero elevate, tuttavia la natura fragile e l'impossibilità di evitare difetti nei componenti con esso realizzati ne compromette le potenzialità, determinando per esempio il cedimento per propagazione di una cricca a carichi che il materiale, se esente da difetti, potrebbe agevolmente sopportare.

Di qui deriva la necessità di aumentare gli spessori delle parti in vetro, per garantire la loro resistenza e la loro conformità ai requisiti di sicurezza, con l'effetto diretto di accrescerne il peso e, di conseguenza, con la necessità di progettare anche le strutture di supporto in modo da sostenere tali carichi.

L'obiettivo risiede perciò nel cercare di sfruttare al meglio le potenzialità e le qualità del materiale abbattendone il peso e una possibile soluzione è data dai pannelli sandwich in vetro e polimero.

1.2 Le strutture a sandwich

Le strutture a sandwich, trattate nel capitolo 2, sono essenzialmente costituite da due strati esterni resistenti che sopportano le tensioni causate dai carichi esterni, mentre lo strato intermedio, realizzato con un materiale più leggero, ha lo scopo di garantire la coesione fra i primi, far sì che lavorino insieme, oltre che mantenere la solidità della struttura stessa.

È possibile trovare delle applicazioni nel mondo naturale, in particolare laddove siano richieste al contempo resistenza e leggerezza, come nelle ossa degli uccelli che, se fossero costituite dal solo "guscio" esterno, potrebbero spezzarsi perfino sotto la semplice azione muscolare.

Per quanto riguarda il mondo umano, le strutture a sandwich sono note già da tempo e delle prime applicazioni hanno avuto luogo alcuni decenni fa, in particolare nel campo dell'aeronautica. Un esempio celebre è il caccia bombardiere "Mosquito" in dotazione alla RAF durante la Seconda Guerra Mondiale: era realizzato prevalentemente con pannelli sandwich in legno di balsa all'interno e compensato sull'esterno, similmente a quanto si vede nella figura 1.3.



Figura 1.2: Esempi dal mondo naturale: l'ala di un'aquila (a), il becco di un bucero (b).



Figura 1.3: Il caccia bombardiere Mosquito (a) e la sezione di un'ala d'aereo (b).

Per quanto riguarda i pannelli sandwich in vetro, questi sono normalmente costruiti con due lastre di vetro molto sottile sull'esterno, mentre all'interno si trova una struttura a celle, spesso in un materiale di tipo metallico o polimerico.

Tali pannelli traggono vantaggio dall'utilizzo del vetro sottile che, come si vedrà nel capitolo 3, presenta grandi caratteristiche di resistenza, una minore suscettibilità ai difetti superficiali e, con uno spessore che può collocarsi attorno a 1 mm, un peso estremamente ridotto.

Nel capitolo 4 si discuterà la tecnologia della fabbricazione additiva, particolarmente utile nella costruzione di geometrie complesse, come possono essere quelle assunte dallo strato

intermedio, avvalendosi di materiali polimerici e sfruttandone le caratteristiche di leggerezza oltre che di traslucenza.

1.3 Progettazione

La realizzazione di pannelli sandwich in vetro-polimero efficienti dovrà passare prima attraverso una fase di progettazione, per capire limiti e potenzialità della struttura.

Nel capitolo 5 verranno esposti i modelli ed i materiali su cui si basa la progettazione, mentre nel capitolo 6 questi verranno adoperati per comprendere meglio il comportamento sotto carico delle strutture sandwich ed osservarne la variazione in base a diversi parametri, oltre ad operare un confronto fra le soluzioni fornite dai due modelli.

Nel capitolo conclusivo, si proporrà un primo strumento di ausilio alla progettazione di pannelli sandwich in vetro-polimero, ricavato dalla base di dati ottenuti nelle fasi di studio tramite i modelli; si individueranno le tensioni e gli sforzi ai quali la struttura è sottoposta, valutando dove risiedono le criticità e dove, invece, risiedono i margini per un maggiore sfruttamento delle potenzialità; infine, alla luce dei risultati ottenuti e delle opportune considerazioni, si esprimerà un giudizio complessivo sui pannelli progettati, oltre a offrire un'ulteriore alternativa di pannello sandwich vetro-polimero.

Capitolo 2

Strutture sandwich

Lo scopo delle strutture a sandwich sta nell'unire su più strati (di qui il termine *sandwich*, letteralmente "a panino") materiali uguali o diversi, organizzati in strutture uguali o diverse, in modo da ottenere un prodotto finale che presenti, almeno in parte, un connubio delle caratteristiche vantaggiose dei materiali e/o delle strutture dei costituenti.

2.1 I pannelli sandwich

I pannelli sandwich sono composti da due strati esterni sottili e resistenti ai quali si frappone un'anima (spesso indicata col termine *core*) a bassa densità, come visibile nella figura 2.1. Il risultato è una struttura a basso peso con un utilizzo efficiente dei materiali. Queste tipologie di pannelli sono largamente adoperate nei campi dell'ingegneria aerospaziale e del veicolo, ma stanno conoscendo ampia diffusione anche nei mondi dell'architettura e dell'ingegneria civile.



Figura 2.1: Rappresentazione delle parti costitutive di un pannello sandwich.

Il comportamento strutturale è riconducibile a quello delle travi a doppia T, come evidenziato nella figura 2.2. Le superfici esterne forniscono rigidezza a flessione e sopportano gli sforzi indotti dai momenti flettenti lavorando una in compressione, l'altra in tensione, come le flange della trave. L'anima garantisce una buona rigidezza a taglio del pannello (dato lo spessore esiguo degli strati esterni, questi tenderebbero a piegarsi) e mantiene le superfici esterne alla corretta distanza così da mantenere il momento d'inerzia della sezione complessiva. I vari strati solitamente sono tenuti insieme tramite l'utilizzo di colle.



Figura 2.2: Il comportamento strutturale di un pannello sandwich ricorda quello di una trave a doppia T.

È facile intuire il perché di un così crescente interesse rivolto a queste strutture osservando la figura 2.3, che riporta i risultati di una ricerca condotta sui pannelli a sandwich, nello specifico le relazioni fra il peso, la resistenza e la rigidezza a flessione, lo spessore del pannello. È evidente come il punto di forza siano la resistenza e la rigidezza a flessione in rapporto al peso, che rendono questi pannelli decisamente appetibili là dove è necessario alleggerire senza compromettere le prestazioni a flessione.

Ultimo ma non meno importante, i pannelli a sandwich rivestono un ruolo sempre più rilevante grazie alle loro caratteristiche termiche, aspetto cruciale, si pensi anche solo nell'edilizia moderna. Le cavità fra le due facce esterne lasciate dall'anima possono essere usate per ridurre la conducibilità termica del pannello [1].

2.2 Topologia del core

Le forme che può assumere il core del pannello sono molteplici ed ognuna presenta vantaggi e svantaggi. È necessario perciò fornire una classificazione esaustiva delle differenti possibilità e individuare quella più adatta alla costruzione di un pannello sandwich in vetro, che dovrà per

il suo utilizzo mantenere una buona trasparenza ed esporre all'utenza finale un core con una buona resa estetica.

Una prima macrodivisione distingue fra core omogenei e core non omogenei [2] [3]. Quest'ultima categoria può essere ulteriormente suddivisa a seconda del tipo di connessione fra core e strati esterni e del tipo di supporto che il primo fornisce ai secondi. Nei paragrafi che seguono verranno presentate e chiarite le differenze fra le diverse tipologie.



Figura 2.2: Proprietà meccaniche indicative di un pannello pieno e di due pannelli sandwich al variare dello spessore.

2.2.1 Core omogenei

Rientrano nella categoria i *foam cores*, cioè le schiume, che sono generalmente in materiale metallico (di solito alluminio) o polimerico (come il poliuretano). Le schiume possono esser a cella chiusa oppure a cella aperta; in questo caso si può parlare anche di spugne.



Figura 2.3: Ritagli di un pannello a base di schiuma metallica.

Questi tipi di core sono anche gli unici in grado di fornire un supporto omogeneo alle facce esterne ed una connessione fra i vari strati continua ed estesa a tutto il pannello, evitando picchi nello sforzo di taglio agente sul core e sul collante.

Nonostante presentino le caratteristiche meccaniche minori, sono alla base della teoria dei pannelli sandwich e i modelli analitici così come i paragoni fra differenti soluzioni vengono riportati al caso di un core equivalente omogeneo con connessione continua.

2.2.2 Core non omogenei

2.2.2.1 Supporto bidirezionale

Sono solitamente le geometrie a nido d'ape a garantire questo tipo di supporto. Le celle possono avere sezione esagonale, ma anche rettangolare o triangolare e risultano aperte solo nel senso dello spessore del pannello, come si può vedere nella figura 2.4. La forma delle celle ed il processo di produzione possono portare a prodotti con proprietà isotrope o anisotrope, ma si tratta di core che aumentano sensibilmente la rigidità complessiva del pannello, in particolare quella a taglio, con una quantità di materiale davvero esigua, anche se, a causa del ridotto spessore delle pareti, è necessario procedere ad un'accurata progettazione delle celle per evitare fenomeni di buckling.



Figura 2.4: Differenti tipi di core non omogenei a supporto bidirezionale.

2.2.2.2 Supporto monodirezionale

Rientrano in questo gruppo i core corrugati. Semplici da produrre, manifestano però un comportamento fortemente anisotropo con basse caratteristiche meccaniche nella direzione trasversale a quella di piega, al quale si può ovviare impilando core con corrugamenti in direzioni perpendicolari. Questa soluzione, però, porta ad un inevitabile aumento degli ingombri e del peso, oltre a richiedere uno strato aggiuntivo di interfaccia fra i core a contatto.

Le cavità possono essere sfruttate per creare dei veri e propri canali che si rivelano utili, per esempio, nello scambio di calore a flussi incrociati; per questo motivo i pannelli con core corrugati sono ampiamente utilizzati nella costruzione di edifici. Nella figura 2.5 sono mostrate le forme più comuni, con topologia triangolare, a diamante e la cosiddetta navtruss, caratterizzata da ampie superfici alla base e alla sommità che ne facilitano l'incollaggio, particolarmente usata in applicazioni edili e marine (di qui il prefisso "nav-").



Figura 2.5: Differenti tipi di core non omogenei a supporto monodirezionale.

2.2.2.3 Supporto "a zona"

Questa soluzione decisamente *sui generis* è ottenibile disponendo degli elementi di varie forme e materiali fra i due strati esterni. Il risultato è un pannello aperto su entrambi i lati, con buone superfici di appoggio e un'ottima trasparenza; la mancata interconnessione fra gli elementi del core e la tipologia stessa di supporto possono però portare a picchi nei valori di tensione e porre in condizioni critiche sia le facce esterne sia gli elementi del core.



Figura 2.6: Due esempi di pannelli in vetro con supporto a zona ([4], [5]). La resa estetica di un pannello trasparente può risultare assolutamente affascinante.

2.2.2.4 Supporto puntuale

Si tratta della topologia più recente, nella quale il core è costituito da una travatura i cui elementi si uniscono, generalmente, nei punti di supporto. Gli elementi sono possibilmente snelli, con sezioni che possono assumere diverse forme e che possono cambiare di dimensione anche all'interno dello stesso elemento. Questa soluzione è attualmente la migliore se si cerca una buona trasparenza del pannello senza comprometterne le caratteristiche meccaniche e, siccome è la topologia che è stata prescelta per questo lavoro di tesi, verrà descritta più in dettaglio nel paragrafo dedicato (paragrafo 2.3).

2.2.2.5 Altre topologie

Rientrano in questa categoria le altre topologie che non possono essere classificate secondo i criteri di cui sopra, come quelle che assumono forme irregolari e che possono essere ottenute per esempio da processi di ottimizzazione della topologia, in sostanza apportando materiale là dove serve per sopportare gli sforzi e viceversa togliendolo, a seconda di quelle che sono le condizioni al contorno e di carico.



Figura 2.7: Esempio di un pannello di vetro con core con topologia ottimizzata [6].

2.3 Truss core

Come già accennato in precedenza, un truss core (dove "*truss*" = "travatura" e "*truss core*" = "core travato, core a travatura") è una topologia di core a supporto puntuale, di recente sviluppo ed è anche quella che è stata adottata in questo lavoro di tesi.

Permette al pannello di avere buona trasparenza, peso contenuto e delle caratteristiche meccaniche comunque rilevanti.

2.3.1 Space frame

Il truss core denota un comportamento riconducibile a quello di un telaio a traliccio tridimensionale (per comodità definito col suo corrispondente inglese *space frame*).

In uno space frame gli elementi si dispongono nello spazio secondo una configurazione precisa che si ripete identica in tutto il frame medesimo, cioè secondo una cella, e lavorano idealmente solo in tensione e compressione. I punti di connessione fra i vari elementi sono chiamati nodi e lavorano idealmente come cerniere. Un truss core ricorda uno space frame che si sviluppa prevalentemente su un piano, simile ad una griglia, in due direzioni fra loro perpendicolari. Ciò permette una più efficiente distribuzione dei carichi, come si può facilmente intuire dalla figura 2.8.



Figura 2.8: Rappresentazione di due space frame: connesso in una sola direzione (a), connesso in due direzioni (b).

Uno space frame è quindi efficiente a livello strutturale: generalmente è costituito da triangoli, forme in sé stabili; gli elementi tendono a non lavorare a taglio, che è fonte di criticità nei criteri di resistenza dei materiali; può ben adattarsi a diverse forme.

Anche un truss core, quindi, si sviluppa nello spazio per ripetizione di una struttura elementare i cui elementi lavorano prevalentemente in compressione e tensione. Se da un lato ciò rende più semplice comprendere e gestire il comportamento della travatura, dall'altra la produzione di un core di questo tipo richiede un'accurata progettazione ed una fabbricazione piuttosto laboriosa, spesso affidata a tecniche di fabbricazione additiva (vedi il capitolo 4).

2.3.2 Configurazioni

Il numero di configurazioni che una cella può assumere è vastissimo, alcuni degli esempi più noti sono riportati nella figura 2.9. Si ritrovano celle tetraedriche che uniscono 3 elementi in un nodo, celle piramidali che ne uniscono invece 4 ed infine le celle tipo Kagome, formate da coppie di tetraedri invertiti e ruotati fra di loro di 60°, uniti al vertice. Tutte queste configurazioni presentano buone caratteristiche di rigidezza e resistenza ed esistono già delle tecniche di produzione dedicate.

Fra le diverse configurazioni possibili, per il lavoro di tesi si è scelto un core piramidale poiché presenta una geometria semplice, completamente definibile con pochi parametri, ed offre il migliore compromesso in termini di resistenza, rigidezza e facilità di realizzazione del pannello [5].



Figura 2.9: Alcune delle più note configurazioni possibili di un truss core.

Capitolo 3

Vetro e vetro sottile

Come già accennato nell'introduzione, il vetro è un materiale di origini antiche che accompagna l'uomo da alcuni millenni, ma che solo in tempi relativamente recenti ha assunto un ruolo fondamentale e praticamente insostituibile nella nostra vita. Da un punto di vista prettamente strutturale, architettonico e dell'edilizia più in generale, un grande punto di svolta fu raggiunto negli anni '50 del '900, quando Sir Alastair Pilkington mise a punto il processo di fabbricazione del vetro float, detto anche processo Pilkington, per la produzione di lastre di vetro piano di alta qualità, dettando di fatto un nuovo standard mondiale, abbattendo i costi e permettendone un utilizzo sempre più massiccio nel campo delle costruzioni. Una tendenza che è tuttora in espansione.

3.1 Proprietà del vetro

3.1.1 Proprietà chimiche

Il vetro è il risultato della miscelazione ed in seguito fusione di sabbie e polveri di materiali eterogenei, che si solidificano in un solido amorfo, cioè privo di una struttura cristallina. L'assenza di quest'ultima non consente la formazione ed il movimento delle dislocazioni, conferendo al vetro un comportamento tipicamente fragile.

Il componente principale è la silice (diossido di silicio, SiO₂) che rappresenta l'ossido formatore di reticolo – anche detto "vetrificante" – alla base del vetro, con punto di fusione attorno ai 1600 °C. A questa vengono spesso aggiunte sostanze dette "fondenti" per abbassare il punto di fusione e migliorare la fluidità del vetro, come la soda (carbonato di sodio, Na₂CO₃) e la

potassa (carbonato di potassio, K_2CO_3), ma anche borati e nitrati. La presenza di soda rende il vetro solubile in acqua, ma a ciò si può ovviare aggiungendo alla miscela la calce (monossido di calcio, CaO).

Oltre a ciò, altre sostanze possono essere aggiunte; si tratta spesso di ossidi e sali che prendono il nome di "modificatori di reticolo", con funzioni di miglioramento delle proprietà meccaniche o della fluidità per esempio, e di "intermediari", con funzioni di stabilizzazione della struttura molecolare.



Figura 3.1: Struttura molecolare del vetro.

La miscela per l'elaborazione viene fusa a temperature di 1400 - 1800 °C, dipendendo il punto di fusione dalla composizione chimica. Il composto ottenuto viene poi fatto raffreddare lentamente, divenendo prima viscoso ed infine un solido con una struttura molecolare noncristallina fatta di atomi di silicio ed ossigeno ai quali si uniscono atomi di elementi alcalini come calcio e sodio, senza un ordine preciso, visibile nella figura 3.1. Questa mancanza di organizzazione conferisce però al vetro una delle sue qualità principali: la trasparenza.

I tipi di vetro più noti e adoperati nell'industria e nell'edilizia sono il vetro a base di silicato sodo-calcico (denominato d'ora in poi con la sigla "SLS" che deriva dall'inglese *Soda Lime Silicate [Glass]*), il vetro borosilicato (anche noto col nome commerciale di Pyrex[®], d'ora in poi "BS" da *Borosilicate [Glass]*) e il vetro alluminosilicato (d'ora in poi "AS" da *Aluminosilicate [Glass]*).

L'SLS è il tipo più diffuso, specialmente nell'edilizia: utilizzato nei processi di tipo float, ha costi di fabbricazione più bassi e costituisce da solo circa il 90% dell'intera produzione di vetro a livello mondiale.

Il BS presenta un coefficiente di dilatazione termica minore grazie alla presenza di ossido di boro nella composizione, ed ha quindi una migliore resistenza a fatica sotto carichi termici; per questo è adatto ad applicazioni antincendio e in generale dove è richiesta resistenza al calore, come in cucina. Dimostra anche una migliore resistenza all'attacco di soluzioni alcaline e di acidi.

L'AS si distingue per un alto punto di fusione dovuto all'allumina ed è anch'esso impiegato in applicazioni antincendio. Nonostante possa apparire simile al BS, ha una migliore stabilità chimica e si presta particolarmente bene ai processi di tempra chimica.

Nella tabella 3.1 si trovano le rispettive composizioni chimiche, mentre nella tabella 3.2 sono riportati indicativamente i componenti principali, le diverse caratteristiche che ne derivano e le possibili applicazioni dei tre tipi di vetro.

| | | SLS | BS | AS |
|-----------------|-------------------|-----|---------|----|
| Silice | SiO ₂ | 73 | 70 - 87 | 62 |
| Calce | CaO | 5 | / | 8 |
| Soda | Na ₂ O | 17 | 0 - 8 | 1 |
| Anidride borica | B_2O_3 | / | 7 - 15 | 5 |
| Magnesia | MgO | 4 | / | 7 |
| Allumina | Al_2O_3 | 1 | 0 - 8 | 17 |
| Altro | - | / | 0 - 8 | / |

Tabella 3.1: Composizione chimica dei vetri SLS, BS e AS.

| | Componenti principali | Resistenza a shock termico | Resistenza chimica | Applicazioni |
|-----|--|-------------------------------|-----------------------|---|
| SLS | SiO2 Na2O CaO | bassa | media | Contenitori per alimen- ti, finestre, vetri per lampadine |
| BS | SiO ₂ B ₂ O ₃ | medio-alta | alta | Dotazioni industriali, luci esterne, vetreria da cucina e da laboratorio |
| AS | SiO ₂ Al ₂ O ₃ | alta | alta | Utensili da cucina, vetroceramiche, resi- stori per circuiti e- lettrici |

Tabella 3.2: Proprietà e applicazioni dei vetri SLS, BS e AS.

