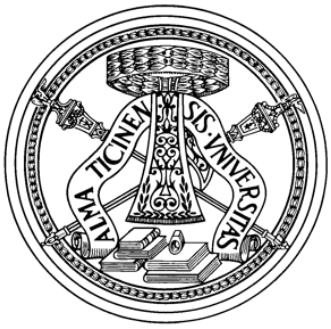


UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PAVIA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE ED ARCHITETTURA

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

Studio, analisi e modellazione FEM di facciate continue: impiego di materiali innovativi per la sicurezza in zona sismica

Candidato: Jessica Sisinni

Relatore: Prof. Ferdinando Auricchio
Correlatore: Ing. Lorenzo Casagrande

Anno Accademico 2015/2016

Ai miei genitori,

porto sicuro di ogni mio viaggio.

Sommario

Il presente lavoro di tesi, seguendo le più recenti tendenze nel campo della valutazione sismica degli elementi non-strutturali, si prefigge l'obiettivo di analizzare il comportamento dinamico di facciate continue vetrate a montanti e traversi mediante fasi di test e modellazione, e successivamente proporne il miglioramento delle performance attraverso l'utilizzo di materiali innovativi.
Studi e attività di laboratorio, precedentemente condotti dall'Istituto per le Tecnologie della Costruzione (ITC) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), sono stati presi in considerazione sia come dati di input che come valore aggiunto.
Sulla base dei risultati sperimentali, sono stati realizzati e calibrati modelli FEM tramite il software agli elementi finiti Abaqus. Dopo aver compreso a fondo i principali meccanismi responsabili del comportamento globale della facciate, è stato progettato un attuatore a fascia in SMA in grado di migliorarne le prestazioni sismiche.

Abstract

The present work, following the most recent trends in nonstructural element seismic assessment, aims to analyze the dynamic behavior of glazed curtain wall stick systems through test and modeling steps, and subsequently to propose performance improvements through innovative materials adoption.

Previous studies and experimental activities, performed at the laboratory of the Construction Technologies Institute (ITC) of the National Research Council (CNR), have been considered both as trigger and added value.

According to the experimental results, finite element models have been developed and calibrated with the Finite Element software Abaqus. Once assimilate a deeper insight underpinning the fundamental mechanisms responsible for the global facade behavior, the design of SMA strip actuators, able to improve the seismic performance, has been accomplished.

Ringraziamenti

Ho intrapreso questo mio viaggio con la consapevolezza di avere il sostegno e la comprensione delle persone che mi circondano. Ho viaggiato sempre portando con me il profumo di casa, gli abbracci di chi amo e il sorriso degli amici. E oggi che ho raggiunto questo mio piccolo grande traguardo non posso far altro che dirvi Grazie.

Un sentito ringraziamento va al Professore Ferdinando Auricchio, relatore di questa tesi, senza il quale non avrei potuto intraprendere questo percorso di crescita didattica e personale.

Un ringraziamento speciale va all'Ing. Lorenzo Casagrande, per avermi guidato in questo lavoro, dimostrandomi grande cortesia e disponibilità.

Il ringraziamento più grande va ai miei genitori, al loro sostegno e all'affetto che mi trasmettono ogni giorno. A mia mamma, Anna Rita, che con la sua determinazione mi hai insegnato ad essere forte e a superare ogni ostacolo. Grazie per essere sempre il punto di riferimento in ogni cosa che faccio. A mio padre, Giuseppe, che con il suo essere così discreto mi ha insegnato che il rispetto si conquista con l'amore. Grazie per la tranquillità e la serenità che riesci sempre a trasmettermi.

Grazie a mio fratello Nicola, la parte più esuberante di me. Grazie per ogni sorpresa inattesa, per tutti gli abbracci, perché alle volte anche in silenzio riesci a dirmi tanto.

Grazie a mia sorella Deborah, per avermi insegnato che non si finisce mai di stupirsi, grazie anche solo per un sorriso, per aver colorato le mie giornate.