3.1.2 Proprietà fisiche

Le proprietà fisiche ed in particolare le caratteristiche meccaniche del vetro dipendono fortemente dalla composizione chimica, dal processo di fabbricazione e dalle lavorazioni aggiuntive, ma anche dalla cura nel maneggiare e conservare i prodotti finiti. La tabella 3.3 permette un confronto di alcune di queste proprietà fra i vetri di tipo SLS e BS, un acciaio comune e il cemento.

| | | | SLS | BS | Acciaio | Cemento |
|--|----------------|-----------------------------------|-------|---------------|---------|---------------|
| Densità | ρ | kg/m ³ | 2500 | 2200 - 2500 | 7800 | 2400 |
| Modulo elastico | Ε | MPa | 70000 | 60000 - 70000 | 210000 | 30000 - 50000 |
| Modulo di Poisson | v | - | 0,23 | 0,2 | 0,3 | 0,1 - 0,2 |
| Durezza Knoop | HK | GPa | 6 | 4,5 - 5,5 | 5 - 8,5 | / |
| Coefficiente di dilatazione termica | α _T | 10 ⁻⁶ °C ⁻¹ | 9 | 3,1 - 6 | 30 - 50 | 36 |

Tabella 3.3: Confronto delle proprietà di vetro, acciaio e cemento.

Il vetro presenta un comportamento lineare elastico di tipo fragile: è in grado cioè di deformarsi solo elasticamente e, una volta raggiunto il carico di rottura, cede di schianto senza che si siano verificati fenomeni di snervamento. Ciò costituisce un alto fattore di rischio, soprattutto per un materiale da costruzione, e rende necessario adottare delle tecniche per aumentare il grado di sicurezza del vetro, come i trattamenti di tempra e la laminazione (descritte nei paragrafi 3.3.1 e 3.3.2).

La resistenza a trazione è potenzialmente altissima e dipende direttamente dalle elevate forze di legame covalente che si instaurano a livello molecolare nel tetraedro SiO₄; in condizioni di ottimo potrebbe arrivare fino a 8000 MPa [4]. Ciò tuttavia non può verificarsi: le necessarie lavorazioni subite dai manufatti di vetro, come il semplice taglio, ma anche solo la loro manipolazione, generano innumerevoli difetti e crepature, anche di dimensioni minime, ai cui apici le tensioni si concentrano e si accrescono, secondo quanto previsto dalla meccanica della frattura lineare elastica. In queste zone è molto più facile superare il carico di rottura e, data la marcata fragilità del vetro, i difetti si propagano istantaneamente e portano al cedimento improvviso del manufatto. La resistenza a trazione diminuisce perciò a 50 MPa e può considerarsi un "punto debole" del vetro.

Il modulo di Young del vetro corrisponde a circa un terzo di quello dell'acciaio, il che lo rende un materiale da costruzione decisamente performante in particolare se paragonato a legno e cemento. Allumina e anidride borica nella miscela di elaborazione tendono a farne aumentare il valore, mentre i metalli alcalini hanno effetto opposto.

Anche il coefficiente di Poisson dipende dalla composizione chimica e varia fra 0,23 - 0,26.



Figura 3.2: Prova di trazione del vetro, caratteristica elastica propria di un materiale fragile (a); prova di trazione dell'acciaio, caratteristica elastoplastica propria di un materiale duttile (b).

La caratteristica meccanica di rilievo del vetro è però la resistenza a compressione, che può arrivare fino a 150 MPa (ma in alcuni vetri alcalino-alluminosilicati trattati chimicamente si è misurato un carico di compressione residuo superficiale di ben 981 MPa [7]). Si tratta di uno dei migliori valori per un materiale da costruzione, tuttavia l'instaurarsi di picchi di tensione e di fenomeni di buckling – dovuti alle forme spesso sottili e snelle nelle quali è prodotto il vetro – rendono difficile sfruttarne tutto il potenziale. A questo si aggiunge la variabilità della resistenza in funzione delle condizioni superficiali, dello spessore e della distanza dal bordo; infatti si ha:

- superficie rigata: 100 MPa (lontano dai bordi);
- condizioni superficiali di fabbrica: 150 MPa (lontano dai bordi);
- resistenza di bordo: 20 80 MPa (in base a spessore, qualità...).

La densità dipende dalla temperatura del forno durante il processo di fabbricazione e dalla composizione chimica. Si colloca nell'intervallo 2200 - 2500 kg/m³ e non porta di conseguenza vantaggi nella riduzione del peso rispetto ad altri materiali – se si usano normali pannelli.

Le qualità di trasparenza e le possibilità che offre dai punti di vista architettonico, strutturale ed ingegneristico lo rendono però necessario nelle moderne costruzioni, ragion per cui sono in fase di sviluppo soluzioni per "alleggerirlo", come i pannelli sandwich su cui verte questa tesi.

La durezza è notevole: il vetro può essere tagliato solo con utensili appositi, per esempio in diamante, o tecniche particolari, come il taglio laser. Dipende dalla composizione chimica e sono comuni valori di durezza Knoop compresi nell'intervallo 4,5 - 6 GPa.

La resistenza chimica è eccellente ed è figlia anch'essa delle elevate forze di legame che si instaurano a livello molecolare nel materiale. Poche sostanze sono in grado di comprometterne l'integrità, come ad esempio l'acido fluoridrico, ma la resistenza può essere ulteriormente migliorata con l'aggiunta di prodotti intermediari alla miscela di elaborazione, per stabilizzarne la struttura molecolare (come l'anidride borica nei BS).

Il vetro è anche un buon isolante elettrico e isolatori in questo materiale sono comunemente usati in linee aeree di bassa, media e alta tensione. Per temperature maggiori di 800 °C diventa però conduttore.

Le proprietà ottiche sono uno degli aspetti di grande interesse per il vetro del mondo tecnicoscientifico attuale. Qualità fondamentale è la trasparenza: lunghezze d'onda nello spettro del visibile ($\lambda \approx 380 - 780$ nm) sono in grado di passare attraverso al materiale, in misura maggiore o minore a seconda dello spessore del pannello, della composizione chimica e dei rivestimenti applicati. Diversamente, la radiazione solare ultravioletta viene assorbita mentre le lunghezze d'onda nel campo dell'infrarosso tipicamente vengono riflesse (con tutti i risvolti sui costi energetici di un edificio che ciò comporta).

Fra le proprietà termiche, ricordiamo il coefficiente di dilatazione termica, che spazia in un range di 5.9×10^{-6} - 9×10^{-6} °C⁻¹. Sono valori piuttosto inusuali se paragonati a quelli di altri materiali strutturali con cui il vetro è combinato; ciò può tradursi in una criticità da non sottovalutare in fase di progettazione.

3.2 Prodotti in vetro

Diversi processi possono dare al vetro diverse forme e caratteristiche. Nella sezione verranno descritti i prodotti in vetro e i processi di fabbricazione industriale più importanti e diffusi.

3.2.1 Vetro piano

Il 90% della produzione mondiale di vetro piano è imputabile al metodo float (dall'inglese "*to float*" = "galleggiare"), sviluppato e lanciato commercialmente da Sir Alastair Pilkington negli anni '50 del '900 e divenuto di fatto lo standard per la fabbricazione di lastre piane. Può essere riassunto molto brevemente in 3 fasi: fusione a 1600 - 1800 °C; formatura a 800 - 1600 °C; raffreddamento a 100 - 800 °C.

Il successo del metodo si deve agli indiscutibili vantaggi che ha apportato: costi ridotti, ottima resa ottica del prodotto finale, con una qualità complessiva superiore e garantita, anche in caso di dimensioni ragguardevoli dei pannelli. Le dimensioni degli impianti di produzione sono impressionanti, arrivano ai 600 m di sviluppo, e la produzione non si interrompe mai, lavorando 24/7 tutto l'anno, poiché le operazioni di spegnimento e riaccensione di tutta la linea comporterebbero dei costi proibitivi.

Punto di partenza del processo sono ovviamente le materie prime che vengono pesate, miscelate e convogliate al bacino di fusione. A queste si aggiungono anche dei rottami di vetro, riciclando gli scarti di precedenti processi. La fusione della miscela avviene ad una temperatura attorno ai 1600 °C e il prodotto intermedio che si ottiene è già vetro, naturalmente fuso, che deve essere spurgato dalle bolle di gas al suo interno. Il fluido viene quindi colato senza soluzione di continuità su un letto di stagno fuso; in questa fase la temperatura scende da 1100 °C a ingresso vasca fino a 600 °C all'uscita. L'elevata densità dello stagno e l'ampio margine di temperature nel quale è allo stato liquido (230 - 2300 °C) lo rendono il materiale più adatto per il processo.



Figura 3.3: Processo di produzione del vetro float.

Queste operazioni di colata e successivo galleggiamento permettono al vetro di allargarsi in uno strato di spessore uniforme che può variare da 2 a 25 mm a seconda della velocità di estrazione dal bagno, governata dalle ruote dentate posti ai margini laterali del nastro di vetro e dai rulli a fine vasca, che lo trascinano. Le superfici esterne risultano perfettamente planari e parallele fra di loro.

Piccolo svantaggio di questa fase sono le differenze in composizione chimica fra la superficie a contatto con lo stagno e quella a contatto dell'atmosfera controllata che si traducono anche in una differenza di proprietà fisiche, come una minore resistenza della prima [8].

Successivamente la lastra entra in un forno di ricottura che permette un raffreddamento controllato da 600 a 100 °C, prevenendo l'insorgere di tensioni residue nel materiale che potrebbero anche causarne la rottura. I rulli utilizzati per la movimentazione in questa fase causano però una diminuzione della resistenza del prodotto [9]. All'uscita dal forno strumenti ottici verificano la presenza di difetti e imperfezioni e solo in seguito la lastra continua ottenuta, perfettamente trasparente, viene tagliata in pannelli di dimensioni standard 3,21 m \times 6 m che possono essere quindi immagazzinati e/o spediti.

3.2.2 Vetro colato

Si tratta di un metodo più antico di produzione che permette di realizzare sia pannelli piani di vetro – ma senza le stesse qualità di planarità, parallelismo fra le facce e di resa ottica del vetro float – sia manufatti con forme differenti, come profili ad U, tubi, aste e mattoni di vetro.



Figura 3.4: Processo di produzione del vetro colato.

Il vetro fuso colato dalla fornace viene immediatamente fatto passare fra due rulli per uniformarne lo spessore. È possibile incidere un motivo sui rulli e/o renderli non perfettamente cilindrici in modo che forma e disegno vengano riprodotti sulla lastra, la quale viene poi fatta

passare in un forno di ricottura che ne permette un raffreddamento lento e controllato e il rilascio di dannose tensioni residue.

Un prodotto particolarmente diffuso ottenuto con questa tecnica è il vetro retinato, dove due lastre di vetro colato vengono laminate allo stato ancora pastoso (vedi il paragrafo 3.3.2 per maggiori chiarimenti) insieme ad una rete metallica. Il risultato sono pannelli piani che permettono il passaggio della luce pur senza essere del tutto trasparenti. Sono spesso utilizzati per applicazioni antincendio e/o di sicurezza in generale poiché, in caso di rottura, la rete è in grado di trattenere i frammenti, anche se oggigiorno si tende a sostituirli con pannelli di vetro laminato che soddisfano maggiormente i requisiti di sicurezza.

Il processo consente di realizzare differenti profili dei manufatti in vetro aggiungendo altri rulli che vanno letteralmente a piegare la lastra prima che questa solidifichi. La forma più diffusa è quella a U, che trova impiego prevalentemente nelle vetrature di edifici ad uso industriale, ma è possibile ricavare anche tubi cavi con sezioni differenti.



Figura 3.5: Vetro retinato.



Figura 3.6: Tubi e profilati a U in vetro.

Anche la fabbricazione di mattoni pieni in vetro rientra nella categoria del vetro colato, ma il processo è differente. Il vetro fuso, ad una temperatura di 1200 °C, viene colato all'interno di

stampi in acciaio aperti che possono assumere varie forme. Si ha quindi un primo raffreddamento rapido a temperatura ambiente per due minuti circa; ciò evita la cristallizzazione del vetro all'interno del mattone e dona una perfetta trasparenza al prodotto finale che altrimenti risulterebbe decisamente opaco. Solo in seguito il manufatto viene tolto dagli stampi e trasferito nel forno di ricottura, dove permane per tre giorni e passa da 800 a 20 °C in maniera lenta e controllata (raffreddamento lento), così da eliminare eventuali tensioni residue e/o deformazioni.

I mattoni ottenuti, grazie alla grande resistenza a compressione del vetro, possono essere usati come veri e propri mattoni da costruzione, tenuti insieme tramite adesivi UV-indurenti, in grado di sopportare il peso proprio, quello di altre strutture sovrastanti e i carichi esterni, come potrebbe essere la spinta del vento. Ciò permette la realizzazione anche di intere pareti traslucide, come mostrato nella figura 3.8.



Figura 3.7: Mattoni in vetro di varie forme. La resa ottica, nonostante lo spessore, è ottima.



Figura 3.8: Crystal houses, Amsterdam.

È necessario, però, mantenere un rigoroso controllo dimensionale in fase di produzione: le discrepanze fra diversi mattoni usati insieme non devono superare i 0,25 mm, poiché ciò porterebbe a picchi di tensione estremamente pericolosi. Sono tuttora in fase di studio le ulteriori potenzialità di questi prodotti, così come le forme che possono esser loro conferite.

3.2.3 Vetro sottile e ultrasottile

Il vetro sottile ha acquisito grande popolarità grazie al suo uso intensivo come elemento di protezione dello schermo di dispositivi portatili, quali smartphone e tablet, ma date le sue caratteristiche e potenzialità ha catturato sempre più anche l'interesse dei mondi dell'architettura e dell'ingegneria strutturale.

Si tratta sostanzialmente di un vetro piano ottenuto con processi studiati *ad hoc* – la tecnica float classica difficilmente restituisce spessori inferiori a 2 mm – come l'*overflow fusion*, il metodo *down-draw* e particolari metodi di tipo float. Dati gli spessori davvero esigui, che possono arrivare all'ordine dei micrometri, per queste applicazioni si preferiscono vetri di tipo AS grazie alle loro qualità ottiche superiori e alla miglior condiscendenza al trattamento di tempra chimica.

Il processo di overflow (tradotto dall'inglese come "straripare, tracimare"), riportato schematicamente nella figura 3.9, è quello più diffuso. Il vetro fuso viene colato ininterrottamente in un canale di lunghezza limitata, aperto sul lato superiore. Una volta riempito, il vetro fluido straripa e si divide in due flussi che colano giù su entrambi i lati fino a ricongiungersi immediatamente sotto al canale, che è costruito con un profilo tale da facilitare quest'operazione. Il risultato è una lastra di vetro estremamente fine, liscia ed uniforme che viene tagliata una volta raggiunta la rigidezza necessaria.

Un'alternativa è rappresentata dal processo down-draw (letteralmente "tirare giù") sviluppato dalla Schott AG che ne detiene la proprietà esclusiva, riportato sempre nella figura 3.9. Sul fondo del bacino di raccolta del vetro fuso della fornace è ricavata una fessura lineare dalla quale il vetro esce già sotto forma di nastro e, immediatamente al di sotto, trova dei rulli che lo afferrano e lo tirano giù, appunto. In seguito, il nastro viene fatto passare in un forno di ricottura per un raffreddamento controllato e viene poi tagliato. Gli spessori ottenibili scendono fino all'ordine del micrometro.

L'ultima possibilità è data dal processo di tipo float sviluppato ed utilizzato esclusivamente dalla AGC. Non presenta in apparenza marcate differenze rispetto al processo Pilkington, ma consente spessori di 0,2 - 0,5 mm.

In questi ultimi due casi, con spessori che possono variare dal micrometro fino alla frazione di millimetro, si può parlare di "vetro ultrasottile".



Figura 3.9: I processi di overflow e di down-draw.

Come già accennato, il vetro sottile trova applicazioni non solo nei dispositivi elettronici – che da un lato ne hanno probabilmente accelerato lo sviluppo nei termini di una richiesta sempre maggiore di resistenza, spessore ridotto, resistenza ai graffi e qualità ottiche –, ma sta guadagnandosi anche un posto come materiale da costruzione innovativo ed è da tempo un supporto necessario e praticamente insostituibile per analisi chimiche e biologiche. Un esempio di utilizzo innovativo in campo architettonico del vetro sottile è mostrato nella seguente figura 3.10, paragonabile ad una nuova concezione di finestra:



Figura 3.10: "Adaptive thin glass façade - water and airtight boundary conditions" [10].

36
3.3 Trattamenti e lavorazioni secondarie

Dopo la fabbricazione nelle sue varie forme, è spesso necessario sottoporre il vetro piano a trattamenti e lavorazioni successive per poter avere, alla fine, dei prodotti conclusivi che incontrino le caratteristiche di forma, ottiche e meccaniche richieste ad un pannello di vetro, a seconda dell'utilizzo che ne verrà fatto. Rientrano in questo gruppo:

- *Il taglio*: per rimuovere i bordi danneggiati e ottenere la forma e le dimensioni desiderate.
- *Le lavorazioni di bordo*. Si hanno, con un grado di finitura crescente: smerigliatura, molatura, lucidatura. Permettono di smussare, arrotondare, eliminare il filo tagliente, rendere lisci e lucidi i bordi.
- La foratura.
- La curvatura. Può essere effettuata a caldo tramite stampi specifici in questo caso il pannello mantiene la curvatura – o a freddo per deformazione costante imposta da una struttura esterna al pannello – il pannello torna piano non appena viene rilasciato, ma presenta di solito migliori qualità ottiche.
- *L'applicazione di rivestimenti*. Ciò permette di conseguire caratteristiche di autopulenza, migliore idrorepellenza, diversa permeabilità alla radiazione solare, UV o a diversi colori...
- I trattamenti termici (di tempra o indurimento).
- *Heat Soak Test.* Il test si applica al vetro temprato e consente di portare preventivamente a rottura il pannello con inclusioni di solfuro di nichel (NiS) in fase di verifica anziché già in opera. Queste inclusioni si introducono nel vetro durante la fabbricazione, nel processo di tempra aumentano di volume e, a causa della velocità di raffreddamento, non sono in grado di tornare alle dimensioni iniziali, dando origine a pericolosi picchi di tensione.
- La laminazione. Dona ai pannelli nuove caratteristiche e/o migliora quelle esistenti.
- *Il vetrocamera*. Consente una migliore termoregolazione, il controllo delle proprietà acustiche e dell'irraggiamento solare in un ambiente chiuso.
- *Trattamenti superficiali vari*. Sono utilizzabili a fini decorativi, di privacy e per ottenere sfumature di luce e colore.

Di tutte queste tecniche introdotte verranno discusse più in profondità solo quelle più inerenti all'ambito della tesi – i pannelli di vetro sandwich – e quelle che danno come risultato finale un prodotto simile e concorrente, per applicazioni e caratteristiche.

3.3.1 Trattamenti termici di rinforzo

Le caratteristiche del vetro possono essere migliorate coi processi di tempra, in modo da rendere il materiale ed in particolare i pannelli con esso realizzati più adatti ad applicazioni strutturali. L'idea alla base del rinforzo consiste nell'indurre nei prodotti in vetro uno stato di tensione superficiale favorevole, cioè una compressione residua sulle facce esterne e di conseguenza uno stato di tensione all'interno. Ne deriva un duplice vantaggio: la parte interna è priva di difetti e può così opporsi con efficacia agli sforzi di tensione sotto carico; sulle facce esterne i difetti e le crepature, che sono invece inevitabili, non possono accrescersi poiché posti in compressione, anzi tendono addirittura a richiudersi.

Fin quando le tensioni superficiali indotte dai carichi esterni non riescono a prevalere sullo stato di compressione, la propagazione dei difetti non può avvenire. Tuttavia, è estremamente importante controllare che il difetto non riesca ad attraversare in profondità tutto lo strato di materiale in compressione, il che diminuisce l'efficacia del rafforzamento. La seguente figura 3.11 chiarisce quanto detto finora:



Figura 3.11: Rappresentazione della propagazione dei difetti in una lastra di vetro semplicemente ricotto e in una di vetro temprato.

Tali processi modificano anche lo schema di rottura dei pannelli, variando questo in funzione dell'energia immagazzinata nel materiale, in parte derivata dall'azione dei carichi e in parte direttamente dallo stato tensionale residuo che aumenta coi processi di rafforzamento.

3.3.1.1 Tempra termica

Per essere efficace, il trattamento termico di tempra necessita di uno spessore minimo dei pannelli di 4 mm; al di sotto non è possibile ottenere il raffreddamento differenziale fra materiale interno ed esterno che genera gli stress residui.

La tecnica consiste nel riscaldare il vetro in un forno fino alla sua temperatura di transizione solido - fluido viscoso, nel range 620 - 675 °C, e successivamente sottoporlo ad un brusco raffreddamento con getti di aria fredda. La velocità di esecuzione e la scarsa conducibilità termica del vetro consentono di solidificare inizialmente solo le facce esterne del pannello mentre l'interno rimane ancora allo stato viscoso, caldo e malleabile. La transizione di stato limitata alla sola superficie induce in essa una contrazione e solo in seguito anche l'interno si raffredda e solidifica, tendendo anch'esso a restringersi e di conseguenza portando in compressione le facce esterne che già erano solide, in trazione il materiale interno.

L'evoluzione del profilo di tensioni nel tempo è rappresentata nella figura 3.12.



Figura 3.12: Evoluzione del profilo di tensioni durante il processo di tempra termica.

Con la tempra termica si possono ottenere due differenti tipi di prodotto finale: il vetro temprato e il vetro indurito o semi-temprato, dove le differenze sono imputabili alla diversa velocità di raffreddamento e alla diversa intensità delle tensioni residue che ne consegue.

Nel vetro temprato lo strato in compressione ha uno spessore corrispondente ad almeno il 20% dello spessore totale del pannello, su entrambi i lati, come si può notare dalla figura 3.13. Inoltre, la resistenza meccanica e quella allo shock termico risultano decisamente maggiori.

In un vetro SLS lo sforzo di compressione residuo assume valori compresi fra 80 e 170 MPa. Ciò significa che l'energia immagazzinata nel componente sottoposto a tempra è estremamente elevata e lo schema di rottura si distingue per un gran numero di frammenti piccoli e relativamente innocui, quasi a granelli, adatto ad applicazioni di sicurezza. Com'è intuibile anche osservando la figura 3.14 (c), il vetro temprato offre però le più basse proprietà strutturali residue post-rottura.

Il vetro indurito o semi-temprato è prodotto con lo stesso processo, ma il raffreddamento è meno veloce. Le tensioni residue si collocano fra 40 e 80 MPa, l'energia immagazzinata è minore e lo schema di rottura si contraddistingue per dimensioni dei frammenti invece maggiori, a metà via fra un vetro semplicemente ricotto ed uno temprato, come mostra la figura 3.14 (b).



Figura 3.13: Spessore dello strato in compressione.



Figura 3.14: Schemi di rottura di lastre di vetro sottoposte a trattamenti diversi: a) ricotto; b) semi-temprato; c) temprato.

3.3.1.2 Tempra chimica

Lo scopo del processo di tempra chimica è il medesimo: indurre uno stato tensionale residuo favorevole nel componente in vetro, in tal caso attraverso uno scambio di ioni. Si tratta dell'unica alternativa di rinforzo quando gli spessori scendono sotto i 2,8 - 2,5 mm, come nei pannelli di vetro sottile e ultrasottile, per i quali la tempra termica non è più praticabile. Il vetro utilizzato deve presentare una composizione chimica favorevole al processo di scambio.

I pannelli vengono immersi in un bagno di sali di potassio fusi – di solito nitrati di potassio (KNO_3) – ad una temperatura maggiore o uguale di 380 °C e inferiore a quella di ricottura, attorno ai 600 °C. Gli ioni di sodio Na⁺ presenti nel vetro vengono quindi rimpiazzati dagli ioni di potassio K⁺ presenti nel bagno, ma date le loro dimensioni maggiori, questi ultimi si ritrovano ad essere "strizzati" all'interno della struttura molecolare del vetro, come evidenziato nella figura 3.15.



Figura 3.15: Processo di scambio degli ioni durante un trattamento di tempra chimica. Il vetro è rappresentato in blu.

I parametri che governano il processo sono la profondità di tempra e la compressione residua. Il primo corrisponde allo strato di vetro in cui si instaura lo stato di compressione residua e può misurare fra i 25 e i 100 μ m – molto minore rispetto a quello della tempra termica, ma per impedire l'apertura di cricche uno strato compreso fra 10 e 90 μ m è di solito sufficiente. Dipende da vari fattori come la composizione chimica sia del vetro sia del bagno, dalla temperatura e dalla durata del processo. Un vetro con una composizione chimica che lo predisponga maggiormente allo scambio di ioni permette di raggiungere profondità maggiori o diminuire i tempi di tempra o perfino entrambe le cose, ed è per questo che si preferiscono vetri di tipo AS o di tipo alcalino-AS, con i quali si può ottenere una profondità di 30 μ m in appena 6 ore rispetto alle 16 richieste da un vetro SLS.

Dagli stessi parametri dipende anche la compressione residua, parametro chiave, poiché da essa deriva anche la resistenza complessiva del pannello e la sua capacità di opporsi all'apertura dei difetti. Si possono raggiungere valori impressionanti, fino a 981 MPa [7], purché il materiale sia in grado di supportarli; anche in tal caso i vetri AS e alcalino-AS dimostrano di essere più performanti.

Lo schema di rottura di un pannello temprato chimicamente ricorda in misura maggiore quello di un vetro semplicemente ricotto: il trattamento coinvolge più che altro la superficie e i valori di compressione residua si mantengono alti solo per alcune decine di micrometri, massimo un centinaio, dalle facce esterne e decadono rapidamente. Non è pertanto necessario che si sviluppino grandi tensioni all'interno per compensare la compressione esterna e l'energia immagazzinata dal pannello è minore rispetto al caso della tempra termica. Ciò preclude al vetro temprato chimicamente le applicazioni di sicurezza.

La figura 3.16 aiuta a visualizzare quanto detto in merito a profondità di tempra, compressione residua e differenze fra una tempra chimica ed una termica.



Figura 3.16: Confronto fra profili di tensione residua, derivanti da un trattamento di tempra termica e da un trattamento di tempra chimica.

Il trattamento di tempra chimica è già comunemente usato nella produzione di pannelli sottili e ultrasottili di smartphone, tablet, notebook e smartwatch, solo per citarne alcuni. Un esempio piuttosto lampante e che moltissimi hanno avuto modo di toccare con mano è il Corning[®] Gorilla[®] Glass, brevetto della Corning Incorporated, sviluppato ormai in molteplici versioni dalle caratteristiche sempre migliori e che viene montato anche su smartphone di fascia medio-bassa – ma non è l'unico.

Nonostante ciò e nonostante sia stato oggetto di molti studi, il processo presenta ancora numerose incertezze, in particolare in condizioni di lavoro non standard. Le criticità maggiori si riscontrano nel comportamento a fatica, nella diminuzione e nell'incertezza dei valori del campo di tensioni residue in seguito a carichi di lungo periodo. Si prospettano indispensabili ulteriori ricerche, specialmente in previsione di un maggiore utilizzo del vetro come materiale strutturale.

3.3.2 Laminazione

Nella tecnica di laminazione due o più pannelli di vetro vengono uniti insieme, infrapponendo fra di essi uno strato intermedio solitamente di materiale polimerico trasparente, come schematizzato nella figura 3.17. Il processo è eseguito in un'autoclave, dove i componenti vengono assemblati ad una temperatura di 140 °C, con una pressione di 14 bar. L'obiettivo della laminazione è creare un pannello multistrato che possa assicurare un migliore e più sicuro

comportamento post-rottura, oppure soddisfare requisiti di resistenza a impatto e al fuoco o di isolamento acustico; in taluni casi, anche aumentare lo spessore del pannello finale diminuendo la quantità di vetro.



Figura 3.17: Rappresentazione schematica del processo di laminazione.

In un pannello laminato è possibile mantenere una residua capacità strutturale anche quando uno (e in alcuni casi anche tutti) i pannelli di vetro di cui è composto si rompono, poiché lo strato intermedio è in grado di trattenere i frammenti che rimangono incollati ad esso. La capacità residua è funzione dello schema di rottura ed è proporzionale alla dimensione dei frammenti, come descritto nella figura 3.18:



Figura 3.18: Capacità strutturali residue di differenti pannelli laminati.

Il materiale più usato per gli strati intermedi è il polivinilbutirrale (PVB) che permette la creazione di fogli di appena 0,38 mm di spessore, solitamente impilati a due o a quattro per ottenere degli strati spessi rispettivamente 0,76 e 1,52 mm; in alcuni casi si può arrivare fino a sei fogli, compensando eventuali difformità fra i pannelli di vetro che unisce. È poco permeabile ai raggi UV e può essere usato per realizzare pannelli protettivi in tal senso.

A causa della sua natura viscoelastica, le caratteristiche meccaniche dipendono dalla durata dei carichi applicati e dalla temperatura dell'ambiente in cui opera. A 20 °C, temperatura

ambiente, il PVB è estremamente deformabile e la rottura avviene dopo un allungamento di almeno il 200%. Diversamente, per temperature ben al di sotto di 0 °C, si dimostra piuttosto rigido se sottoposto a carichi di breve periodo ed è in grado di trasferire gli sforzi di taglio fra i pannelli di vetro. La differenza di comportamento è marcata, per di più fra due estremi di temperatura che in un clima temperato possono manifestarsi nel corso dell'anno, e richiede un'attenta progettazione degli elementi laminati, in particolar modo se le condizioni di lavoro prevedono carichi di lungo periodo ad alte temperature, fattori che maggiormente incidono sul comportamento viscoso del PVB.

Di recente sono stati sviluppati nuovi materiali per strati intermedi con l'intento di aumentare la rigidezza, la resistenza a trazione e a taglio e diminuire la dipendenza dalla temperatura. Un esempio noto è il SentryGlas[®] della DuPont, che presenta una rigidezza tanto elevata da renderne talvolta difficile la laminazione. Rispetto ad uno strato in PVB, col SentryGlas[®] si ottengono una resistenza fino a cinque volte maggiore ed una rigidezza fino a cento volte più grande; inoltre, le proprietà meccaniche non decadono (o decadono molto lentamente) nel tempo. Anche la trasparenza risulta migliore.

La figura 3.19 è esemplificativa del divario in rigidezza che corre fra i due materiali.

Da un punto di vista strutturale, il vetro laminato può comportarsi come un pannello di pezzo, come due lastre separate e impilate oppure può esibire un comportamento a metà via fra questi.

Secondo alcuni studi condotti su pannelli laminati sottoposti ad una flessione a 4 punti [11], lo spessore ed il modulo elastico dello strato intermedio sono i parametri più importanti nel determinare il comportamento complessivo del pannello. Tendenzialmente, maggiori sono i valori che assumono, minore è la deflessione dell'intero pannello, anche se in caso di carichi uniformemente distribuiti il comportamento ha più probabilità di assomigliare a quello di due pannelli di vetro semplicemente sovrapposti. Anche la posizione dello strato intermedio all'interno del pannello ne influenza la risposta: se frapposto a due lastre di vetro simmetriche, in flessione si troverà sul piano neutro e sarà sottoposto a soli sforzi di taglio. In tal caso anche il suo modulo a taglio risulta determinante e maggiori sono i valori che assume, minore è la deflessione fra gli strati regga. Diversamente, lo strato intermedio è sottoposto anche a tensioni di flessione che ne pregiudicano la portanza del carico.

La figura 3.20 rappresenta il comportamento di tre pannelli laminati e connessi rispettivamente in modo debole, flessibile e rigido.



Figura 3.19: Differenza di rigidezza fra due pannelli frantumati, uno laminato con il SentryGlas[®] (a sinistra) e uno con il PVB.



Figura 3.20: Risposta meccanica del vetro laminato in cui i pannelli di vetro presentano (dall'alto verso il basso): una connessione debole (o assente); una connessione flessibile; una connessione rigida.

Il vetro laminato è utilizzato per applicazioni di sicurezza solo se gli strati intermedi possono assicurare la perfetta adesione dei pannelli e sono in grado di trattenere i frammenti post-rottura. Con queste premesse, gli elementi laminati dimostrano un notevole miglioramento rispetto ad un corrispettivo monostrato.

I vantaggi coinvolgono anche il campo strutturale: nel caso che uno strato in vetro si rompa, quello (o quelli) intatto insieme allo strato (o agli strati) intermedio possono essere ancora in grado di reggere il carico. Anche in questo frangente la resistenza complessiva è funzione dello spessore e della rigidezza dello strato intermedio, mentre la portanza del carico dipende principalmente dai pannelli in vetro sia integri sia rotti. Questi ultimi possono dare un contributo residuo, funzione dello schema di rottura, che è opportuno tenere in considerazione in fase di progettazione. Maggiori sono le dimensioni dei frammenti, migliore è il comportamento meccanico post-rottura: un laminato rotto in vetro ricotto sarà più performante di uno in vetro temprato, che tenderà invece ad afflosciarsi.

La figura 3.21 sotto riportata riassume in tre fasi il comportamento meccanico di un pannello laminato in cui gli strati in vetro cedono o hanno ceduto. Inizialmente tutti i componenti sono integri e lavorano insieme sotto l'azione di un carico di flessione; in un secondo momento il pannello inferiore cede e tutto il carico si riversa sul pannello superiore; nello stadio finale anche il pannello superiore si è rotto, le tensioni si scaricano nello strato intermedio, ma il pannello ha ancora una residua portanza grazie ai frammenti che si incastrano e puntellano fra di loro. In ogni caso, è opportuno evitare la rottura degli strati in vetro poiché può portare al distacco dei frammenti, con conseguente pericolo per le persone.



Figura 3.21: Stadi di rottura del vetro laminato.

3.3.3 Vetrocamera

Spesso anche definito vetro doppio o vetro isolante, il vetrocamera è realizzato con due o più pannelli di vetro che racchiudono fra loro uno spazio sigillato ermeticamente, il cui scopo principale è l'isolamento termico.

L'intercapedine è formata dalle lastre di vetro, distanziate da dei separatori, e può essere riempita con aria disidratata o altri gas come l'argon per diminuire ulteriormente la trasmissione di calore. Per impedire l'entrata di vapore acqueo, fra i pannelli e i separatori vengono applicate colle e tenute che hanno anche lo scopo di conferire solidità alla composizione. Nei separatori, inoltre, si hanno sostanze esiccanti per assorbire l'eventuale umidità residua. Il processo di costruzione può essere manuale o automatizzato e prevede l'assemblaggio ed il passaggio del pannello-camera sotto una pressa apposita.

I materiali utilizzati, oltre al vetro, sono di solito metallici – come l'alluminio e l'acciaio inox – e materiali compositi. La distanza fra i pannelli di vetro tipicamente si colloca fra 6 e 16 mm. I vetro camera attuali hanno coefficienti di trasmissione del calore in grado di scendere a 1,1 W/m²K 46 con vetri doppi e fino a 0,7 W/m²K con vetri tripli. Tutte le tipologie di vetri descritti possono essere usate nella costruzione, dai semplicemente ricotti ai laminati, adattando il vetrocamera a differenti esigenze ed applicazioni.



Figura 3.22: Struttura del vetrocamera e rappresentazione delle modalità di trasmissione dell'energia.

3.3.4 Rivestimenti

I rivestimenti sono utilizzati per migliorare le proprietà ottiche, termiche ed elettriche delle lastre di vetro. Il trattamento può coinvolgere una o entrambe le facce del pannello, anche adoperando rivestimenti diversi su superfici opposte. Vengono distinti in due gruppi in base al metodo di applicazione al vetro e alle caratteristiche che ne conseguono: i rivestimenti pirolitici (spesso definiti *hard coatings*, secondo la nomenclatura inglese) e quelli magnetronici (*soft coatings*).

I primi vengono applicati con un processo di deposizione di vapori chimici (una miscela di gas) sulla superficie da trattare del vetro, riscaldata a 600 - 650 °C. L'alta temperatura dà luogo ad una reazione pirolitica, ovvero il riscaldamento, effettuato in condizioni anossiche, non può portare alla combustione, ma causa la decomposizione dei legami chimici del substrato in vetro e la formazione di nuovi legami fra le molecole del vetro e quelle della miscela. In questo modo il rivestimento è saldamente attaccato alla superficie. Le alte temperature richieste e la necessità di avere un'atmosfera controllata fanno sì che questo trattamento venga espletato già nel forno di ricottura o come fase aggiuntiva del processo float. Si possono applicare al massimo due strati, nei quali si depongono sostanze come metalli puri, ossidi o miscele di ossidi e nitrati. I rivestimenti ottenuti sono estremamente duri e resistenti: resistono ai graffi, alle flessioni e sono temprabili, anche se non sono così flessibili come quelli applicati post-processo.

Esiste anche un processo alternativo in cui il pannello viene immerso in una soluzione di materiali di rivestimento e solo in seguito riscaldato a 650 °C.

I rivestimenti magnetronici offrono maggiori varianti di processo: possono esser applicati tramite rivestimento per immersione o deposizione di vapori, ma la tecnica più diffusa è quella da cui il gruppo prende il nome.

Per spiegare brevemente il procedimento, si sappia che il magnetron è un tubo a vuoto a emissione termoelettronica che, collocato in un ambiente a bassissima pressione, è in grado di formare un plasma di elettroni e ioni del gas residuo presente nell'ambiente, di solito argon. Gli ioni del plasma vengono quindi letteralmente sparati fuori dal tubo e vanno a colpire gli atomi del materiale di rivestimento, con un'energia sufficiente a lanciare questi ultimi verso la superficie del pannello di vetro e a farli legare al materiale. I rivestimenti ottenuti sono qualitativamente eccellenti, garantiscono alte prestazioni e possono essere costituiti da molteplici strati anche di materiali differenti; vengono spesso impiegati per realizzare vetri basso-emissivi o per ridurre la trasmissione della luce. Dimostrano purtroppo poca resistenza agli ambienti aggressivi, come l'aria inquinata, e al danneggiamento meccanico, motivo per cui devono essere protetti con uno strato aggiuntivo o, per esempio, essere orientati verso l'intercapedine in un vetrocamera.



Figura 3.23: Il vetro riflettente è un tipico esempio di vetro con rivestimento magnetronico.

Capitolo 4

Fabbricazione additiva

La *fabbricazione additiva* (FA) è una tecnologia innovativa in grado di creare un oggetto di geometria comunque complessa, in poche ore e senza l'uso di utensili, apportando materiale anziché asportandolo da un grezzo di partenza, come invece accade nelle comuni lavorazioni di taglio, di asportazione di truciolo e simili. Nell'immaginario collettivo è conosciuta col nome di "stampa tridimensionale", ma si tratta di una definizione piuttosto grossolana e riduttiva, in quanto la stampa 3D rappresenta (e rievoca) soltanto una delle possibili tecniche utilizzate.

La base di partenza è il modello CAD dell'oggetto da produrre e del quale rappresenta quello che dovrebbe essere il risultato finale. Questo deve essere convertito in un file di formato standard, riconoscibile dai software di FA, e poi intersecato con piani paralleli uniformemente distanziati.

La macchina lavora direttamente coi dati delle sezioni ottenute, fabbricando l'oggetto come una serie di strati di spessore pari alla distanza fra i piani e forma pari a quella della sezione.

Il prodotto restituito dalla macchina è un'approssimazione del modello CAD ed è tanto migliore quanto più è piccolo lo spessore dello strato; spessori esigui, tuttavia, aumentano i tempi di fabbricazione e di conseguenza i costi.

Le tecniche della FA sono di recente introduzione, ma le possibilità di applicazione che offrono sono vaste e crescono sempre più man mano che i processi e le tecnologie vengono affinati, le dimensioni di produzione aumentano, nuovi materiali vengono adottati e quelli già in uso migliorati. La FA permette di realizzare, inoltre, forme e geometrie non ottenibili tramite le normali lavorazioni di asportazione di truciolo, e di ottenere fin da subito prodotti costituiti da materiali differenti.

4.1 Processo

È certo che il processo richieda un'ingegnerizzazione ed un adattamento al singolo caso più o meno rigorosi a seconda della complessità dell'oggetto da riprodurre, della tecnica di FA e dei materiali adottati, ma a titolo di chiarezza e brevità può essere riassunto in otto fasi principali.

1) Il modello CAD

Il primo passo è la definizione della forma dell'oggetto da produrre in un ambiente di progettazione assistita. Ciò può essere svolto con un qualsiasi software CAD, ma anche tramite metodi di *reverse engineering*, come il laser-scanning.

2) Conversione in formato .stl

Il modello così ottenuto, che è di tipo solido (tridimensionale), deve essere "svuotato" dei volumi interni e mutato in un modello di tipo *shell*, costituito dalle sole superfici esterne approssimate con una mesh triangolare. Ciò avviene convertendo il modello CAD in un file di formato .stl (*Standard Triangulation Language*) che è lo standard universale della FA.