Grazie ai miei nonni, che con i loro sacrifici mi hanno trasmesso il senso del dovere e la dedizione nelle cose che faccio. Grazie e Nonna Teresa, di cui conservo vivo ogni ricordo. A Nonno Nicola, per il suo essere sempre sorridente. A Nonno Domenico, che dietro una maschera dura nasconde un grande cuore.
Il grazie più profondo va a nonna Caterina, per il suo coraggio, il suo amore, per il suo essere nonna e mamma.

Grazie a tutta la mia famiglia, ai miei zii e cugini, grazie per l'affetto e il supporto che mi avete sempre dato, trasmettendomi ogni volta la sensazione di far parte di qualcosa di grande e bello.

Grazie a Katia, per avermi fatto sentire sempre protetta. Grazie per ogni volta che i sei stata e che ci sarai. Grazie perchè con te ho la sensazione che non sarò mai sola.

Grazie a tutti i miei amici, quelli di sempre e quelli che ho trovato in questo percorso, perché ognuno di loro mi ha lasciato emozioni che conserverò sempre con me, alleggerendo i momenti di difficoltà e condividendo ogni piccola soddisfazione.

Ho tenuto sempre stretto il legame che ci unisce, l'affetto, i momenti trascorsi insieme, le risate e gli abbracci. Anche a chilometri di distanza vi ho sentite sempre vicine. Grazie alle miei amiche di sempre: Luci, Mela, Terry, Tizi, Chiara, Ale.

Ti ho lasciato per ultimo, perchè le cose che dovrei scriverti e i grazie che dovrei dirti sono tanti, forse troppi. Grazie amore per essere stato fidanzato, amico e coinquilino, grazie per avermi consolato quando ne avevo bisogno e aver gioito con me nei momenti di felicità. Grazie per esserci sempre stato, per avermi fatto sentire a casa, per essere stato

ogni giorno la mia famiglia. Arrivare alla fine di questo percorso mi riempie di felicità, ma arrivarci insieme è la cosa più bella che potessi desiderare.

Un ringraziamento sentito va anche alla tua famiglia per l'affetto che mi ha sempre dimostrato, per la stima e il sostegno.

Indice

Introduzione **1**

1 Facciate continue **3**

1.1 Storia e classificazione 3

1.2 Quadro normativo 9

1.2.1 Normativa Europea:Eurocodice 8 10

1.2.2 Normativa Italiana: Norme tecniche per le costruzioni (NTC08) . 13

1.2.3 Normativa Statunitense FEMA450 e Normativa Giapponese JASS14 16

1.3 Comportamento sismico 18

1.4 Indagini sperimentali 22

1.4.1 Static racking test e Dynamic racking test 23

2 Caso studio:Test sperimentale **25**

2.1 Equipaggiamento di prova e attrezzature 25

2.2 Descrizione del campione testato 27

2.3 Analisi e risultati 28

3 Modellazione numerica **31**

3.1 Software agli elementi finiti:Abaqus 31

3.2 Modellazione globale del campione testato 34

3.2.1 Creazione degli elementi e definizione dei materiali 35

3.2.2 Assemblaggio delle parti e creazione del modello globale 39

3.2.3 Definizione delle interazioni tra i componenti del modello 41

3.2.4 Applicazione dei carichi e definizione delle condizioni al contorno . 49
3.2.5 Definizione della mesh, creazione del file di output e lancio delle analisi 53
3.3 Calibrazione del modello 53
3.3.1 Analisi di calibrazione 53
3.3.2 Parametri di calibrazione 59
3.4 Estrapolazione dei risultati, analisi e confronti 67

4 Shape Memory Alloys (SMA) 71
4.1 Definizione 71
4.2 Cenni storici 72
4.3 Trasformazione di fase e temperature caratteristiche 73
4.4 Memoria di forma e Superelasticità 78

5 Applicazione delle SMA sul campione testato 83
5.1 Modifica della Connessione Vetro-Telaio 85
5.2 Analisi e confronto dei risultati 90