3) Importazione e manipolazione del file stl

Per ottenere un buon risultato finale è molto spesso necessario intervenire sul file stl per facilitare la deposizione del materiale e adeguarlo alle capacità e criticità della macchina utilizzata. Sono operazioni comuni cambiare l'orientamento dell'oggetto nello spazio, aggiungere dei supporti per le parti a sbalzo e i sottosquadri, modificare le geometrie che la macchina non è in grado di riprodurre. Parte di queste procedure possono essere eseguite in automatico dal software dedicato della macchina.

4) Setup della macchina

Si tratta di una fase cruciale, nella quale bisogna tenere conto dei limiti fisici del processo e della macchina e considerare la fonte di energia adoperata nella stampa. Si esegue lo *slicing*, ovvero l'intersezione del modello in formato .stl con piani paralleli a distanza costante, da cui dipende lo spessore degli strati di deposizione. La qualità del prodotto finale sarà conseguenza principalmente di questa operazione, oltre che della velocità, delle temperature e di altri parametri di stampa.

5) Costruzione

Questa parte del processo è fortemente automatizzata, ma è comunque opportuna la supervisione da parte degli operatori per ridurre le possibilità di errori e anomalie o quantomeno ridurne le conseguenze. Le problematiche che si manifestano comprendono carenza di materiale d'apporto, arresto della macchina, errori del

software, ma più banalmente possono derivare anche da una cattiva progettazione in ambiente CAD.

6) Prelievo del pezzo

Il prelievo del pezzo dalla piattaforma di costruzione deve avvenire con le dovute cautele: è fondamentale aspettare che la temperatura dell'oggetto si sia abbassata a sufficienza, altrimenti si corre il rischio che il materiale sia ancora deformabile o non ben coeso, compromettendo tutta la fase di costruzione. I tempi di attesa variano a seconda del tipo di materiale e della tecnica di fabbricazione adottati; una volta trascorsi si può prelevare il pezzo e passare all'eventuale rimozione dei supporti e ad una prima fase di pulizia delle superfici, per esempio da bavure e altro materiale in eccesso.

7) Post-processo

Questo punto, non indispensabile se l'output di stampa soddisfa già le caratteristiche del prodotto finale, comprende ulteriori operazioni di pulizia, rifinitura con cartavetro, lucidatura, ma anche l'applicazione di rivestimenti e/o vernici.

8) Utilizzo / applicazione

Finalmente il prodotto è pronto per essere utilizzato. Nel caso venga assemblato insieme ad altri componenti, è importante ricordare che le parti ottenute dalla FA dimostrano molto spesso proprietà differenti rispetto a quelle ricavate con lavorazioni convenzionali. Tendono infatti ad esibire un comportamento di tipo ortotropico legato alla costruzione stratificata.

4.2 Tecniche di FA

La prima tecnica ad essere sviluppata è stata la stereolitografia (SLA); hanno fatto seguito molte altre che, seppur differenti, sono in qualche modo ricollegabili al principio di funzionamento della prima. Quasi tutti i metodi di stampa sono stati realizzati per materiali polimerici, ma alcuni impiegano anche materiali metallici e ceramici.

Nelle pagine che seguono verranno presentate alcune delle tecniche di fabbricazione additiva più note e rilevanti in campo industriale.



Figura 4.1: Fasi del processo di fabbricazione additiva.

4.2.1 Stereolitografia

I materiali di partenza della stereolitografia sono resine a base di fotopolimeri epossidici, acrilici e vinilici sensibili alla luce e nello specifico alla radiazione ultravioletta, in grado di solidificarsi una volta esposti ad essa. Queste vengono riversate in una vasca all'interno di un ambiente protetto dalla luce esterna che, a seconda delle dimensioni, può essere parte della macchina o essere ricavato in un locale apposito.

Al di sopra della vasca si trovano la sorgente di energia – tipicamente un laser – e un sistema di specchi mobili in grado di direzionare il fascio luminoso, che indurisce la resina localmente e costruisce sezione per sezione il pezzo. Si procede dal basso verso l'alto, ad ogni step la piattaforma di costruzione si abbassa di una quantità pari allo spessore di strato e permette a nuova resina liquida di ricoprire le parti già solidificate. Data la natura liquida del materiale di base, è opportuno diminuirne la viscosità scaldandolo ad una temperatura di 30 - 40 °C (temperature eccessive potrebbero degradarlo) ed è necessario costruire in contemporanea all'oggetto i supporti per sostenere eventuali parti a sbalzo e/o sottosquadri e separarlo dalla piattaforma, come si vede nella figura 4.2.



Figura 4.2: Componente realizzato con SLA; i supporti non sono ancora stati rimossi.

Al termine di questa fase, il prodotto viene prelevato, pulito dalla resina in eccesso e immesso in un forno a raggi ultravioletti per completare la solidificazione di tutte le parti. Solo in seguito si può procedere alla rimozione dei supporti e agli eventuali trattamenti di lisciatura, lucidatura e rivestimento delle superfici.

La SLA permette di creare strati da 150 fino a soli 25 µm di spessore e consente, fra tutte le tecniche, la migliore accuratezza nel riprodurre il modello 3D; tuttavia, i materiali utilizzati presentano caratteristiche meccaniche poco performanti rispetto a quelli delle altre tecniche e rimangono sensibili alla radiazione UV se non protetti da rivestimenti. La SLA, pertanto, è adatta alla fabbricazione di prototipi e non di pezzi definitivi.



Figura 4.3: Rappresentazione indicativa del processo di fabbricazione della SLA.

4.2.2 Sinterizzazione laser selettiva

La sinterizzazione laser selettiva (SLS) adotta un procedimento simile a quello della SLA, ma il materiale da costruzione assume la forma di polveri. Il nome stesso indica il concetto alla base della tecnica: "sinterizzare" significa ottenere dei prodotti compatti, di forma e dimensioni determinate e con caratteristiche fisiche prestabilite a partire da materiali polverulenti, solitamente tramite trattamenti termici e meccanici. Nel caso specifico della SLS, l'alta quantità di energia convogliata dal fascio luminoso del laser viene scaricata su una piccolissima quantità di materiale e la polvere fonde ad una temperatura minore di quella di fusione. Ciò rende possibile l'utilizzo di una più ampia gamma di materiali rispetto alla SLA: polveri a base di polimeri termoplastici, miscele metalliche e sabbie e polveri ceramiche. I pezzi ricavati possono essere considerati come definitivi, ad eccezione di quelli a base di metalli, catalogabili solo come prototipi.



Figura 4.4: Rappresentazione indicativa del processo di fabbricazione della SLS.

Come per la SLA, la produzione avanza per strati: terminata la sinterizzazione di uno di essi, la piattaforma di costruzione si abbassa e nuova polvere viene distribuita sulla sommità, pronta per la sinterizzazione dello strato successivo. La polvere interessata dal processo è esclusivamente quella necessaria a creare una parte dell'oggetto finale, tutto il resto funge da supporto durante la fase di lavoro e potrà essere raccolto e riutilizzato in seguito.

La camera di lavoro è mantenuta ad una temperatura immediatamente al di sotto di quella di sinterizzazione, così da diminuire l'energia richiesta per l'attivazione del processo, ma anche per migliorare la coesione fra i vari strati ed evitare la deformazione dei componenti prodotti a causa degli shock termici.

Con questa tecnica si possono ottenere spessori di parete di soli 0,8 mm, mentre lo spessore di strato si colloca attorno ai 100 µm.

4.2.3 Fused deposition modelling

Il *fused deposition modelling* (FDM) è una vera e propria tecnica additiva che permette la deposizione in strati del materiale sulla piattaforma di costruzione, senza andare a solidificarlo o fonderlo punto a punto da una massa preesistente. Ha il vantaggio di essere la tecnica più economica ed è anche per questo la più nota nell'immaginario comune.

Il materiale grezzo si presenta sotto forma di pellet, polveri o filamenti ed è raccolto in un contenitore o una bobina direttamente collegati ad una camera di fusione, nella quale la temperatura si attesta leggermente al di sopra di quella di fusione del materiale. A valle della camera si trova un ugello attraverso il quale il materiale viene estruso. Il software controlla i movimenti dell'ugello nello spazio ed è così possibile depositare il materiale nella forma preferita e creare uno strato che, solidificando, si legherà a quello precedentemente costruito. Per garantire una buona coesione è necessario mantenere la camera di costruzione ad una temperatura tale da impedire un raffreddamento troppo repentino del pezzo, il che comprometterebbe l'adesione fra strati.

Anche con questa tecnica sono necessari supporti per parti sporgenti, sottosquadri e grandi superfici prive di sostegni; vengono realizzati contemporaneamente all'oggetto e depositati da un altro ugello, sfruttando un materiale diverso, in modo da facilitarne la rimozione meccanica o chimica a bagno di solvente.



Figura 4.5: Rappresentazione indicativa del processo di fabbricazione del FDM.

La macchina costruisce dapprima i bordi esterni, con un certo spessore di parete, definendo le forme; in seguito le aree interne vengono "riempite" deponendo il materiale senza soluzione di continuità oppure organizzandolo in strutture reticolari più o meno fitte. Da questa distribuzione eterogenea deriva il comportamento anisotropo dei componenti realizzati tramite FDM: le caratteristiche meccaniche risultano decisamente migliori nella direzione trasversale ai piani di deposizione, mentre degradano via via che ci si pone parallelamente ad essi, dipendendo sempre più dall'adesione fra i differenti strati. Questo rappresenta un grosso limite e rende l'uso dei prodotti finali del FDM subordinato alla direzione di carico e particolarmente inadatto per applicazioni di carichi di lungo periodo.

4.2.4 3-dimensional printing

Il *3-dimensional printing* (3DP, letteralmente "stampa tridimensionale") può ricordare la comune stampa bidimensionale su fogli di carta se si considera ogni strato come un foglio sul quale si getta dell'inchiostro. Nello specifico, il "foglio" corrisponde ad un sottile strato di polvere – di solito gesso, amido, polveri o sabbie ceramiche – mentre l'"inchiostro" è un collante liquido, lasciato cadere dalla testina di stampa con gli scopi sia di aggregare la polvere e dare forma alla sezione corrente sia di incollare fra loro i vari strati. Concluso ciò, la piattaforma di costruzione si abbassa di una quantità pari allo spessore di strato, nuova polvere viene depositata e si può procedere con la sezione successiva. La massima risoluzione si attesta fra 90 e 100 μ m.



Figura 4.6: Rappresentazione indicativa del processo di fabbricazione del 3DP.

Come per la SLS, la polvere funge da supporto per il pezzo in produzione e l'eccesso viene rimosso in fase di post-processo tramite soffiatura o semplice spazzolatura; quella inutilizzata può essere recuperata e nuovamente adoperata.

L'oggetto prodotto risulta decisamente fragile e richiede infiltrazioni di ulteriore colla o di resina epossidica, oppure l'aggiunta di rivestimenti adesivi per consolidarlo e conferirgli maggiore rigidezza e compattezza o maggiore elasticità. Solo in seguito è possibile passare alla scartavetratura, alla lucidatura e/o alla verniciatura.

I vantaggi del 3DP sono la velocità nel realizzare i prodotti – che, però, non sono altro che dei modelli concettuali e non dei componenti finiti da mettere in opera – e la possibilità di colorarli, anche con molteplici tinte, grazie a degli ugelli appositi accoppiati a quelli del collante.

4.2.5 Polyjet

Le macchine di tipo *polyjet* producono i pezzi per mezzo di una particolare testina di stampa contenente una serie di ugelli e numerose lampade a ultravioletti. La testina è in grado di muoversi sulla direzione della lunghezza del piano di costruzione, mentre rispetto alla larghezza è ampia a sufficienza per ricoprirlo interamente. I materiali usati sono fotopolimeri ad alta viscosità, simili a quelli usati nella SLA, e gli inchiostri per colorarli.

Ogni corsa della testina di stampa consente la deposizione di un intero strato: gli ugelli lasciano cadere delle gocce di materiale ed eventualmente gli inchiostri sulla piattaforma di costruzione, riproducendo la sezione dell'oggetto; le lampade a ultravioletti provvedono poi alla loro solidificazione. Successivamente, la piattaforma si abbassa e si procede con la costruzione dello strato seguente. Non avendo altro materiale attorno al pezzo, i supporti per parti sporgenti, sottosquadri e pareti vengono fabbricati contemporaneamente al pezzo tramite appositi ugelli presenti nella medesima testina, con materiali differenti più teneri e/o solubili per facilitarne la rimozione.

La risoluzione dei sistemi di traslazione e deposizione permette spessori di strato di anche solo $16 - 30 \,\mu\text{m}$ e di conseguenza un'elevata qualità del prodotto di stampa, che richiede poche lavorazioni ulteriori, come nel caso della SLA.

Un grande vantaggio, esclusivo di questa tecnica, è la possibilità di fabbricare prodotti finiti costituiti da più materiali, per esempio con delle parti rigide connesse fra di loro da una giunzione flessibile in simil-gomma.



Figura 4.7: Rappresentazione indicativa del processo di fabbricazione del polyjet.

4.3 Materiali per la fabbricazione additiva

La fabbricazione additiva è un settore delle tecnologie di costruzione di recente creazione ed è in continuo sviluppo, con una forte tendenza a introdurre nuovi materiali e migliorare quelli già consolidati nei processi.

In campo strutturale si sono condotte delle esperienze interessanti con il vetro ed il cemento, ma l'impiego di questi materiali è ancora alle fasi preliminari di studio. Allo stato attuale, le materie plastiche sono i materiali da costruzione per antonomasia della FA, a cui si affiancano anche i materiali metallici e quelli ceramici. Le forme che possono assumere dipendono dalle esigenze della tecnica di fabbricazione: come già accennato in precedenza, troviamo polveri, fluidi più o meno viscosi, pellet o granuli e filamenti.

Le materie plastiche si suddividono in polimeri amorfi, polimeri semicristallini e plastiche termoindurenti. Differenti tecniche utilizzano differenti tipologie: i polimeri amorfi si presentano allo stato viscoso in un vasto range di temperature e questo li rende adatti a essere estrusi, come accade nella FDM; le plastiche termoindurenti e fotosensibili sono adatte per i processi di SLA e polyjet; i polimeri semicristallini trovano vasta applicazione nelle tecniche che sfruttano i materiali in polvere.

Nel campo dei metalli, i materiali più adatti risultano quelli impiegati nei processi di saldatura e di colata – o quelli da essi derivati – e si presentano in forma di polveri o filamenti. Risentono dei medesimi problemi legati agli shock termici, come deformazioni e tensioni localizzate, ai quali si può ovviare con strutture di sostegno in fase di fabbricazione e trattamenti termici consecutivi.

I materiali ceramici sono spesso usati sotto forma di polveri nei processi che usano un legante o la sinterizzazione per creare l'oggetto.

Ai fini del lavoro di tesi condotto, le materie plastiche assumono una particolare importanza. Il truss core intermedio dei pannelli sandwich di vetro viene molto spesso realizzato in materiale polimerico per mezzo della fabbricazione additiva. In fase di studio e progettazione, si è considerato come materiale costituente il polietilene tereftalato modificato con glicole o, abbreviato, il PET-G, che rappresenta un buon compromesso fra proprietà fisiche ed esigenze di processo. Infatti, presenta buone caratteristiche di resistenza pur rimanendo un materiale piuttosto duttile, assicura una buona traslucenza delle parti con esso realizzate e, in fase di fabbricazione additiva, si distingue per una buona adesione alla piattaforma di costruzione – aspetto che si rivela critico per altri materiali [12] – e una richiesta energetica minore, non necessitando di temperature di processo molto elevate. Ciò si traduce anche in una diminuzione dei costi.

Capitolo 5

Modellazione del composto vetro-polimero

Per il presente lavoro di tesi, lo studio del pannello sandwich è stato svolto avvalendosi di due differenti modelli, uno analitico e uno agli elementi finiti (o modello FEM), sottoposti alle medesime condizioni di vincolo e di carico. Gli scopi di quest'operazione consistevano essenzialmente nell'effettuare un confronto fra i risultati restituiti dall'uno e dall'altro ed in particolare capire l'affidabilità del modello analitico; l'affidabilità di quello FEM, invece, è stata valutata tramite una serie di analisi svolte direttamente su un gruppo di modelli agli elementi finiti di travi sandwich.

5.1 Composizione di base del pannello sandwich in vetro

| | Vetro | | PET-G | |
|-------------------------------|--------------------------|-------|----------------------|------|
| Modulo elastico | E _f (MPa) | 73000 | E _c (MPa) | 1940 |
| Modulo di resistenza a taglio | G _f (MPa) | 30000 | G _c (MPa) | 719 |
| Coefficiente di Poisson | v _f (-) | 0,22 | vc (-) | 0,35 |
| Densità | $\rho_{\rm f} (kg/m^3)$ | 2480 | $\rho_c (kg/m^3)$ | 1270 |

Tabella 5.1: Proprietà fisiche del vetro e del PET-G.

Ogni modello di pannello sandwich realizzato, sia analitico sia agli elementi finiti, consta della medesima composizione di base: due lastre di vetro esterne fra le quali viene interposto un truss core a celle piramidali con base quadrata in PET-G (polietilene tereftalato modificato con glicole). Nella tabella 5.1 sono brevemente riportate alcune proprietà fisiche dei due materiali in questione.

5.2 Nomenclatura dei pannelli sandwich

È indispensabile ai fini della chiarezza della trattazione comprendere la nomenclatura adottata nei modelli realizzati., a partire dalla distinzione fra travi e pannelli sandwich:

- Con il termine "trave sandwich" si intende un particolare pannello sandwich che soddisfa la relazione L/b ≥ 3 dove L e b sono, rispettivamente, la lunghezza e la larghezza della trave sandwich in questione; è vincolato sui soli lati più corti.
- Il termine "pannello sandwich" viene usato sia come nome generico sia per indicare veri e propri pannelli quadrati di lato "*L*", vincolati su tutti e quattro i bordi.

Figlio di questa distinzione è il sistema adottato per dare un nome ai differenti pannelli modellati nel corso dello studio; è in grado di fornire immediatamente tre informazioni:

"prefisso_N_L"

- Prefisso "s.b / s.p": il prefisso indica se ci si trova di fronte ad una trave sandwich (sandwich beam) o a un pannello sandwich (sandwich panel).
- Numero di cella "N": ogni pannello è realizzato con un truss core a celle piramidali a base quadrata. Queste si differenziano fra loro per il lato alla base e l'altezza della cella o l'angolo alla sommità ed assumono un differente nome dato dal numero di cella.
- Lunghezza "L" (mm): in fondo è riportata la lunghezza "L" della trave se si tratta di una trave sandwich o la lunghezza "L" del lato se si tratta di un pannello sandwich.
 Questa dimensione è sempre un multiplo intero del lato alla base della cella.

Perciò il nome "s.b_2_594" indica una trave sandwich, realizzata con la cella di tipo 2, lunga 594 mm, mentre con "s.p_4_1530" si intende un pannello sandwich di lato pari a 1530 mm, realizzato con la cella di tipo 4.

5.3 Modello analitico

Il modello analitico si basa su quella che è la teoria delle travi sandwich.

5.3.1 Teoria della trave sandwich

Si tratta della teoria di partenza, estratta dal libro "Analysis and design of structural sandwich panels" di Howard G. Allen [13], in base alla quale sono state svolte le prime analisi e da cui si è poi ricavato un modello analitico anche per i pannelli sandwich. La trattazione è limitata al caso di travi semplicemente appoggiate, che è la configurazione assunta dai modelli realizzati.



Figura 5.1: Trave sandwich e relativi parametri geometrici.

Le facce esterne devono essere in grado di sopportare gli sforzi dovuti al momento flettente lavorando sia in compressione sia in tensione, mentre lo strato intermedio – detto anche anima o core – ha il compito di aumentare il momento d'inerzia della sezione mantenendo le facce esterne ad una certa distanza.

Il materiale del core è decisamente meno resistente di quello o quelli delle facce, nondimeno deve essere sufficientemente rigido per trasferire il taglio da una superficie all'altra, impedendo uno scorrimento relativo fra di esse, e deve dimostrare una certa resistenza alla compressione senza andare incontro a rottura o fenomeni di buckling, mantenendo le facce il più planari possibile.

Oltre a questo, anche la connessione fra i vari strati, realizzata di solito con colle e adesivi, deve poter trasferire gli sforzi e impedire o ridurre possibilmente al minimo gli scorrimenti relativi.

Come si vede nella figura 5.1, la trave sandwich di lunghezza "L", larghezza "b" e spessore "h" è caratterizzata da due strati esterni sottili di spessore "t", separati da uno strato intermedio continuo ed omogeneo di spessore "c". Si operano alcune semplificazioni per rendere la trattazione più snella: gli strati sono fra loro perfettamente connessi e costituiti da materiali elastici ed isotropi, le deformazioni rimangono piccole se rapportate alle dimensioni della trave.