6 Conclusioni e sviluppi futuri 97

Bibliografia 107

Introduzione

Il progredire della conoscenza tecnica legata allo studio e alla definizione delle leggi che governano la stabilità e la resistenza dei frame strutturali, ha inevitabilmente condotto a riporre l'attenzione anche su ambiti di carattere non strutturale: gli eventi sismici mostrano che al verificarsi di un terremoto, gli elementi non-strutturali sono implicitamente coinvolti, causando ingenti perdite economiche e rappresentando un pericolo diretto per la sicurezza. In questo contesto le facciate continue assumono un ruolo importante, sia per l'elevata potenzialità dei rischi ad esse connessi, sia per il loro contributo al comportamento strutturale globale dell'edificio. Recenti studi, infatti, hanno dimostrato che, sebbene la Normativa Italiana ed Europea considerano le facciate continue come elementi non strutturali, anche se con modesta entità, in strutture strategiche, a causa della loro disposizione e configurazione, le superfici vetrate esterne intervengono nella stabilità strutturale, resistenza e dissipazione del carico dinamico. Sulla base di tali considerazioni, il presente lavoro si prefigge il compito di studiare ed analizzare il comportamento sismico delle facciate continue. A partire dai risultati di una prova sperimentale, effettuata dall'Istituto per le Tecnologie della Costruzione del Consiglio Nazionale delle Ricerche (ITC-CNR) su un campione di facciata continua in vetro a montanti e traversi, è stata effettuata la calibrazione di modelli FEM tramite il programma agli elementi finiti Abaqus, con lo scopo non solo di analizzare le prestazioni della facciata, studiandone cioè i meccanismi responsabili della risposta ad un'azione sismica orizzontale, ma proporne successivamente un miglioramento. A tal proposito è stata posta l'attenzione sui materiali innovativi, il cui utilizzo è progressivamente aumentato negli ultimi anni. Materiali intelligenti come le Leghe a Memoria di Forma (SMA) possiedono caratteristiche fisiche

e meccaniche che li rendono idonei per l'utilizzo nelle applicazioni dell'ingegneria civile strutturale. Tuttavia, l'elevato costo li rende economicamente non applicabili su larga scala, motivo per il quale è stato scelto di applicare le Leghe a Memoria di Forma ad elementi non strutturali che contribuiscono parzialmente alla stabilità della costruzione. Il tutto in un' ottica di progettazione in gerarchia delle resistenza che potrebbe prevedere l'individuazione proprio degli elementi in SMA come 'elementi deboli' del sistema, in modo da limitare gli interventi a posteriori solamente alla loro riparazione o sostituzione. Considerando le principali problematiche tecniche e le principali qualità fisico-meccaniche delle facciate continue, le Leghe a Memoria di Forma potrebbero rappresentare dei buoni candidati per il loro miglioramento. In conclusione, dopo aver analizzato le principali proprietà delle SMA, è stato progettato un telaio vetrato intelligente in grado di migliorare la capacità sismica della facciata rispetto ai suoi concorrenti sul mercato.

Capitolo 1

Facciate continue

1.1 Storia e classificazione

Secondo quanto riportato dal dizionario di Architettura “la facciata continua o curtain wall, letteralmente muro tenda o muro di sipario, nell’architettura medievale, inglese, definiva la cortina esterna di un castello o fortezza. (...) E’ la denominazione americana dei pannelli non portanti di tamponamento appesi a una struttura a scheletro. (...) Possono essere in alluminio, acciaio, vetro, materia plastica, ecc., ed incorporare o meno gli infissi" [1]. Una definizione più tecnica è possibile ritrovarla all’interno della norma EN 13830 che definisce la facciata continua come una chiusura esterna verticale facente parte dell’involucro dell’edificio. Normalmente essa è costituita da un reticolo di elementi portanti verticali e orizzontali tra di loro connessi ed ancorati alla struttura dell’edificio. Può contenenere parti fisse e/o apribili e deve garantire le funzioni di una parete interna o esterna o parte di esse. È progettata come una costruzione autoportante che trasmette i pesi propri, i carichi imposti, le azioni dell’ambiente esterno (vento, neve, ecc.) e l’azione sismica alla struttura portante dell’edificio [2]. Il trasferimento dei carichi alla struttura portante principale avviene attraverso i collegamenti ai solai o agli elementi strutturali dell’edificio. Deve poter resistere, inoltre, alle infiltrazioni dell’aria e dell’acqua e in particolari casi può essere progettate per resistere al fuoco o a colpi esplosi da armi da fuoco.

L'evoluzione della facciate continue affonda le sue radici agli inizi dell'ottocento con i grattacieli della Scuola di Chicago. Quando i problemi fondazionali legati alla costruzione di edifici alti portarono alla necessità di alleggerire i carichi propri degli edifici mediante l'utilizzo di strutture in acciaio, che fino a quel momento venivano utilizzate solamente per opere civili. Sulla scia di questa nuova idea di progettazione fu realizzato Il Tacoma Building (1884), la prima opera dove la facciata viene applicata alla struttura portante dell'edificio.



Figura 1.1: Tacoma Building,Chicago 1904

Negli anni '40 e '50, con l'avvento e lo sviluppo di nuovi materiali, si iniziarono a sperimentare nuovi sistemi, ad esempio in bronzo o alluminio. I curtain wall sono oggi, infatti, tipicamente disegnati con la struttura di alluminio estrusa, sebbene una nicchia di applicazioni speciali sia rappresentata dalle strutture in acciaio per le caratteristiche fisiche e meccaniche di questo materiale che permette luci più ampie grazie all'alto modulo di elasticità (3 volte superiore a quello dell'alluminio) e presenta un coefficiente di dilatazione termica più basso di alluminio e legno e molto simile a quello del vetro e del calcestruzzo armato. Tuttavia negli anni '60 e '70, con la nascita del silicone strutturale

come elemento di collegamento tra telaio e tamponamento esterno, si è dato l'avvio alla realizzazione di facciate interamente vetrate e prive di profili a vista.



Figura 1.2: Lever house, New York 1952



Figura 1.3: Torre Isozaki, Milano, 2015. Facciata con elementi cellulari a triplo vetro ricurvo

Nel corso degli anni la facciata ha sempre più incrementato il suo ruolo nella progettazione, andando oltre quello di semplice chiusura. Essa, infatti, assume il ruolo di

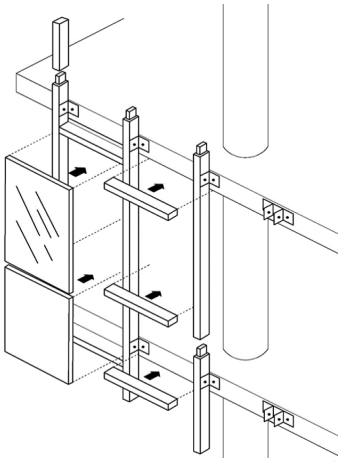
filtro tra l'ambiente interno ed esterno. Si è assistiti ad esempio alla nascita delle facciate doppie, a recupero di calore o fotovoltaiche [3].



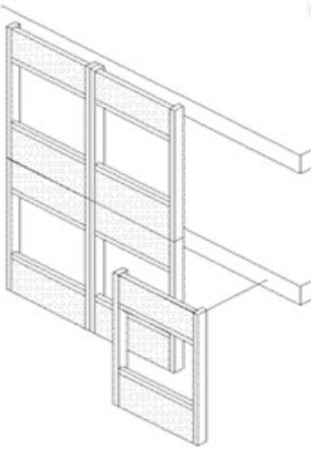
Figura 1.4: Shanghai Tower, Cina, 2015. Facciata doppia a recupero di calore e riduzione dei carichi da vento