È possibile andare a definire la rigidezza a flessione "D" della trave come:

$$D = E_f \frac{bt^3}{6} + E_f \frac{btd^2}{2} + E_c \frac{bc^3}{12}$$
(5.1)

Dove E_f ed E_c sono, rispettivamente, il modulo elastico del materiale delle facce e quello del materiale del core, mentre d è la distanza delle facce dall'asse neutro della trave e corrisponde a (h + c)/2.

La rigidezza a taglio "AG" della trave è invece definita come:

$$AG = \frac{Gbd^2}{c} \tag{5.2}$$

Dove G è il modulo di resistenza a taglio del materiale del core.

Ulteriori semplificazioni sono consentite al verificarsi di alcune condizioni.

Nel calcolo della rigidezza flessionale, il primo termine legato al momento d'inerzia della sezione delle facce esterne può essere trascurato se:

$$\frac{d}{t} > 5,77\tag{5.3}$$

Cioè gli strati esterni rientrano nella condizione di facce sottili, il cui contributo locale di rigidezza a flessione può essere considerato trascurabile rispetto alla rigidezza a flessione complessiva risultante dell'intero pannello.

Similmente per il terzo termine se il materiale del core è considerabile molto meno resistente di quello delle facce; la condizione si verifica se:

$$\frac{E_f}{E_c} \frac{t}{c} \left(\frac{d}{c}\right)^2 > 16,7 \tag{5.4}$$

Le tensioni di taglio agenti nel core si possono considerare uniformi nella direzione dello spessore se:

$$\frac{E_f}{E_c} \frac{t}{c} \frac{d}{c} > 25 \tag{5.5}$$

Infine, la rigidezza a taglio può venire semplificata se si verifica la condizione di facce molto sottili, ovvero:

$$\frac{d}{t} > 100 \tag{5.6}$$

e allora

$$AG = Gbd \tag{5.7}$$

Di conseguenza, le tensioni agenti nelle facce esterne e nel core si calcolano:

• Se $-c/2 \le z \le c/2$:

$$\sigma_c = \frac{Mz}{D} E_c \tag{5.8}$$

• Altrimenti:

$$\sigma_f = \frac{Mz}{D} E_f \tag{5.9}$$

$$\tau = \frac{Q}{Db} \tag{5.10}$$

Dove $\sigma_c e \sigma_f$ sono le tensioni a flessione all'interno di, rispettivamente, core e facce, dovute al momento flettente esterno "*M*" agente sulla sezione considerata e calcolate alla quota "*z*".

Invece, τ è la tensione di taglio nel core dovuta alla forza di taglio "Q" nella sezione considerata ed è costante su ogni z se vale la condizione di cui sopra.

5.3.2 Comportamento strutturale

Si consideri una trave sandwich – per cui valgono le ipotesi riportate nel precedente paragrafo – semplicemente appoggiata e si considerino due condizioni di carico della medesima: un carico distribuito su tutta l'ampiezza della trave ed uno concentrato in mezzeria.

In caso di core 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 del core o della connessione tra facce e core dovuti a sforzi di taglio eccessivi. Inoltre, anche le deflessioni della trave devono essere limitate.

Se, invece, la trave non presenta un core né continuo né omogeneo, come un truss core, possono emergere nuove e peculiari criticità strutturali. Per esempio, sottoponendo la trave a taglio fino al cedimento della stessa, quest'ultimo potrebbe non verificarsi per cedimento a taglio del core: la travatura di un truss core è costituita da elementi fissati alle loro estremità che lavorano principalmente in tensione e in compressione, come schematizzato nella figura 5.2, e che potrebbero cedere secondo questo meccanismo invece che a taglio. Inoltre, bisogna prestare particolare attenzione anche ai fenomeni di buckling degli elementi e di wrinkling delle facce, che potrebbero innescarsi già prima del cedimento in tensione o compressione.



Figura 5.2: Rappresentazione indicativa del comportamento di un pannello sandwich sottoposto ad un carico distribuito.

5.3.2.1 Cedimento delle facce esterne

In caso di una trave semplicemente appoggiata, le tensioni massime all'interno delle facce si localizzano in corrispondenza della sezione di mezzeria, dove il valore di momento flettente è massimo:

$$M_{max} = \frac{PL^2}{8} = \frac{pL^2b}{8}$$
(5.11)

Dove p è il carico distribuito per unità di superficie (N/m²), mentre P è il carico distribuito per unità di lunghezza (N/m). Nella sezione considerata le tensioni valgono:

$$\sigma_{max} = \frac{pL^2}{8th} \le \sigma_{amm} \tag{5.12}$$

Dove σ_{amm} è il valore massimo di tensione ammissibile e dipende dal materiale costitutivo delle facce e dal coefficiente di sicurezza adottato; può assumere lo stesso valore in caso di tensioni positive o negative oppure essere differente.



Figura 5.3: Sforzo normale alla sezione delle facce esterne dovute a momento flettente.

5.3.2.2 Cedimento a taglio del core

La forza di taglio massima si localizza agli estremi della trave, in corrispondenza dei supporti.

$$V_{max} = \frac{PL}{2} = \frac{pLb}{2} \tag{5.13}$$

Lo sforzo di taglio massimo si ricava da:

$$\tau_{max} = \frac{pLb}{2bh} \le \tau_{amm} \tag{5.14}$$

Dove il valore di τ_{amm} è il minore fra quelli di sforzo di taglio ammissibile del core e del collante.

5.3.2.3 Deflessione massima

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:

$$\delta = \frac{5}{384} \frac{PL^4}{D} + \frac{PL^2}{8AG} \le \Delta_{max} \tag{5.15}$$

Dove Δ_{max} è la deflessione massima ammissibile e dipende solitamente dalla lunghezza del pannello; *D* e *AG* sono invece le rigidezze a flessione e taglio della trave sandwich, già precedentemente discusse.

5.3.2.4 Cedimento a trazione o in compressione degli elementi del truss core

Lo sforzo normale che porta allo snervamento simultaneo di tutti gli elementi di un truss core a celle piramidali è:

$$\sigma_{max} = \sigma_s \bar{\rho} \sin^2 \omega = \sigma_s \frac{\pi}{2} \frac{\sin \omega}{\cos^2 \omega} \frac{a^2}{L}$$
(5.16)

Dove σ_s è il carico di snervamento del materiale del core, $\overline{\rho}$ la densità relativa della cella base del truss core, ω l'angolo descritto dall'asse dell'elemento rispetto alla sua proiezione verticale.



Figura 5.4: Forze agenti sugli elementi del truss core dovute a forze di taglio.

5.3.2.5 Buckling degli elementi del truss core

Il buckling è un meccanismo di cedimento pericoloso poiché si verifica per valori di tensione rispetto ai quali gli elementi dovrebbero esibire un comportamento elastico e perché non è semplice conoscere il comportamento post-buckling dei medesimi elementi.

In prima analisi, il carico di buckling può essere valutato considerando i singoli elementi della travatura fissati alle estremità e caricati assialmente. Un calcolo più preciso tiene conto delle giunzioni fra gli elementi del truss core che ne riducono la lunghezza effettiva, ma sostanzialmente porta ad un aumento del valore di carico. Per conoscere quest'ultimo si adotta quindi la formula di Eulero:

$$P_E = \frac{\pi^2 E_c J}{l_0^2}$$
(5.17)

Dove l_0 è la lunghezza libera degli elementi.

Dalla formula si può ricavare anche il diametro minimo degli elementi, considerando che il momento d'inerzia di una sezione circolare è $J = \pi d^4/64$ e che idealmente $l_0 = l$:

$$P_E = \frac{\pi^3 E_c d^4}{64 l_0^2} \tag{5.18}$$

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E_c d^2}{16l_0^2} \tag{5.19}$$

Dove σ_E è la tensione di compressione che conduce a buckling ed è solitamente posta uguale al carico di snervamento " σ_s ", in modo che la sezione dell'elemento sia dimensionata sia a buckling sia a snervamento.

5.3.2.6 Wrinkling

Si tratta di un particolare caso di buckling che si verifica nelle facce e corrisponde ad un fenomeno di instabilità a lunghezza d'onda corta. Per un core isotropico, la tensione di compressione che causa il wrinkling è:

$$\sigma = B_1 E_f^{\frac{1}{3}} E_c^{\frac{2}{3}}$$
(5.20)

Dove B_1 è un coefficiente che può assumere diversi valori e dipende dal tipo di instabilità che si manifesta; le forme principali sono riportate nella figura 5.5.



Figura 5.5: Principali forme di wrinkling.

5.3.3 Truss core

Nel fornire le rigidezze a flessione e a taglio della trave, la teoria della trave sandwich considera le proprietà fisiche del core pari a quelle del materiale che lo costituisce. Ciò è vero, però, soltanto se il core è di tipo pieno, omogeneo e continuo.

Nel presente lavoro, tutti i pannelli e tutte le travi sandwich modellizzati sono stati ipotizzati con un core di tipo travato, cioè un truss core, che non è né continuo né omogeneo ed è anzi piuttosto vuoto. Si è reso necessario, perciò, andare a definire delle proprietà equivalenti per poter poi applicare la teoria della trave sandwich e costruire il modello analitico.

5.3.3.1 Densità relativa

Il parametro fondamentale che permette il passaggio dalle proprietà del materiale a quelle del core è la densità relativa, definita come rapporto fra il volume di materiale vero e proprio del core e l'intero volume compreso fra le due facce:

$$\bar{\rho} = V_{core} / V_{tot} \tag{5.21}$$

Secondo [2], [3], [14], tenendo conto della figura 5.6, per un core a cella piramidale con elementi a sezione circolare la densità relativa è restituita dalla formula:

$$\bar{\rho} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\cos^2 \omega \sin \omega} \left(\frac{d}{l}\right)^2 \tag{5.22}$$

Dove $d \in l$ sono rispettivamente il diametro e la lunghezza dell'elemento del truss core e ω l'angolo compreso fra l'asse dell'elemento e la sua proiezione verticale.



Figura 5.6: Geometria della cella piramidale.

5.3.3.2 Modulo elastico e modulo di resistenza a taglio equivalenti

Esistono quindi delle semplici formule analitiche che permettono di ricavare il modulo di resistenza normale, o modulo elastico, " E_{33} " e quello di resistenza a taglio " $G_{13} = G_{23}$ " di un ipotetico core pieno ed omogeneo equivalente al truss core. La geometria di riferimento è rappresentata nella figura 5.7: il modulo normale è ricavato ipotizzando di applicare una forza con sola componente " F_3 " al nodo d'apice "A"; quello di taglio si ottiene applicando la sola componente " F_1 " al medesimo nodo. L'equivalenza fra G_{13} e G_{23} deriva dalla simmetria delle forme – la cella piramidale, infatti, è a base quadrata – e dall'ipotesi di proprietà elastiche isotropiche.

Per un truss core a celle piramidali e, più nello specifico, per la cella stessa valgono le seguenti equivalenze:

$$E_{33} = E_S \,\bar{\rho} \sin^4 \omega = E_S \frac{\pi}{2} \frac{\sin^3 \omega}{\cos^2 \omega} \left(\frac{d}{l}\right)^2 \tag{5.23}$$

$$G_{13} = E_S \frac{\bar{\rho}}{8} \sin^2 2\omega = E_S \pi \sin \omega \left(\frac{d}{l}\right)^2$$
(5.24)

Dove E_s è il modulo di Young del materiale del core; gli altri parametri sono già stati introdotti.



Figura 5.7: Schema di applicazione delle forzanti per ottenere le proprietà equivalenti.

5.4 Modello FEM

Il modello FEM non necessita di proprietà equivalenti, gli elementi di cui è composto discretizzano e riproducono con un certo grado di approssimazione come il pannello si presenta nella realtà. Le caratteristiche di riferimento dei materiali sono perciò le medesime riportate nella tabella 5.1.

Per il calcolo agli elementi finiti si è adoperato il software Ansys[®] v.17.1, modalità *Mechanical APDL*, che sta per *Ansys Program Design Language*: ogni fase del lavoro – come la costruzione della geometria, la definizione degli elementi, delle proprietà, delle condizioni di vincolo e di carico e l'esecuzione dei calcoli – è stata implementata tramite la scrittura di un

codice letto poi dal programma. La parte più laboriosa della scrittura comprendeva la realizzazione della struttura del pannello per mezzo di punti, linee ed aree; col crescere delle dimensioni dei pannelli, questa parte è presto diventata ingestibile per una scrittura a mano, a meno di tempi lunghissimi, ed è stata automatizzata creando un piccolo compilatore con Matlab[®], in grado di restituire come output il listato della struttura una volta immesse le dimensioni caratteristiche della cella, cioè il lato alla base " b_t " e l'altezza " h_t ", e la larghezza "b" e la lunghezza "L" del pannello.

5.4.1 Discretizzazione

Ogni pannello sandwich è stato discretizzato come mostra la figura 5.8: prendendo una singola cella piramidale, entrambe le facce quadrate inferiore e superiore, corrispondenti a porzioni delle lastre in vetro del pannello, sono state divise a loro volta in quattro aree quadrate e quindi discretizzate come elementi di tipo *shell*. Le linee, che rappresentano il truss core, sono state discretizzate ognuna come un singolo elemento di tipo *beam*. Quindi, per ogni cella, si ritrovano 8 elementi shell e 4 elementi beam. In particolare, gli elementi specifici di Ansys[®] utilizzati nel modello sono:

- beam188: elemento a 2 nodi dotato di 6 gradi di libertà (gdl) per ogni nodo, 3 di traslazione e 3 di rotazione.
- shell181: elemento a 4 nodi con 6 gdl per nodo, 3 di traslazione e 3 di rotazione.

In definitiva, perciò, le lastre di vetro sono state discretizzate con elementi shell, il truss core con elementi beam.



Figura 5.8: Singola cella piramidale divisa in elementi.

In corrispondenza dei bordi vincolati si sono aggiunte delle aree di bordo, discretizzate anch'esse come elementi shell in vetro, con lo scopo sia di sostenere il vincolo, sia di rendere più rigido il bordo medesimo e cercare di mantenere, anche durante la deformazione dovuta all'applicazione del carico, la perpendicolarità fra il piano di bordo e le superfici delle lastre deformate.

In corrispondenza dei bordi non vincolati, per rendere più rigida la struttura, si sono aggiunte delle linee verticali discretizzate poi come elementi beam in PET-G.

Va detto che quest'ultima particolarità della struttura del modello FEM è stata applicata alle sole travi sandwich poiché i pannelli, essendo vincolati su tutti i bordi, risultano lateralmente chiusi da aree su tutto il perimetro, come si nota nelle figure 5.9, 5.10 e 5.11.



Figura 5.9: Trave sandwich s.b_2_726 (a) e relativo truss core (b) con particolarità dei vincoli sui soli lati corti.



Figura 5.10: Particolari di bordo: a sinistra uno spigolo della trave sandwich s.b_2_726, a destra uno spigolo del pannello sandwich s.p_2_594.


Figura 5.11: Pannello sandwich s.p_2_594 (a) e relativo truss core (b) con particolarità dei vincoli su tutto il perimetro.

5.4.2 Test del modello

L'affidabilità del modello FEM è stata valutata sulla base di tre test eseguiti su un gruppo di travi sandwich, semplicemente appoggiate sui lati corti e caricate in mezzeria con un carico lineare di 100 N.

Si è mantenuto sempre il medesimo tipo di cella 1 ($b_t = 22 \text{ mm}, h_t = 11 \text{ mm}$), mentre sono stati fatti variare i seguenti parametri:

• Spessore dei pannelli di vetro "*t*".

(mm)
$$\frac{t_1}{0,7}$$
 $\frac{t_2}{1,0}$ $\frac{t_3}{1,5}$ $\frac{t_4}{2,0}$

Tabella 5.2: Valori di spessore adottati nei test.

• Il diametro " d_t " degli elementi del truss core: $d_{t,1} = 3,0$ mm; $d_{t,2} = 3,5$ mm; $d_{t,3} = 4,0$ mm.

(mm)
$$\frac{d_{t,1}}{3,0} \quad \frac{d_{t,2}}{3,5} \quad \frac{d_{t,3}}{4,0}$$

Tabella 5.3: Valori di diametro degli elementi adottati nei test.

• Lunghezza "*L*" della trave.

(mm)
$$\frac{L_1 \qquad L_2 = 2 \times L_1 \qquad L_3 = 3 \times L_1 \qquad L_4 = 4 \times L_1 \qquad L_5 = 6 \times L_1 \qquad L_6 = 8 \times L_1}{176 \qquad 352 \qquad 528 \qquad 704 \qquad 1056 \qquad 1408}$$

 Tabella 5.4:
 Valori di lunghezza della trave adottati nei test.

Il numero "NDIV" di divisioni dei lati di ogni singola areola dei pannelli di vetro in fase di mesh (se NDIV =1, ogni areola dà origine ad un elemento shell; se NDIV =2, ogni lato è diviso per due e in ogni areola si generano 2×2=4 elementi shell):

$$\frac{NDIV_1 \quad NDIV_2 \quad NDIV_3}{2 \quad 4 \quad 8}$$

 Tabella 5.5:
 Valori del numero di divisioni adottati nei test.

5.4.2.1 Errore energetico

In un approccio agli elementi finiti, un sistema reale composto da elementi continui, costituiti cioè da un numero di punti infinito, viene costretto in un modello formato da elementi con un numero finito di punti "rilevanti", definiti nodi, dai quali dipendono gli spostamenti e le condizioni al contorno per tutto l'elemento e che obbediscono a quelle che sono le leggi della fisica. La perdita della continuità, tuttavia, costringe il sistema in una struttura più rigida di quella reale ed origina sempre un errore del modello FEM definito residuo, al quale l'errore energetico è direttamente proporzionale. L'errore energetico viene calcolato direttamente da Ansys[®] tramite esecuzione di un comando e, in sé, è associato alla discrepanza fra il campo di tensioni calcolato e il campo di tensioni complessivo reso continuo ed è espresso come una percentuale.

In definitiva analizzare l'errore energetico significa analizzare la bontà globale di una mesh ed è possibile diminuirlo aumentando il numero di nodi, ovvero *NDIV*, poiché maggiore è la quantità di nodi, più il modello si avvicina al sistema reale.

È emerso che in realtà l'errore migliora prevalentemente in base alla lunghezza della trave, come mostrato a titolo esemplificativo nella figura 5.12. Considerando un buon risultato un

errore percentuale che si collochi attorno o al di sotto del 10%, miglioramenti decisivi si hanno per valori di lunghezza da $4 \times L_1$ in su, mentre il parametro "*NDIV*" così come gli altri fattori in gioco risultano scarsamente decisivi. Si può dedurre che per lunghezze troppo ridotte il problema è mal condizionato.

5.4.2.2 Convergenza valori di tensione

Ad ogni prova del test si è estrapolato lo stato di tensione equivalente di un nodo posto sulla linea di mezzeria del pannello di vetro inferiore, in una zona con una deformazione rilevante. Scopo del test era individuare per quale *NDIV* le tensioni convergessero verso un valore asintoticamente stabile.

Nonostante per bassi *NDIV* la tensione equivalente fosse in alcuni casi leggermente sottostimata, la differenza risultava di pochi MPa e non è stata considerata una ragione rilevante per aumentare il numero di divisioni "*NDIV*" nei modelli definitivi. Si riportano nella figura 5.13 i risultati delle medesime travi già indicate nel paragrafo dell'errore energetico.

5.4.2.3 Convergenza valori di freccia

Il terzo ed ultimo test condotto aveva la stessa valenza del secondo, con la differenza che sono stati presi in esame gli spostamenti e non le tensioni di un nodo sulla linea di mezzeria del pannello inferiore. Le curve ottenute si sono rivelate praticamente tutte piatte, denotando così una convergenza già in essere (figura 5.14).



Figura 5.12: Andamento dell'errore percentuale in base a *NDIV* e *t* per s.b_1_528 (a) e per s.b_1_704 (b).

5.4.2.4 Conclusioni

I test sono stati condotti impiegando anche un elemento shell a 8 nodi per la mesh dei pannelli di vetro, ma ciò non ha portato né vantaggi rilevanti negli esiti dei controlli, che sono rimasti molto simili al caso dell'elemento shell a 4 nodi, né è stato in grado di risolvere le situazioni di problema mal condizionato.