Recentemente, inoltre, si è iniziato a pensare al ruolo che queste tecnologie costruttive potrebbero avere nella progettazione degli edifici, distaccandosi dall'idea di semplice elemento architettonico. Nonostante esse siano comunemente considerate come elementi non strutturali, diversi studi hanno mostrato il loro contributo nel comportamento strutturale globale dell'edificio. Soprattutto in edifici altri e con una disposizione uniforme e modulare delle superfici vetrate esterne si è, infatti, riscontrata una partecipazione nella stabilità strutturale, resistenza e dissipazione del carico dinamico.
Esistono in commercio svariate tipologie di facciate continue. Sulla base dell'assemblaggio dei vari elementi che le costituiscono e del loro collegamento alla struttura portante dell'edificio, possiamo classificare le più importanti in (1.5):

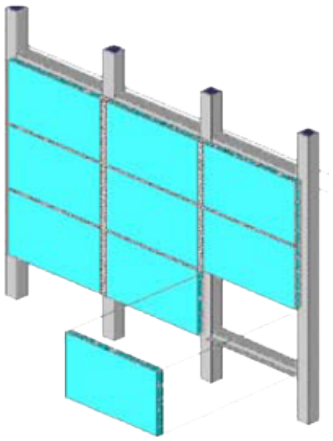
1. Facciata a montanti e traversi;
2. Facciata a cellule prefabbricate;
3. Facciata strutturale;
4. Facciata a fissaggio puntuale.



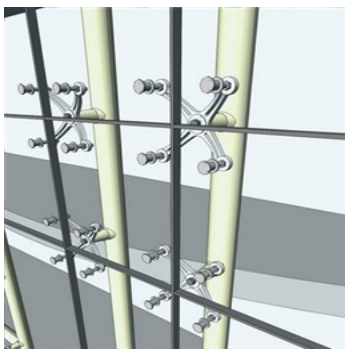
Nelle facciate a montanti e traversi il reticolo strutturale è creato dal collegamento tra gli elementi verticali e orizzontali, costituiti solitamente da profili estrusi in alluminio. L'assemblaggio di questo tipo di facciata avviene in cantiere a seguito di una lavorazione in fabbrica di tutti i membri che la compongono. Gli elementi verticali (montanti) sono i primi ad essere fissati alla struttura portante, successivamente vengono collegati ad essi gli elementi orizzontali (traversi) e infine i pannelli di vetro



Nelle facciate a cellule un pacchetto indipendente preassemblato di profili estrusi in alluminio e tamponamenti vetrati o lamierati viene realizzato in fabbrica e ancorate alla struttura portante dell'edificio in cantiere. Generalmente le cellule variano da piano da piano a piano e vengono ancorate mediatene sistemi di staffe.



La facciata strutturale è costituita da un'orditura metallica e pannelli in vetro fissi o apribili. Il nome deriva dalla modalità di collegamento del vetro al telaio che avviene per mezzo di sigillanti strutturali. le lastre di vetro possono essere singolo oppure stratificate, come nel caso del vetrocamera e nascondono del tutto o in parte gli elementi di supporto



Nelle facciate a fissaggio puntuale si elimina l'utilizzo di elementi di supporto come montanti e traversi al fine di ottenere la massima trasparenza della facciata. Ogni lastra di vetro viene collegata alla struttura portante tramite meccanismi di giunzione in un minimo di quattro punti. In questa tipologia di facciata ogni vetro risulta essere indipendente dagli altri.

Figura 1.5: Classificazione delle principali tipologie di facciate continue

Il fissaggio delle facciate alla struttura portante viene solitamente effettuato a livello della soletta o in corrispondenza di elementi strutturali come le travi. I dispositivi di fissaggio possono essere di svariati tipi ma devono in ogni caso soddisfare i seguenti requisiti prestazionali:

- Tolleranza orizzontale;
- Tolleranza verticale;
- Capacità portante nei confronti di diversi tipi di carichi, verticali e/o orizzontali.

Le tolleranze vengono garantite attraverso l'utilizzo di specifiche staffe, solitamente in acciaio o alluminio.