Infine, si è optato per mantenere NDIV = 1: il parametro è risultato scarsamente incisivo nel miglioramento del modello, anzi ad ogni incremento delle divisioni è corrisposto un cospicuo aumento dei tempi macchina. Inoltre, la freccia dei pannelli – uno dei principali oggetti di analisi nel presente lavoro di tesi – si collocava su valori perfettamente stabili già per NDIV = 2 e, ponendo NDIV = 1, l'output non poteva sicuramente scostarsi di molto.



Figura 5.13: Andamento della tensione in base a *NDIV* e *t* per s.b_1_528 (a) e per s.b_1_704 (b).



Figura 5.14: Andamento della freccia in base a *NDIV* e *t* per s.b_1_528 (a) e per s.b_1_704 (b).

Capitolo 6

Analisi parametriche

Nel presente capitolo verrà esposto il corpo del lavoro, ovvero le analisi della freccia "w" di travi sandwich sottoposte ad un carico trasversale in mezzeria e di pannelli sandwich sottoposti ad un carico uniformemente distribuito, al variare di alcuni parametri come, per esempio, lo spessore dei pannelli di vetro e il diametro degli elementi del truss core. L'obiettivo è capire quanto questi parametri possano incidere sul comportamento complessivo della struttura a sandwich.

La freccia è stata calcolata servendosi sia del modello analitico (w_{an}) sia di quello FEM (w_{FE}), per ogni pannello ed ogni trave, ed i risultati sono stati poi confrontatati fra di loro.

6.1 Calcolo analitico della freccia

Per quanto riguarda il solo modello analitico di travi e pannelli la freccia è stata calcolata sulla base di tre casi:

- Empty core: si immagina che il pannello sandwich (genericamente inteso) non abbia alcun core, ma che le due lastre di vetro lavorino comunque insieme, mantenendosi sempre parallele e alla stessa distanza. La rigidezza a flessione del pannello si basa, quindi, esclusivamente sul primo termine di D (vedi la (5.1)), legato al modulo elastico del vetro e al momento di inerzia della sezione delle lastre.
- 2) *Full core*: il core del pannello sandwich è in questo caso in materiale solido, pieno, come se lo strato intermedio fosse formato da una mattonella di PET-G. Nella rigidezza a flessione rientrano ora tutti i tre termini di *D*, a meno di semplificazioni per la trascurabilità di alcuni di essi (come spiegato nel paragrafo 5.3.1). In particolare, il terzo dipende direttamente dal modulo elastico del materiale costitutivo del core.

3) *Truss core*: lo strato intermedio è una travatura in PET-G; la rigidezza a flessione si basa sì sui tre termini di *D*, a meno di semplificazioni, ma ora il terzo dipende indirettamente dalle proprietà del PET-G, dovendo considerare un materiale pieno ed omogeneo equivalente al truss core (come mostrato nel paragrafo 5.3.3.2).

La definizione di tre possibili condizioni ha avuto il solo scopo di verificare quelle che erano le aspettative, ovvero che la freccia calcolata dal caso 3) assumesse un valore compreso fra quelli ricavati dagli altri due, più precisamente maggiore del caso 2) e minore del caso 1).

È sufficiente sapere che l'esito è stato positivo, gli spostamenti permessi dal truss core si sono rivelati sempre un poco maggiori di quelli consentiti da un full core, mentre con un empty core il modello andava decisamente in crisi, restituendo dei valori di freccia impossibili, finanche maggiori della mezza lunghezza della trave o del lato del pannello. In un simile frangente, il pannello sandwich sarebbe stato semplicemente scalzato dai suoi supporti.

6.1.1 Calcolo della freccia – travi sandwich

Secondo il modello analitico, la freccia di una trave semplicemente appoggiata e sottoposta ad un carico in mezzeria può essere calcolata secondo la formula:

$$w_{an} = \frac{1}{48} \frac{FL^3}{D} + \frac{1}{4} \frac{FL}{AG}$$
(6.1)

Dove w_{an} è la freccia (analiticamente ottenuta), F è il carico applicato in mezzeria tale che F = 100N, L la lunghezza della trave, D e AG sono le rigidezze rispettivamente a flessione e a taglio della trave, come già discusse nel paragrafo 5.3.1; perciò il primo temine definisce la w_{fl} , ovvero la componente della freccia legata alla flessione, e il secondo la w_t , cioè quella legata al taglio. Come era prevedibile e come verrà evidenziato in seguito, la componente legata alla flessione diventa sempre più preponderante all'aumentare della lunghezza della trave.

In una struttura a sandwich il taglio viene trasmesso da una faccia all'altra per mezzo dello strato intermedio. Va da sé che non ha senso considerare, in mancanza di quest'ultimo, la seconda componente della freccia, come nel caso di empty core.

6.1.2 Calcolo della freccia – pannelli sandwich

La freccia di un pannello sandwich soggetto ad un carico uniformemente distribuito si calcola secondo la relazione:

$$w_{an} = \alpha \frac{qL^4}{D} \tag{6.2}$$

$$D = E_f \frac{t^3}{6(1-\nu_f^2)} + E_f \frac{td^2}{2(1-\nu_f^2)} + E_c \frac{c^3}{12(1-\nu_f^2)}$$
(6.3)

Dove q è il carico distribuito espresso come un valore di pressione ed è $q = 1 kN/m^2$; L è il lato del pannello che, essendo quadrato, è univoco.

D è la rigidezza a flessione indicata nella (6.3): l'espressione è derivata dalla rigidezza della trave sandwich (vedi la (5.1)), considerando una larghezza unitaria – ovvero b = 1 mm – ed introducendo il coefficiente di Poisson " v_f " per tenere conto dell'effetto della larghezza del pannello. Si è considerato il solo coefficiente relativo al vetro, anche nel terzo termine, poiché il comportamento del pannello sandwich sotto carico deriva in modo preponderante dalla risposta delle lastre esterne.

Infine, il coefficiente " α " dipende dal rapporto fra i due lati del pannello e per pannelli quadrati è $\alpha = 0,00406$:. Nel caso dei pannelli, perciò, non si considera una componente della freccia derivante dal taglio e il contributo del core, se rilevante, rientra esclusivamente nel calcolo della rigidezza "D".

6.2 Parametri delle analisi

I parametri variabili su cui si è intervenuti nello svolgimento delle analisi sono:

- t: lo spessore delle lastre di vetro (tabella 6.1).
- d_t : il diametro degli elementi del truss core (tabella 6.1).
- h_t : lo spessore del truss core, nonché altezza della cella (tabella 6.2).
- b_t : il lato alla base della cella (tabella 6.2).
- ω : l'angolo alla sommità della cella (tabella 6.2).
- *L* : la lunghezza della trave o il lato del pannello; nelle analisi questo parametro ha assunto differenti valori che verranno perciò riportati per ogni caso specifico.

I parametri legati alle celle ne rappresentano le dimensioni caratteristiche. Definire diversi valori dei primi porta a definire diverse celle, contraddistinte per comodità da un numero. Alcuni parametri sono legati fra di loro: se, per esempio, mantengo costante il valore di b_t e

vario h_t , è ovvio che ω cambierà di conseguenza e viceversa. Si riportano tuttavia tutte le dimensioni caratteristiche, anche se in relazione fra di loro.

| | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-------|------|-----|-----|-----|-----|
| t | (mm) | 0,7 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |
| d_t | (mm) | 3,0 | 3,5 | 4,0 | 5,0 |

Tabella 6.1: Variazione dei parametri $t e d_t$.

| Cella | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| \boldsymbol{b}_t | (mm) | 22,00 | 22,00 | 16,10 | 30,00 | 26,10 |
| h_t | (mm) | 11,00 | 15,00 | 11,00 | 15,00 | 15,00 |
| ω | (°) | 35,26 | 43,96 | 44,02 | 35,26 | 39,10 |

 Tabella 6.2:
 Dimensioni caratteristiche delle celle.

6.3 Analisi parametrica 1

La prima analisi parametrica è stata condotta su travi realizzate con la cella 1, variando i parametri t, d_t (in particolare solo $d_{t,1}$, $d_{t,2}$, $d_{t,3}$) ed L ed osservandone quindi l'effetto sul comportamento della trave sotto carico, oltre ad operare un confronto dello scostamento fra la soluzione FEM e quella analitica.

Le lunghezze e la larghezza della trave considerate sono riportate nella tabella 6.3.

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------------------|------|-----------|--------------------|--------------------|--------------|--------------------|-------------------|
| b | (mm) | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 |
| \boldsymbol{L} | (mm) | 176,0 | 352,0 | 528,0 | 704,0 | 1056,0 | 1048,0 |
| | | $(= L_1)$ | $(= 2 \times L_1)$ | $(= 3 \times L_1)$ | $(=4xL_{1})$ | $(= 6 \times L_1)$ | $(=8 \times L_1)$ |

 Tabella 6.3:
 Dimensioni delle travi, analisi parametrica 1.

Applicando la teoria della trave sandwich secondo quanto riportato nel paragrafo 5.1 ed operando, dove possibile, le opportune semplificazioni, è emerso che al variare di d_t il contributo del truss core nella rigidezza a flessione era sempre trascurabile e che, dei tre termini di D, quello legato al momento di trasporto d'inerzia della sezione dei pannelli di vetro era l'unico davvero rilevante. La variabilità di D è perciò risultata dipendente dal solo parametro t.

Nel calcolo della freccia della trave, però, rientra anche un contributo legato alla rigidezza a taglio: questa deriva direttamente dal modulo di resistenza a taglio equivalente del truss core ed ha evidenziato una variabilità legata a d_t , ma la componente della freccia ad essa legata diminuisce sensibilmente all'aumentare della lunghezza della stessa (vedi la figura 6.4) fino ad

essere praticamente nulla per L_5 ed L_6 . Da certi valori di lunghezza in su la freccia è perciò determinata dal solo comportamento a flessione della trave e dipende dalle caratteristiche dei pannelli di vetro, con l'azione del truss core che si limita a mantenere coesa la struttura.

Questo è reso particolarmente evidente dalla figura 6.1 che riporta l'andamento della freccia " w_{an} " sia mantenendo lo spessore delle lastre di vetro "t" costante e variando il diametro degli elementi del truss core " d_t ", sia il viceversa.



Figura 6.1: Andamenti di w_{an} in base a $d_t \in L$, $t = t_1$ (a); in base a $t \in L$, $d_t = d_{t,2}$ (b).

Il modello FEM dà un'ulteriore conferma, secondo quanto rappresenta la figura 6.2: le relazioni di dipendenza sono pari a quelle del modello analitico, anche se cambiano i valori della freccia che, nel caso della soluzione FEM, sono maggiori.



Figura 6.2: Andamenti di w_{FE} in base a d_t e L, $t = t_1$ (a); in base a t e L, $d_t = d_{t,2}$ (b).

Parallelamente, la soluzione analitica è stata messa a confronto con quella FEM: lo scarto fra le due è piuttosto rilevante, arrivando ad un minimo del 15-20 % circa e con un andamento che propende a stabilizzarsi su un asintoto. Si può dedurre che il modello analitico tende a sottostimare la freccia della trave, rendendola più rigida, specialmente per le lunghezze minori.

Le considerazioni possono trovare conferma nelle figure 6.3 e 6.4.



Figura 6.3: Andamenti dei rapporti w_{fl}/w_{an} , w_{FE}/w_{an} in base a $t \in L$; $d_t = d_{t,3}$.



Figura 6.4: Andamenti dei rapporti w_{fl}/w_{an} , w_{FE}/w_{an} in base a $d_t \in L$; $t = t_1$.

| Cella | | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------|------|--------|--------|--------|--------|
| b | (mm) | 176,0 | 176,0 | 177,1 | 180,0 |
| b/b_t | | 8 | 8 | 11 | 6 |
| L_1 | (mm) | 594,0 | 594,0 | 595,7 | 600,0 |
| L_1/b_t | | 27 | 27 | 37 | 20 |
| L_2 | (mm) | 726,0 | 726,0 | 724,5 | 720,0 |
| L_2/b_t | | 33 | 33 | 45 | 24 |
| L_3 | (mm) | 1078,0 | 1078,0 | 1078,7 | 1080,0 |
| L_3/b_t | | 49 | 49 | 67 | 36 |
| L_4 | (mm) | 1386,0 | 1386,0 | 1384,6 | 1380,0 |
| L_4/b_t | | 63 | 63 | 86 | 46 |

6.4 Analisi parametrica 2

 Tabella 6.4:
 Dimensioni delle travi, analisi parametrica 2.

Nella seconda analisi parametrica, molto simile alla prima, sono stati introdotti i due nuovi parametri h_t e ω (in realtà fra loro mutuamente dipendenti) – e quindi le celle 2, 3 e 4 – secondo la seguente logica:

- La cella 2 ha pari base della cella 1, ma una maggiore altezza: $b_{t,1} = b_{t,2}$, $h_{t,1} = 11$ mm, $h_{t,2} = 15$ mm.
- La cella 3 ha pari altezza della cella 1 e angolo alla sommità molto simile a quello della cella 2: h_{t,3} = h_{t,1}, ω₃ ≈ ω₂.

La cella 4 ha pari altezza della cella 2 e angolo alla sommità uguale a quello della cella
 1: h_{t,4} = h_{t,2}, ω₄ = ω₁.

Le dimensioni di lunghezza e larghezza delle travi utilizzate sono riportate nella tabella 6.4. Essendo queste dei multipli del lato alla base della cella, non è stato possibile definire dei valori univoci per tutte le diverse travi, ma si è cercato di contenere le differenze entro pochi millimetri.

Considerati gli elevati scostamenti nel calcolo della freccia dei modelli analitico e FEM per lunghezze ridotte della trave osservati nell'analisi parametrica 1, in questa analisi sono stati adottati valori di L dai 600 mm circa in su.

Nonostante l'introduzione di differenti tipi di celle con le relative proprietà equivalenti, la rigidezza a flessione della trave "*D*" è ancora determinata dal solo secondo termine, legato al momento di trasporto d'inerzia della sezione dei pannelli di vetro, e il contributo del truss core rimane irrilevante. Avendo quattro celle con spessori dello strato intermedio uguali a due a due ($h_{t,1} = h_{t,3}$, $h_{t,2} = h_{t,4}$), anche i quattro valori di *D* sono risultati praticamente uguali a due a due, con piccole variazioni dovute alle differenti larghezze delle travi, comunque trascurabili.

Dato che la deformazione è imputabile praticamente al solo comportamento a flessione della struttura – come compreso dall'analisi parametrica 1 – e secondo quanto scritto sopra, si possono capire gli andamenti della freccia della figura 6.5: sia il modello analitico sia il modello FEM restituiscono soluzioni che si sovrappongono o quasi laddove l'altezza " h_t " delle celle è la medesima.

Oltre a ciò, si può capire che, nel determinare la risposta della trave, la variazione dell'angolo " ω " è davvero poco determinante: nel modello analitico non ha conseguenze, in quello FEM l'effetto è davvero minimo e gli andamenti delle frecce, a parità di h_t , sono quasi i medesimi.



Figura 6.5: Andamenti di w_{an} e w_{FE} in base alla cella e a L; $t = t_1$, $d_t = d_{t_1, l_2}$.

Il modello analitico tende a sovrastimare l'effetto dell'allontanamento delle lastre di vetro nella struttura a sandwich: le travi realizzate con le celle 2 e 4 e quindi col truss core più spesso sono anche quelle per cui il rapporto w_{FE}/w_{an} risulta maggiore, come si può notare nelle figure 6.6 e 6.7.



Figura 6.6: Andamenti dei rapporti w_{fl}/w_{an} , w_{FE}/w_{an} in base a h_t , $t \in L$; $d_t = d_{t,1}$.

Sempre dalle figure 6.6 e 6.7 si può dedurre che, a parità di lunghezza e larghezza, la rigidezza della trave ottenuta analiticamente viene sovrastimata in maniera importante quando il truss core è meno fitto, ovvero l'angolo alla sommità " ω " è più piccolo e le celle risultano più aperte, come accade con la cella 4, per la quale lo scostamento fra soluzione analitica e soluzione FEM è considerevole. Anche confrontando le travi realizzate con le celle 1 e 3 che presentano una rigidezza "D" molto simile, si può notare come il rapporto w_{FE}/w_{an} si mantenga maggiore nel caso della cella 1 con $\omega_I = \omega_4$.



Figura 6.7: Andamenti dei rapporti w_{fl}/w_{an} , w_{FE}/w_{an} in base a h_t , $t \in L$; $d_t = d_{t,1}$.

Lo scarto fra le due soluzioni si accentua all'aumentare dello spessore dei pannelli di vetro, ma diminuisce con l'aumentare del diametro degli elementi truss del core, come si vede nelle figure 6.8 e 6.9. Questo può indicare che il modello analitico proposto dalla teoria della trave sandwich sia in grado di approssimare meglio la soluzione quando la densità relativa del core risulta maggiore, come accade con la cella 3, mentre nel caso in cui il materiale sia più rarefatto il modello tende ad essere poco affidabile. È anche necessario ricordare che, nel caso di un truss core, il modello lavora con proprietà dello strato intermedio equivalenti che costituiscono già di per sé un'approssimazione della realtà ed introducono un errore.



Figura 6.8: Andamenti dei rapporti w_{fl}/w_{an} , w_{FE}/w_{an} in base a d_t , $t \in L$.



Figura 6.9: Andamenti dei rapporti w_{fl}/w_{an} , w_{FE}/w_{an} in base a d_t , $t \in L$.

6.5 Analisi parametrica 3

La terza analisi parametrica intendeva individuare la lunghezza della trave "L" per la quale lo scostamento fra soluzione FEM e soluzione analitica si collocasse al di sotto di una soglia del 10%.

| Cella | | 2 | 4 | 5 |
|-----------|------|--------|--------|--------|
| b | (mm) | 176,0 | 180,0 | 182,7 |
| b/b_t | | 8 | 6 | 7 |
| L_1 | (mm) | 594,0 | 600,0 | 600,3 |
| L_1/b_t | | 27 | 20 | 23 |
| L_2 | (mm) | 726,0 | 720,0 | 730,8 |
| L_2/b_t | | 33 | 24 | 28 |
| L3 | (mm) | 1078,0 | 1080,0 | 1070,1 |
| L_3/b_t | | 49 | 36 | 41 |
| L_4 | (mm) | 1386,0 | 1380,0 | 1383,3 |
| L_4/b_t | | 63 | 46 | 53 |
| L_5 | (mm) | 1804,0 | 1800,0 | 1800,9 |
| L_5/b_t | | 82 | 60 | 69 |
| L_6 | (mm) | 2134,0 | 2130,0 | 2140,2 |
| L_6/b_t | | 97 | 71 | 82 |
| L_7 | (mm) | 2816,0 | 2820,0 | 2818,8 |
| L_7/b_t | | 128 | 94 | 108 |

 Tabella 6.5:
 Dimensioni delle travi, analisi parametrica 3.

Parallelamente alla fase di lavoro, sono stati definiti alcuni dei parametri caratteristici del pannello sandwich di vetro che saranno poi applicati nella realizzazione di un primo prototipo. Questi comprendono:

- Lo spessore delle lastre di vetro, fissato a $t = t_2 = 1$ mm.
- Lo spessore dello strato intermedio, ovvero del truss core, pari all'altezza di cella: $h_t = h_{t,2} = h_{t,4} = 15$ mm.

Questi due parametri, variabili nelle precedenti analisi, sono stati "congelati" e si sono mantenute le sole celle 2 e 4, alle quali è stata aggiunta la nuova cella 5, costruita secondo la seguente logica: la cella doveva presentare un'altezza $h_{t,5} = 15$ mm ed un angolo alla sommità " ω_5 " che si collocasse all'incirca a metà fra i valori di ω_2 e ω_4 , $\omega_2 < \omega_5 < \omega_4$. I parametri variabili sono perciò rimasti d_t (in particolare $d_{t,1}$, $d_{t,2}$, $d_{t,3}$, $d_{t,4}$), b_t , ω ed L.

Le dimensioni delle travi sono riportate nella tabella 6.5.



Figura 6.10: Andamenti dei rapporti w_{fl}/w_{an} , w_{FE}/w_{an} in base a d_t , $\omega \in L$.

L'ipotesi iniziale, poi non confermata, prevedeva che all'aumentare della lunghezza le travi avrebbero meglio soddisfatto la condizione di trave snella e che la soluzione del modello analitico sarebbe migliorata, diminuendo lo scarto da quella FEM. Nonostante le lunghezze prese in esame, decisamente importanti per alcuni valori (si pensi che per L_7 si hanno delle travi con larghezza attorno ai 20 cm e lunghezza di 3 m circa), lo scostamento si attesta, nel migliore dei casi, al 15% e il rapporto w_{FE}/w_{an} denota ormai una stabilizzazione su un asintoto, come visibile nella figura 6.10. Considerato questo e le lunghezze raggiunte, non si è ritenuto opportuno continuare oltre.

Come già si era notato nell'analisi parametrica 2, all'aumentare di d_t e di ω lo scarto fra i due modelli tende a diminuire.

È interessante notare come, per lunghezze rilevanti, il rapporto w_{FE}/w_{an} non evidenzi grosse diversità al variare dei parametri $d_t \in \omega$: in corrispondenza di L_7 rimane compreso fra 1,15 -

1,20 per tutte le travi, come se la geometria del truss core avesse uno scarso effetto nel determinarne il comportamento.

6.6 Analisi parametrica 4

La quarta analisi parametrica ha preso in esame non più le travi sandwich, bensì dei pannelli sandwich quadrati. Per le medesime ragioni spiegate nel precedente paragrafo 6.5, i parametri liberi sui quali si è intervenuti sono ω (o b_t), mantenendo le celle 2, 4 e 5, il diametro degli elementi del truss core (in particolare $d_{t,1}$, $d_{t,2}$, $d_{t,3}$, $d_{t,4}$) e la lunghezza "*L*", con la differenza che in questo caso rappresenta la lunghezza di tutti i lati del pannello (i valori sono riportati nella tabella 6.6).

| Cella | | 2 | 4 | 5 |
|-----------|------|--------|--------|--------|
| L_1 | (mm) | 308,0 | 300,0 | 313,2 |
| L_l/b_t | | 14 | 10 | 12 |
| L_2 | (mm) | 594,0 | 600,0 | 600,3 |
| L_2/b_t | | 27 | 20 | 23 |
| L_3 | (mm) | 814,0 | 810,0 | 809,1 |
| L_3/b_t | | 37 | 27 | 31 |
| L_4 | (mm) | 990,0 | 990,0 | 991,8 |
| L_4/b_t | | 45 | 33 | 38 |
| L_5 | (mm) | 1232,0 | 1230,0 | 1226,7 |
| L_5/b_t | | 56 | 41 | 47 |
| L_6 | (mm) | 1540,0 | 1530,0 | 1800,9 |
| L_6/b_t | | 70 | 51 | 59 |
| L_7 | (mm) | 1804,0 | 1800,0 | 1800,9 |
| L_7/b_t | | 82 | 60 | 69 |
| L_8 | (mm) | 2002,0 | 2010,0 | 2009,7 |
| L_8/b_t | | 91 | 67 | 77 |

Tabella 6.6: Dimensioni delle travi, analisi parametrica 4.

Nonostante una serie di condizioni differenti – la geometria, il modello analitico derivato da quello di una piastra, le condizioni di carico – il comportamento complessivo dei pannelli si è dimostrato coerente con quello delle travi prese in esame nelle analisi parametriche precedenti. La freccia non dimostra alcuna variabilità legata a ω né a d_t – e quindi all'utilizzo di celle differenti nella costruzione del truss core. La rigidezza del pannello, perciò, rimane connessa all'azione delle lastre di vetro, come evidenziano entrambi i modelli analitico e FEM nelle figure 6.11 e 6.12.

Per le lunghezze prese in esame, lo scostamento fra le soluzioni dei due modelli non scende al di sotto del 20% circa, similmente al caso delle travi, con un andamento del rapporto w_{FE} / w_{an} ormai quasi asintotico. Anche per i pannelli, lo scarto fra le due soluzioni diminuisce all'aumentare di ω e d_t (vedi la figura 6.13).



Figura 6.11: Andamenti di w_{an} e w_{FE} in base a d_t e a L; $t = t_2$, $\omega = \omega_5$.



Figura 6.12: Andamenti di w_{an} e w_{FE} in base a ω e a L; $t = t_2$, $d_t = d_{t,2}$.



Figura 6.13: Rapporto w_{FE}/w_{an} in base a *L*, $t = t_2$. $\omega = \omega_4$, $d_t = d_{t,l}(a)$; $\omega = \omega_2$, $d_t = d_{t,4}(b)$.

Capitolo 7

Analisi dei risultati e conclusioni

Come si vede dal capitolo 6, la maggior parte delle analisi condotte ha coinvolto delle travi sandwich, una scelta che ha dimostrato alcuni vantaggi diretti ed indiretti.

Vantaggio diretto, per esempio, è stato il notevole risparmio di tempo macchina speso nella realizzazione del modello FEM della trave, da parte del software Ansys[®], rispetto a quello impiegato per la costruzione dei pannelli. Ciò ha reso più semplice e veloce capire il peso che rivestono alcuni dei parametri geometrici della struttura nel determinarne il comportamento complessivo.

Altro vantaggio è stato dato dalla possibilità di confronto dei risultati fra due modelli differenti – nello specifico del caso analitico, uno legato alla teoria della trave e uno legato alla teoria delle piastre – che ha evidenziato la concordanza fra essi.

Il presente lavoro di tesi, tuttavia, si colloca in un filone di studi rivolto prevalentemente alla futura realizzazione di pannelli sandwich in vetro per applicazioni strutturali, come la realizzazione di facciate di edifici e di tettoie semitrasparenti, ed è per questo motivo che i risultati conclusivi derivano dagli esiti delle analisi svolte sui pannelli sandwich quadrati.

7.1 Grafico di progetto

L'analisi parametrica 4 ha fornito sufficienti dati per la costruzione di un grafico di progetto che, dati l'angolo alla sommità della cella e il diametro dell'elemento del truss core, indica la lunghezza massima che può assumere il lato del pannello sandwich in vetro.

7.1.1 Premessa

Il grafico si applica solo se vengono rispettate determinate condizioni che derivano dai parametri impostati in corso dell'analisi parametrica 4. Pertanto, è necessario ricordare che:

- a) Il pannello sandwich dev'essere quadrato, cioè le due dimensioni principali devono essere uguali fra loro.
- b) Le facce esterne del pannello sono costituite da due lastre in vetro o in un materiale dalle caratteristiche simili, di spessore $t = t_2 = 1$ mm.
- c) Lo strato intermedio deve essere un truss core a celle piramidali di spessore c = 15 mm, pari ai valori di altezza delle celle 2, 4 e 5 prese in esame nell'analisi parametrica 4 ($c = h_{t,2} = h_{t,4} = h_{t,5}$, vedi il paragrafo 6.6).
- d) Il truss core deve essere realizzato in PET-G o in un materiale dalle caratteristiche simili.

In merito alla voce d), visto quanto emerso e discusso nel capitolo 6 – cioè un'influenza piuttosto scarsa del truss core preso in considerazione nel determinare il comportamento complessivo della trave –, si può pensare che la condizione non sia così vincolante e che possa adattarsi a diversi materiali, purché esibiscano delle caratteristiche meccaniche molto minori rispetto al vetro (o al materiale costitutivo degli strati esterni), come succede col PET-G: $E_c \leq E_f$, $G_c \leq G_f$ (vedi la tabella 5.1).

7.1.2 Significato e individuazione della lunghezza massima

La lunghezza massima del lato del pannello – L_{max} – è definita come la massima dimensione di lato che il pannello, sottoposto alla condizione di carico più gravosa, può raggiungere affinché, in deformazione, venga rispettata la seguente condizione:

$$w < w_{lim} \tag{7.1}$$

Il secondo membro della disequazione (7.1) rappresenta la freccia limite che il pannello può assumere in fase di deformazione ed è stata posta pari al limite di deformabilità per coperture generiche, quindi un criterio decisamente restrittivo per pannelli destinati a facciate verticali:

$$w_{lim} = \frac{L}{250} \tag{7.2}$$

Anche la freccia limite, perciò, è funzione della lunghezza del lato.

La "condizione di carico più gravosa" è, nel nostro caso, il più grande valore che il carico uniformemente distribuito, cui il pannello è sottoposto, può assumere. Questo valore, espresso come pressione, è stabilito in base alle normative dedicate e a considerazioni di sicurezza.

Nell'ambito di una prima progettazione dei pannelli, si è deciso di porre $q = 1 kN/m^2$, corrispondente ad un carico distribuito generato dall'azione del vento sul pannello, ritenuto plausibile anche in seguito alla consultazione di [12], [15] e [16]. Il medesimo valore è già stato adottato, a ragione, durante le analisi parametriche (vedi il paragrafo 6.1.2).

Facendo riferimento ai valori della freccia dei pannelli forniti dal modello FEM, si è individuato per quali lunghezze *L*, dati ω (cioè la cella) e d_t , tali valori superavano la freccia limite, ovvero $w_{FE} > w_{lim}$, come si vede nella figura 7.1. L'esatto valore di lunghezza massima L_{max} per cui $w = w_{lim}$ è stato ottenuto per interpolazione lineare fra il primo valore per cui la freccia del modello FEM " w_{FE} " era maggiore di quella limite " w_{lim} " e, concordemente, l'ultimo per cui w_{FE} fosse minore di w_{lim} .



Figura 7.1: Andamenti di w_{FE} e w_{lim} in base a L; $t = t_2$, $d_t = d_{t,3}$, $\omega = \omega_5$.

7.1.3 Costruzione del grafico

I valori di L_{max} , specificati nella tabella 7.1, sono stati riportati sull'asse delle ordinate del grafico di progetto in funzione di ω (sull'asse delle ascisse) e di d_t (in corrispondenza delle diverse curve), come si vede nella figura 7.2. Anche da questo risultato conclusivo si nota come l'incidenza del truss core nel condizionare il comportamento complessivo del pannello sia davvero bassa: intervenendo sui due parametri liberi ω e d_t si va da un minimo $L_{max} = 1860$ mm

| fino ad un massimo L_{max} = 1999 mm., ovvero l'effetto del truss core | si esaurisce in poco più di |
|--|-----------------------------|
| 10 cm di lunghezza per pannelli con un lato di quasi 2 m. | |

| Cella | | 4 | 5 | 2 |
|-------------------------|------|-----------|-------|-------|
| ω | (°) | 32,26 | 39,10 | 43,96 |
| | | $d_{t,1}$ | | |
| L _{max} | (mm) | 1871 | 1907 | 1940 |
| | | $d_{t,2}$ | | |
| Lmax | (mm) | 1908 | 1937 | 1964 |
| | | $d_{t,3}$ | | |
| Lmax | (mm) | 1933 | 1957 | 1980 |
| | | $d_{t,4}$ | | |
| Lmax | (mm) | 1965 | 1982 | 1999 |

Tabella 7.1: Valori di lunghezza massima di lato dei pannelli per $t = t_2$.



Figura 7.2: Grafico di progetto: L_{max} in funzione di $\omega \in d_t$; $t = t_2$.

Adottando le medesime procedure descritte per la realizzazione del grafico nella figura 7.2, si è elaborato un ulteriore grafico di progetto, questa volta scegliendo lastre di vetro di spessore $t = t_1 = 0,7$ mm, con lo scopo di indagare quanto incidesse questo parametro sul comportamento complessivo del pannello.

Come si poteva facilmente supporre, il pannello è risultato meno rigido e il superamento della freccia limite, a parità di carico, è avvenuto per lunghezze di lato minori: nella tabella 7.2 si leggono valori di L_{max} più piccoli. Dalla figura 7.3 si nota che, anche con lastre di vetro più fini, il truss core resta poco determinante per il comportamento complessivo della struttura composita, provocando variazioni di L_{max} contenute di nuovo in un intervallo di 10 cm per lunghezze di lato sopra al metro e mezzo.

Diversamente, l'azione dello spessore "t" è più efficace: confrontando i due grafici, a parità di $d_t \in \omega$, il delta di L_{max} misura all'incirca 20 cm.

| Cella | | 4 | 5 | 2 |
|-------|------|-----------|-------|-------|
| ω | (°) | 32,26 | 39,10 | 43,96 |
| | | $d_{t,1}$ | | |
| Lmax | (mm) | 1656 | 1689 | 1716 |
| | | $d_{t,2}$ | | |
| Lmax | (mm) | 1687 | 1714 | 1736 |
| | | $d_{t,3}$ | | |
| Lmax | (mm) | 1708 | 1731 | 1749 |
| | | $d_{t,4}$ | | |
| Lmax | (mm) | 1735 | 1752 | 1766 |

Tabella 7.2: Valori di lunghezza massima di lato dei pannelli per $t = t_1$.



Figura 7.3: Grafico di progetto: L_{max} in funzione di ω e d_t ; $t = t_1$.

7.2 Tensioni e forze agenti nei pannelli

L'analisi delle tensioni presenti all'interno delle lastre di vetro, delle forze all'interfaccia vetro-polimero e delle forze assiali negli elementi del truss core è fondamentale per capire il grado di sfruttamento dei componenti e dei materiali costituenti dei pannelli, ma anche per avere un'idea dell'efficienza dell'intera struttura.

7.2.1 Tensioni nelle lastre di vetro

Le tensioni ricercate sono quelle principali, minima e massima, presenti nei nodi di metà spessore degli elementi shell. In particolare, si ha che:

- $\sigma_3 < 0$; $\sigma_{min} = \sigma_{3,min}$.
- $\sigma_1 > 0$; $\sigma_{max} = \sigma_{1,max}$.

I valori sono stati ottenuti tramite il software di calcolo agli elementi finiti Ansys[®], trovando la soluzione al problema statico impostato e richiedendo lo stato delle tensioni principali nel piano medio con un apposito comando. Ogni elemento shell viene integrato nella direzione dello spessore su tre nodi, per ogni angolo dell'elemento. Si hanno perciò tre gruppi di quattro nodi complanari, un gruppo giacente sulla superficie superiore, uno su quella inferiore ed uno a metà spessore, cioè distante t/2 da entrambe le superfici. L'insieme di tutti questi ultimi gruppi mediani costituisce il piano medio.

Per capire meglio i risultati presentati, è opportuno ricordare che il pannello sandwich è stato caricato da sotto, cioè il carico distribuito è stato applicato sulla lastra inferiore, spingendola verso l'alto nel verso delle *y* positive.



Figura 7.4: Andamenti dei valori minimo e massimo delle tensioni principali in base a *L* e d_t , lastra superiore (Sup.) e lastra inferiore (Inf.); $t = t_2$.

I dati individuati si riferiscono ad entrambe le lastre inferiore e superiore dei pannelli e, come si nota dalla figura 7.4, l'andamento delle tensioni tende ad essere lo stesso, ma rovesciato. Nella deformazione a flessione del pannello sandwich, la lastra inferiore viene a trovarsi dal lato della struttura che viene schiacciato ed infatti lo stato di compressione è più accentuato; in quello superiore, trovandosi sul lato teso in deformazione, è più forte la trazione. In valore assoluto, però, le tensioni praticamente si eguagliano e sono simmetriche rispetto all'asse delle ascisse.

Sempre dalla figura 7.4 si nota come il materiale esterno del pannello sandwich, il vetro, sia decisamente poco sfruttato: se la resistenza a trazione misura 50 MPa e quella a compressione 150 MPa in valore assoluto (vedi il paragrafo 3.1.2), i valori di $\sigma_{min} \approx -12,5$ MPa e di $\sigma_{max} \approx 12,5$ MPa sono decisamente lontani dagli estremi indicati.

Inoltre, anche in questo caso emerge come il truss core non sia determinante nel condizionare il comportamento del pannello: sia al variare di d_t (figura 7.4) sia al variare di ω (figura 7.5) le tensioni nei pannelli rimangono praticamente invariate.



Figura 7.5: Andamenti dei valori minimo e massimo delle tensioni principali in base a ω , lastra superiore (Sup.) e lastra inferiore (Inf.); $t = t_2$.

Le figure dalla 7.6 alla 7.9 mostrano la variazione delle tensioni principali nei pannelli di vetro superiore ed inferiore in corrispondenza del loro piano medio e confermano la simmetria dello stato tensionale.

Le immagini si riferiscono al pannello sandwich s.p_4_990 per $d_t = d_{t,1}$. Non sussistono sostanziali differenze al variare dei parametri del truss core, come in parte già evidenziato dai risultati sopra discussi, mentre al cambiare della lunghezza del lato del pannello, le tensioni variano in modulo secondo una proporzionalità diretta (lo si riscontra anche nelle figure 7.4 e 7.5), mentre la loro distribuzione rimane molto simile a quella qui rappresentata.



Figura 7.6: Andamento della tensione principale σ_1 , piano medio della lastra di vetro superiore del pannello s.p_4_990; $d_t = d_{t,1}$, $t = t_2$. I valori della legenda sono espressi in MPa.



-2.36132 -2.09895 -1.83659 -1.57422 -1.31185 -1.04948 -.787108 -.524739 -.262369 -.242E-09

Figura 7.7: Andamento della tensione principale σ_3 , piano medio della lastra di vetro superiore del pannello s.p_4_990; $d_t = d_{t,1}$, $t = t_2$. I valori della legenda sono espressi in MPa.



Figura 7.8: Andamento della tensione principale σ_1 , piano medio della lastra di vetro inferiore del pannello s.p_4_990; $d_t = d_{t,1}$, $t = t_2$. I valori della legenda sono espressi in MPa.



Figura 7.8: Andamento della tensione principale σ_3 , piano medio della lastra di vetro inferiore del pannello s.p_4_990; $d_t = d_{t,1}$, $t = t_2$. I valori della legenda sono espressi in MPa.

7.2.2 Taglio all'interfaccia vetro-polimero

Come evidenziato in precedenti lavori sui pannelli sandwich ([12], [15], [16]), l'interfaccia fra il pannello di vetro e il truss core è molto spesso il punto debole dell'intera struttura. La connessione fra i vari strati è ottenuta mediante l'impiego di colle e adesivi che dimostrano caratteristiche resistenziali di solito assai minori rispetto agli altri materiali del pannello; con l'applicazione di carichi e con le successive deformazioni le connessioni sono i primi punti a cedere, quando invece il vetro ed il polimero dello strato intermedio presentano ancora ampi margini di sfruttamento. Il cedimento avviene a taglio, quando l'adesivo non è più in grado di impedire lo scorrimento relativo fra la superficie della lastra di vetro e quella dei piedi di cella del truss core. Col venire meno della connessione, però, viene meno la funzionalità di tutto il pannello come già si è evidenziato nei paragrafi 2.1 e 3.3.2: la struttura è molto meno rigida, sussiste il rischio di portare a cedimento anche le altre parti e/o del totale distacco fra esse.

È indispensabile, perciò, accertarsi dell'entità delle forze che intervengono a livello dell'interfaccia, ed è possibile farlo interrogando il modello FEM su quali siano le forzanti agenti sui nodi di interfaccia, cioè condivisi dagli elementi *beam* del truss core e dagli elementi *shell* delle lastre di vetro.

In particolare, per ogni nodo preso in esame si sono individuati tutti gli elementi beam su di esso convergenti (quattro, trattandosi di celle piramidali a base quadrata) e per ognuno di questi sono state registrate le forze che l'elemento scarica sul nodo. Il software Ansys[®] è in grado di riportare queste forze riferite al sistema di riferimento globale del pannello: è stato quindi semplice trovare le risultanti agenti sul nodo nelle diverse direzioni e, in seguito, fare la somma vettoriale di quelle agenti sul piano parallelo alla superficie del pannello (parallelo al piano XZ, vedi la figura 7.9) e ricavare la forza di taglio, considerata agente su una superficie circolare di diametro $d_{cont} = 6$ mm.

Lo stesso procedimento è stato ripetuto per quattro nodi sulla lastra superiore e quattro su quella inferiore dei pannelli sandwich s.p_2_1232, s.p_4_1230 e s.p_5_1226,7, per $d_t = d_{t,1}$ e $d_t = d_{t,4}$ (data la scarsa importanza di questo parametro, non si è ritenuto necessario considerare tutti i valori, bensì solo quelli estremi). I nodi sono stati selezionati secondo quanto riportato di seguito: sulla diagonale per i pannelli con le celle 2 e 4, perpendicolarmente al lato per il solo pannello con cella 5, procedendo dall'esterno e dirigendosi all'incirca verso il centro (figura 7.9).



Figura 7.9: Rappresentazione indicativa del metodo di selezione dei nodi di interfaccia.

La somma delle forze perpendicolari, dirette cioè lungo Y, è risultata sempre praticamente pari a zero sul pannello superiore e prossima allo zero su quello inferiore – comunque ben al di sotto di 1 N –, probabilmente perché su di questo si applicava il carico. Le sigma correlate hanno assunto valori nulli o irrisori, quindi del tutto trascurabili.