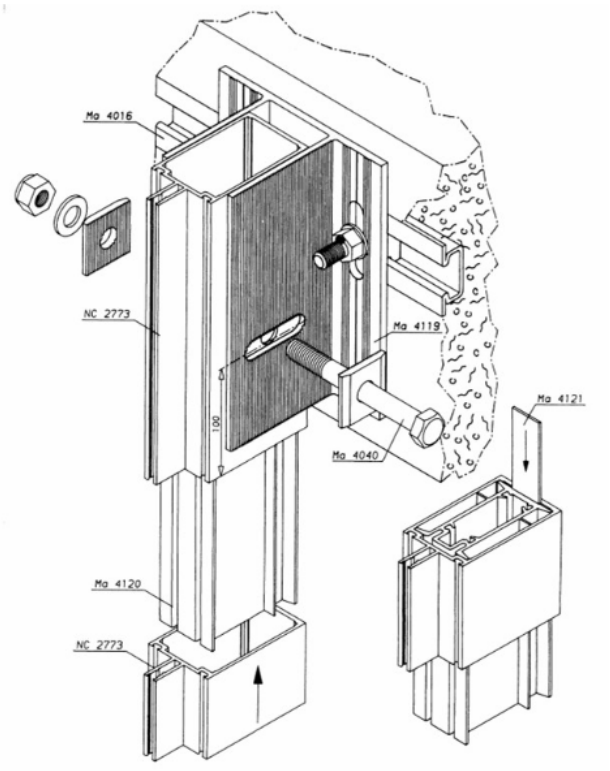


Figura 1.6: Dettaglio connessione tra facciata continua in vetro e solaio [*Prof. Paolo Rigoni, Bolzano 7 Marzo 2013*]

Sia staffe che dispositivi di fissaggio devono essere progettati e verificati per differenti tipi di carico:

- Carico derivante dal peso proprio;
- Carico prodotto dalla pressione del vento sulla facciata;
- Carico aggiuntivo causato dalla presenza di persone, ad esempio nelle passerelle di facciate doppie.

1.2 Quadro normativo

Il livello prestazionale delle facciate continue soggette a terremoti è, come usualmente accade nel campo dell'ingegneria civile, differenziato in stato limite di esercizio e stato limite ultimo. Mentre lo stato limite di esercizio è da riferirsi alla capacità del curtain wall di garantire il suo funzionamento in termini di resistenza all'acqua o all'aria, lo stato limite ultimo prevede che nessun componente della facciata debba separarsi o cadere a seguito dell'azione sismica. La facciata deve essere in grado di trasferire le forze di inerzia alla struttura di supporto attraverso i fissaggi, consentendo i movimenti necessari a prevenire la rottura dei pannelli di vetro, del telaio o dei fissaggi stessi in seguito all'azione sismica. Nello scenario normativo attuale le facciate vengono classificate sia dagli Eurocodici che dalla Normativa Nazionale come elementi secondari non strutturali. In particolare sono riservati ai criteri di progettazione e verifica degli elementi non strutturali il paragrafo 7.2.3 delle NTC08 e la sezione 4.3.5 del capitolo 4.3 dell'Eurocodice 8. Maggiore attenzione al dimensionamento di questi elementi è riservata dalla normativa EN 13830 (Annesso D) [2], la quale riporta le procedure sperimentali per valutare il comportamento della facciata nei confronti dei diversi stati limite. La norma pone l'attenzione nei riguardi dei movimenti che la struttura principale trasmette alla facciata e che essa deve accomodare. Il test da effettuare consiste nel sollecitare il solaio e osservare la risposta della facciata, che al termine della prova deve essere ancora in grado di sostenere le azioni ordinarie a cui è sottoposta e in particolare mantenere la tenuta all'acqua e all'aria. Un quadro più dettagliato e specifico, in merito alla progettazione e alla verifica delle facciate continue, si può ottenere se si fa riferimento alle normative dei paesi sismici in cui lo sviluppo

di queste tecnologie è in moto da maggior tempo, come ad esempio gli Stati Uniti o il Giappone.

1.2.1 Normativa Europea:Eurocodice 8

Come sottolineato precedentemente la normativa Europea [4], così come quella italiana, considera le facciate continue come elementi non strutturali e dedica l'intero capitolo 4 a questa tipologia di elementi. In particolare nella sezione 4.3.5 viene riportato che "gli elementi non strutturali (appendici) degli edifici (come per esempio: parapetti, frontespizi, antenne, appendici e attrezzature meccaniche, facciate continue, tramezzi, ringhiere) che potrebbero, in caso di crollo, produrre rischi per le persone o influenzare il comportamento della struttura principale dell'edificio o la sua funzionalità, devono – insieme ai loro supporti- essere verificati nei confronti dell'azione sismica di progetto". Gli effetti di tale azione sismica possono essere determinati attraverso una procedura semplificata. Viene inoltre sottolineato, prima di procedere con l'analisi semplificativa, che "nel caso di elementi non strutturali di notevole importanza o particolarmente pericolosi, l'analisi sismica da effettuare deve basarsi su una modellazione realistica delle rispettive strutture e sull'utilizzo di approprati spettri ottenuti dalla risposta degli elementi strutturali di supporto del Sistema resistente sismico principale". Il metodo semplificato, citato precedentemente consiste nell'applicare agli elementi non strutturali una forza orizzontale Fa definite nell'Eq.1.1

$$F_a = \frac{(S_a * W_s * \gamma_a)}{q_a} \tag{1.1}$$

Dove

- F_a è l'azione sismica orizzontale applicate nel baricentro dell'elemento non–strutturale nella direzione più sfavorevole;
- W_a è il peso dell'elemento;
- Sa è il coeffciente sismico applicabile ad elementi non strutturali;
- γ_a è il coefficient d'importanza dell'elemento;

- q_a è il coefficiente di comportamento dell'elemento;

Il coefficiente sismico S_a può essere calcolato utilizzando la seguente espressione

$$S_a = \alpha * S * \frac{3 * (1 + \frac{z}{H})}{1 + (1 - \frac{T_a}{T_1})^2} \tag{1.2}$$

Dove

- α è il rapporto tra il valore di progetto dell'accelerazione ag in un terreno di tipo A e l'accelerazione di gravità g;
- S è il coefficiente del terreno;
- T_a è il periodo di vibrazione fondamentale dell'elemento non strutturale;
- T_1 è il periodo di vibrazione fondamentale dell'edificio nella direzione in oggetto;
- z è la quota dell'elemento non strutturale sopra il livello di applicazione dell'azione simica (fondazione o punto più alto di un basamento rigido);
- H è l'altezza dell'edificio misurata dalla fondazione o dal punto più alto di un basamento rigido. Il valore del coefficiente sismico S_a non può essere preso minore di $\alpha * S$.

Per quanto riguarda i coefficienti di importanza la Norma dispone che per i seguenti elementi non strutturali il coefficiente di importanza γ_a non deve essere minore di 1,5:

- Elementi di ancoraggio di macchinari e attrezzature necessari alla funzionalità dei sistemi di sicurezza;
- Serbatoi e contenitori si sostanze tossiche o esplosive, ritenute pericolose per la sicurezza generale delle persone.

In tutti gli altri casi il coefficiente di importanza γ_a per elementi non strutturali può essere assunto a 1,0.

Tipologia di elementi non-strutturali	$\mathbf{q}_a$
Parapetti a sbalzo o decorazioni; Insegne e cartelloni pubblicitari; Camini,pali e serbatoi su sostegni che si comportano come mensole libere per più di metà della loro altezza notale.	1,0
Muri esterni e interni; Tramezzi e facciate; Camini, pali e serbatoi su sostegni che si comportano come mensole libere per meno di metà della loro altezza totale o vincolate alla struttura in corrispondenza o sopra il baricentro; Elementi di ancoraggio per mobili e librerie sostenuti da pavimenti; Elementi di ancoraggio per controsoffitti e dispositivi di illuminazione.	2,0

Tabella 1.1: Valori di q_a per elementi non strutturali

Per i coefficienti di comportamento q_a, invece, i valori limite superiori per gli elementi non strutturali in tabella 1.1.