Diversamente per le forze giacenti sul piano di interfaccia, tuttavia decisamente troppo piccole per dare origine a delle tau critiche: considerando le colle normalmente adoperate per l'assemblaggio dei pannelli sandwich (per esempio colle bicomponente, a base di resine epossidiche indurite tramite radiazione UV), queste presentano resistenze a taglio dell'ordine della decina o di qualche decina di MPa, quindi decisamente maggiori e con un ampio margine di sicurezza rispetto agli sforzi di taglio evidenziati nelle figure 7.10, 7.11 e 7.12.



Figura 7.10: Sforzi di taglio all'interfaccia al variare della posizione e di d_t , lastra superiore (Sup.) e inferiore (Inf.) del pannello s.p_4_1230; $t = t_2$.



Figura 7.11: Sforzi di taglio all'interfaccia al variare della posizione e di d_t , lastra superiore (Sup.) e inferiore (Inf.) del pannello s.p_5_1226,7; $t = t_2$.



Figura 7.12: Sforzi di taglio all'interfaccia al variare della posizione e di ω , lastre superiori (Sup.) e inferiori (Inf.) dei pannelli s.p_2_1232 e s.p_4_1230; $t = t_2$.

Dall'osservazione delle figure 7.10 e 7.11 si vede come le connessioni meno sollecitate siano quelle poste in zone meno coinvolte dalla deformazione del pannello sotto carico, cioè agli angoli, dove entrambi i lati dell'angolo sono sorretti da vincoli, e al centro, dove la deformazione va via via esaurendosi. È comunque opportuno ribadire che anche le sollecitazioni più alte (figura 7.11) sono ben al di sotto di 1 MPa.

La figura 7.12 indica che l'inclinazione degli elementi del truss core ha un effetto sullo sforzo di taglio agente sulle connessioni, in particolare maggiore è l'angolo alla sommità e minore è lo sforzo ($\omega_2 > \omega_4$). A livello relativo, una variazione di pochi gradi (vedi la tabella 6.2) porta ad un raddoppio degli sforzi nelle aree più sollecitate, ma data la bassa entità degli stessi a livello assoluto l'effetto non può essere considerato importante.

7.2.3 Tensioni normali nel truss core

L'analisi dei carichi assiali agenti sugli elementi del truss core ha lo scopo di verificarne la stabilità a buckling e quindi capire il grado di sfruttamento dello strato intermedio e del materiale di cui è composto.

Come spiegato nel paragrafo 5.3.2.5, il buckling può manifestarsi quando si supera in compressione un carico critico " σ_E " espresso dalla (5.19), che è funzione del diametro e della lunghezza degli elementi del truss core. Dopo aver ricavato i valori critici corrispondenti agli estremi $d_{t,1}$ e $d_{t,4}$ per ogni cella (tabella 7.3), tramite il modello FEM e il software Ansys[®] sono state individuate le tensioni assiali minima ($\sigma_{n,min}$) e massima ($\sigma_{n,max}$) presenti all'interno dell'intero truss core. Queste ultime devono rispettare le condizioni (7.1) e (7.2).:

$$|\sigma_n| \le \sigma_E \qquad \text{se} \qquad \sigma_n < 0 \tag{7.1}$$

$$\sigma_n \le \sigma_{s,c}$$
 se $\sigma_n > 0$ (7.2)

Nella (7.2) $\sigma_{s,c}$ è la resistenza del materiale PET-G ed è pari a 50 MPa.

| Cella | | 2 | 4 | 5 |
|-------|------------------------------|------|-----------|------|
| | | | $d_{t,1}$ | |
| | $(\mathbf{M}\mathbf{D}_{2})$ | 23,1 | 16,0 | 19,0 |
| 0E | (IVII a) | | $d_{t,4}$ | |
| | | 64,1 | 44,3 | 52,9 |

Tabella 7.3: Carichi critici di buckling in base a $d_t \in \omega$.

I dati sono stati raccolti da pannelli di tre lunghezze differenti (riportate nella tabella 7.4) per tracciare un andamento della tensione in base alla dimensione del lato.



Figura 7.13: Andamenti di $\sigma_{n,min} \in \sigma_{n,max}$ in base a $L \in d_t$; $\omega = \omega_2 \in \omega = \omega_4$, $t = t_2$.



Figura 7.14: Andamenti di $\sigma_{n,min} \in \sigma_{n,max}$ in base a $L \in \omega$; $d_t = d_{t,4}$, $t = t_2$.

Dalla figura 7.14 si vede che più il diametro degli elementi è stretto, maggiore è l'incidenza dei parametri $L e \omega$ nel condizionare i valori assunti dalle tensioni assiali; pare anche che minore sia l'angolo alla sommità " ω ", maggiori siano gli incrementi al variare di L. In ogni caso, le tensioni assiali si mantengono ben al di sotto dei limiti imposti.



Figura 7.15: Sviluppo delle tensioni assiali nel truss core del pannello s.p_4_810; $d_t = d_{t,1}$, $t = t_2$.

| С | | 2 | 4 | 5 |
|-------|------|--------|--------|--------|
| L_3 | (mm) | 814,0 | 810,0 | 809,1 |
| L_5 | (mm) | 1232,0 | 1230,0 | 1226,7 |
| L_7 | (mm) | 1804,0 | 1800,0 | 1800,9 |

Tabella 7.4: Pannelli presi in esame nell'analisi di buckling.

7.3 Considerazioni finali

Quanto emerge dal paragrafo 7.2 è che un pannello sandwich così composto, cioè due lastre di vetro esterne ed un truss core intermedio piuttosto fitto, risulta troppo sovradimensionato: i materiali vengono scarsamente sfruttati, le tensioni che si sviluppano al loro interno sono fino ad un ordine di grandezza minori rispetto alle caratteristiche resistenziali. Questo ci suggerisce che è possibile alleggerire ulteriormente la struttura

Le possibilità di intervento si riducono in realtà a due macroopzioni:

- 1) Intervenire sui pannelli di vetro.
- 2) Intervenire sul truss core.

L'opzione 1) prevede di diminuire lo spessore "t" delle lastre, ma è poco attuabile: sono già stati considerati pannelli in vetro con $t = t_1 = 0,7$ mm e, nonostante siano disponibili sul mercato spessori ancora minori, resta comunque necessario garantire una buona solidità dell'intera struttura, mentre lastre estremamente fini potrebbero tendere a flettersi localmente laddove machi il diretto supporto della travatura intermedia.

Oltre a ciò, diminuire lo spessore significa aumentare in maniera rilevante la spesa: il vetro sottile ed ultrasottile ha un prezzo elevato, i costi potrebbero diventare proibitivi se si considera che i pannelli sandwich contano due lastre di vetro per uno e, in funzione di un impiego edilizio, verrebbero utilizzati per costruire o rivestire intere pareti di edifici.

È l'opzione 2) quella che permette invece più ampi spazi di manovra. Il capitolo 6 ed i paragrafi 7.1 e 7.2 hanno messo in risalto una larga irrilevanza dei parametri legati al truss core $d_t e \omega$ ed il suo sovradimensionamento; anche solo considerando queste evidenze, la cosa più sensata sarebbe adoperare le geometrie che portano al minor consumo di materiale, meno fitte, a meno che il risparmio derivato dalle quantità non venga perso nei costi di fabbricazione del truss core. Questo può accadere se la geometria richiede particolari accorgimenti e lavoro di pre-processo (quindi costi legati al tempo) o porta ad un elevato numero di scarti perché il prodotto finale (il truss core in questo caso) non risulta pienamente soddisfacente. Tuttavia, date le geometrie di cella fra loro estremamente simili che sono state esaminate, è altamente improbabile che sia questo il caso.

Nondimeno, anche l'alleggerimento del truss core conosce due limiti considerevoli che non possono essere superati. Ridurre al minimo il materiale, come per il vetro, rischia sia di rendere troppo flessibili gli elementi – compromettendo la solidità della travatura e dell'intera struttura sandwich di conseguenza – sia di diminuire eccessivamente la superficie di interfaccia alle connessioni, dove lo spazio di manovra risulta più ridotto.

Una volta raggiunto uno o entrambi i limiti, la migliore soluzione possibile appare quella di ripensare l'intero strato intermedio, opzione in merito alla quale si rimanda al successivo paragrafo 7.3.1.

7.3.1 Nuova ipotesi di alleggerimento

Oltre alle problematiche esposte al principio del paragrafo 7.3, una travatura così fitta come quella del truss core degrada inevitabilmente le caratteristiche di isolamento termico: gli elementi, a contatto di entrambi i pannelli, fungono da ponti per il passaggio del calore e la trasmittanza termica del pannello sandwich che ne deriva non è nemmeno lontanamente paragonabile a quella del vetrocamera (vedi il paragrafo 3.3.3). Eppure, questo è un aspetto fondamentale per l'impiego edilizio dei pannelli.

A titolo esemplificativo, nella tabella 7.5 sono riportati i valori di trasmittanza termica "U" per diverse opzioni di un pannello in vetro a doppia lastra, con e senza il truss core intermedio. Per ogni caso si indicano:

- Se e quale delle due lastre di vetro del pannello è basso-emissiva.
- La sostanza presente all'interno dell'intercapedine.
- Se è presente un truss core intermedio e, in caso affermativo, se i suoi elementi sono pieni o cavi; nel caso siano cavi, è specificata la sostanza presente all'interno.
- La trasmittanza termica ottenuta sia tramite un modello analitico (U_{an}), sia tramite il software di analisi termiche Bisco[®] (U_{Bisco}).

La presenza di uno strato solido intermedio, seppur in qualche modo "rarefatto", compromette in maniera importante le prestazioni termiche. Confrontando i casi 1 e 2, si vede che la bassa emissività delle lastre è una caratteristica determinante nel diminuire la trasmittanza, ma l'introduzione di uno strato intermedio pieno è in grado di annullare (o quasi) questo vantaggio, secondo quanto evidenziato al caso 5. Un miglioramento si ottiene adottando un truss core cavo, come mostrano i casi 6 (che non ricorre a lastre basso-emissive) e 7. Proprio quest'ultimo caso
pare dimostrare, però, che per ottenere maggiore efficacia a livello di isolamento termico sia necessario intervenire sulle caratteristiche del vetro, più che su quelle del core intermedio – un po' come avviene a livello meccanico-strutturale, dove la risposta del pannello è prevalentemente legata alle caratteristiche meccaniche delle lastre di vetro.

| | lastra 1 b.e. | lastra 2 b.e. | riempimento intercapedine | truss core | U _{an} (W/m ² K) | U _{Bisco} (W/m ² K) |
|--------|------------------|------------------|------------------------------|-------------------|---|--|
| Caso 1 | no | no | 10% aria 90% argon | no | 2,87 | 2,88 |
| Caso 2 | no | sì | 10% aria 90% argon | no | 1,45 | 1,45 |
| Caso 3 | no | no | aerogel | no | 0,80 | 0,83 |
| Caso 4 | no | no | 10% aria 90% argon | pieno | 3,12 | 3,40 |
| Caso 5 | no | sì | 10% aria 90% argon | pieno | 2,30 | 2,75 |
| Caso 6 | no | no | 10% aria 90% argon | cavo (aria) | 2,96 | 3,1 |
| Caso 7 | no | sì | 10% aria 90% argon | cavo (aerogel) | 2,06 | 2,08 |

Tabella 7.5: Valori di trasmittanza termica "U" al variare delle caratteristiche del pannello di vetro multistrato. Spessore delle lastre t = 1 mm, intercapedine di spessore $c = h_t = 15$ mm; elementi del truss core con $d_t = 4$ mm, $\omega = 45^\circ$. Il numero della lastra cresce partendo da un ipotetico ambiente interno verso un ambiente esterno; si considera una differenza di temperatura fra i due pari a $\Delta T = 20$ °C [17].

Anche alla luce di ciò, ha senso ed è opportuno ipotizzare nuove topologie dello strato intermedio. Una variante possibile – e che risulta anche di più semplice fabbricazione del truss core – è una struttura a graticcio, denominata *grid core* (dall'inglese "*grid*" = "griglia, reticolo"): sostanzialmente una rete a maglie molto larghe, realizzata sempre in materiale polimerico, ma che riduce notevolmente i ponti di contatto fra le lastre di vetro e permette di avere ampie porzioni di pannello libere, per le quali si può imitare il principio costruttivo del vetrocamera.

Nel presente lavoro di tesi si è considerato un reticolo a maglie quadrate, circoscritte da un "cavo" di sezione rettangolare in PET-G. Le dimensioni caratteristiche sono riportate nella tabella 7.6 e corrispondono a:

- b_g : lato corto della sezione del "cavo", quello che viene a contatto coi pannelli di vetro.
- h_g : lato lungo della sezione del cavo. Per mantenere la coerenza della trattazione si è posto $h_g = h_t$ dei pannelli sandwich oggetto dell'analisi parametrica 4 (paragrafo 6.6).
- l_g : lunghezza di lato della maglia.

| b_g | (mm) | 3,0 |
|-------|------|-------|
| h_g | (mm) | 15,0 |
| l_g | (mm) | 300,0 |

Tabella 7.6: Dimensioni caratteristiche del grid core.

Il grid core è stato applicato al modello FEM di un pannello di 1500 mm di lato: sfruttando il medesimo compilatore realizzato con Matlab[®], si sono mantenute le parti relative alle lastre di vetro e ai bordi di un pannello s.p_4_1500, quindi si è costruito il graticcio per mezzo di aree poi discretizzate con elementi shell181, assegnando a questi le proprietà del PET-G e uno spessore pari a b_g . Lo spessore delle lastre di vetro è rimasto $t = t_2 = 1$ mm.

La figura 7.18 fornisce un'immagine indicativa dell'aspetto.

7.3.1.1 Risultati ottenuti

I risultati restituiti dal modello FEM sono migliori di quanto ci si aspettasse.

Sottoposto alla medesima condizione di carico uniformemente distribuito di 1 kN/m², il pannello genera una freccia che non supera il limite espresso dalla (7.2). Inoltre, messo a confronto col pannello s.p_4_1530 – quindi per valori di lunghezza di lato "*L*" simili –, il pannello con grid core dimostra una rigidità sì minore, ma la differenza è esigua (vedi la tabella 7.7).

| | | wFE (mm) | w _{lim} (mm) |
|--------------------|-----------|----------|-----------------------|
| Pannello grid core | - | 4,1 | 6,0 |
| | $d_{t,1}$ | 3,6 | |
| | $d_{t,2}$ | 3,4 | (1 |
| s.p_4_1530 | $d_{t,3}$ | 3,2 | 6,1 |
| | $d_{t,4}$ | 3,0 | |

 Tabella 7.7:
 Analisi della freccia e confronto col pannello s.p_4_1530.

Lo sfruttamento dei materiali si rivela anche in questo caso piuttosto scarso: le tensioni cui sono sottoposti sia le lastre di vetro sia il grid core sono decisamente basse (tabella 7.8) ed entro i limiti di cui si è già discusso nel paragrafo 7.2. Rispetto al truss core, il grid core genera una distribuzione delle tensioni nei pannelli decisamente discontinua (figura 7.16) e resta da verificare se questo non possa portare alla creazione di picchi di tensione e/o deformazioni localizzate, entrambi potenzialmente dannosi o incompatibili con l'utilizzo finale dei pannelli.

Oltre a ciò, sarà opportuno controllare la stabilità a buckling del core e in questo caso anche a wrinkling delle lastre di vetro, date le ampie porzioni lasciate libere da vincoli.

| | σ_{min} (MPa) | σ_{max} (MPa) |
|--------------------|----------------------|----------------------|
| Pannello superiore | -5,5 | 8,7 |
| Pannello inferiore | -8,7 | 5,4 |
| Grid core | -2,9 | 2,8 |

Tabella 7.8: Riepilogo dei valori massimi e minimi che assumono le tensioni principali nei pannelli in vetro e nel grid core.



Figura 7.16: Andamento della tensione principale σ_1 , piano medio della lastra di vetro superiore. I valori della legenda sono espressi in MPa.

Infine, si sono estrapolati gli sforzi di taglio agenti sui nodi di interfaccia indicati nella figura 7.18, in corrispondenza di due intersezioni del grid core, sia per la lastra superiore sia per quella inferiore, esattamente nello stesso modo esposto nel paragrafo 7.2.2. Considerando una sezione resistente circolare di diametro $d_g = b_g = 3$ mm, si ottengono i risultati riportati nella tabella 7.9.

| | | s,1 | s,2 | i,1 | i,2 |
|---|-------|-----|-----|-----|-----|
| τ | (MPa) | 9,1 | 4,0 | 9,1 | 4,0 |

Tabella 7.9: Riepilogo dei valori di sforzo di taglio ai nodi di interfaccia(s = superiore; i = inferiore).

Questo potrebbe rivelarsi un punto debole del grid core: il taglio all'interfaccia è aumentato notevolmente rispetto al caso del truss core e le colle adoperate nell'assemblaggio dei pannelli sandwich potrebbero non reggere o potrebbe non essere garantito il necessario margine di sicurezza. Nondimeno, se si considera come sezione resistente quella rappresentata nella figura 7.17, gli sforzi di taglio diminuiscono a valori decisamente accettabili, riportati nella tabella 7.10, senza la necessità di aumentare lo spessore " b_g ".

Le connessioni di interfaccia fra strato intermedio e le facce esterne si rivelano quindi fra i punti più critici dei pannelli sandwich ed esistono, perciò, ulteriori possibilità di ricerca e approfondimento, sia in merito a questa problematica sia in merito allo sviluppo di differenti topologie dello strato intermedio.



Figura 7.17: Seconda ipotesi di sezione resistente: $d_g = \sqrt{2} b_g$.

| | | s,1 | s,2 | i,1 | i,2 |
|---|-------|-----|-----|-----|-----|
| τ | (MPa) | 4,6 | 2,0 | 4,6 | 2,0 |

Tabella 7.10: Riepilogo dei valori di sforzo taglio ai nodi di interfaccia (s = superiore; i = inferiore), seconda ipotesi di sezione resistente.



Figura 7.18: Rappresentazione indicativa del grid core e del metodo di selezione dei nodi di interfaccia.

Bibliografia

- [1] I. Van der Weijde, Ultra lightweight, insulating thin glass façade panel, Master thesis, TU Delft, 2017
- [2] A.G. Evans, J.W. Hutchinson, N.A. Fleck et al., The topological design of multifunctional cellular metals, *Progress in Materials Science*, v. 46, n. 3 – 4, pp. 309 – 327, 2001
- [3] H.N.G. Wadley, Multifunctional periodic cellular metals, *Philosophical Transactions* of the Royal Society of London A. Mathematical, *Physical and Engineering Sciences*, v. 364, n. 1838, pp. 31 – 68, 2006
- [4] J. Wurm, *Glass structures: design and construction of self-supporting skins*, Walter de Gruyter, 2007
- [5] D. Vitalis, *Glass sandwich panels*, Master thesis, TU Delft, 2017
- [6] T. Neeskens, *Thin glass composites: based on a structural efficiency increasing design strategy*, Master thesis, TU Delft, 2018
- [7] M. Overend, C. Butchart, H. Lambert et al., The mechanical performance of laminated hybrid-glass units, *Composite Structures*, v. 110, pp. 163 – 173, 2014
- [8] R.F. Cook, G.M. Pharr, Direct observation and analysis of indentation cracking in glasses and ceramics, *Journal of the American Ceramic Society*, v. 49, n. 8, pp. 1747 1769, 2001
- [9] G. Sedlacek, K. Blank, W. Laufs et al., *Glas im konstruktiven Ingenieurbau*, Ernst & Sohn, 1999
- [10] Ö. Topçu, Kinetic thin glass façade, Master thesis, TU Delft, 2017
- [11] J.A. Hooper, On the bending of architectural laminated glass, *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 15, n. 4, pp. 309 323, 1973
- [12] L. Lazzaroni, Structural design and experimental validation of an innovative hybrid lightweight sandwich glass panel, Tesi di laurea magistrale, Università di Pisa, Aa. 2017/2018
- [13] H.G. Allen, Analysis and design of structural sandwich panels, Pergamon, 2013
- [14] V.S. Deshpande, N.A. Fleck, Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending, *International Journal of Solids and Structures*, v. 38, n. 36 – 37, pp. 6275 – 6305, 2001
- [15] M.A. Akilo, Design and analysis of a composite panel with ultra-thin glass faces and a 3D-printed polymeric core, Master thesis, TU Delft, Aa. 2016/2017
- [16] M. Guidi, *Thin glass cold bent sandwich panel*, Master thesis, TU Delft, 2019

[17] C. Renò, Caratterizzazione delle proprietà meccaniche e termiche di pannelli compositi in vetro sottile per applicazioni architettoniche, Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, 2020