Viene, inoltre, fornita una limitazione del movimento tra i piani a seconda degli elementi non-strutturali presenti. A tal proposito viene riportato che "il "requisito relativo alla limitazione del danneggiamento" è considerato soddisfatto se, per effetto di un'azione sismica caratterizzata da una maggiore probabilità di verificarsi che non l'azione sismica di progetto corrispondente al "requisito di non-collasso" i movimenti relativi tra i piani sono limitati in accordo con le seguenti limitazioni:

a) Per edifici che hanno elementi non-strutturali, costituiti da materiale fragile, solidali con la struttura:

$$d_r \nu \leq 0,005h \tag{1.3}$$

b) Per edifici che hanno elementi non-strutturali duttili:

$$d_r \nu \leq 0,0075h \tag{1.4}$$

c) Per edifici che hanno elementi non-strutturali fissati in modo da non interferire con le deformazioni della struttura o senza elementi non-strutturali:

$$d_r \nu \leq 0,010h \tag{1.5}$$

Dove

- d_r è il valore di progetto del movimento relativo tra i piani
- h è l'altezza del piano;
- ν è il coefficiente di riduzione che tiene conto del più basso periodo di ritorno dell'azione sismica, associata al requisito di limitazione del danneggiamento".

1.2.2 Normativa Italiana: Norme tecniche per le costruzioni (NTC08)

La Normativa Italiana definisce al paragrafo 7.2.3 i criteri di progettazione di elementi strutturali "secondari" e elementi non strutturali, senza però un particolare rifrimento alle facciate continue. Come riportato dalla Norma [5] "alcuni elementi strutturali possono venire considerati "secondari". Sia la rigidezza che la resistenza di tali elementi vengono ignorate nell'analisi della risposta e tali elementi vengono progettati per resistere ai soli carichi verticali. Tuttavia viene sottolineato che tali elementi devono essere in grado di assorbire le deformazioni della struttura soggetta all'azione sismica di progetto, mantenendo la capacità portante nei confronti dei carichi verticali. La Norma, inoltre, dispone che gli elementi costruttivi senza funzione strutturale il cui danneggiamento può provocare danni a persone, devono essere verificati, insieme alle loro connessioni alla struttura, per l'azione sismica corrispondente a ciascuno degli stati limite considerati e che qualora la distribuzione di tali elementi sia fortemente irregolare in pianta ne debbono essere valutati e tenuti in conto gli effetti, così come per i casi di distribuzioni fortemente irregolari in altezza, per i quali bisogna considerata la possibilità di forti concentrazioni di danno ai livelli caratterizzati da significativa riduzione del numero di tali elementi rispetto ai livelli adiacenti. Gli effetti dell'azione sismica sugli elementi costruttivi senza funzione strutturale possono essere determinati applicando agli elementi detti una forza orizzontale Fa, definita nell'Eq.1.6

$$F_a = \frac{S_a * W_a}{q_a} \tag{1.6}$$

Dove

- F_a è la forza sismica orizzontale agente al centro di massa dell'elemento non strutturale nella direzione più sfavorevole;

- W_a è il peso dell'elemento;

- Sa è l'accelerazione massima, adimensionalizzata rispetto a quella di gravità, che l'elemento strutturale subisce durante il sisma e corrisponde allo stato limite in esame ;

- q_a è il fattore di struttura dell'elemento;

La Norma dispone che in assenza di specifiche determinazioni, per il fattore q_a si possono assumere dei valori tabellati, mentre in assenza di analisi più accurate S_a può essere calcolato nel seguente modo:

$$S_a = \alpha * S * [\frac{3 * (1 + \frac{Z}{H})}{1 + (1 - \frac{T_a}{T_1})^2} - 0,5] \tag{1.7}$$

Dove

- α è il rapporto tra l'accelerazione massima del terreno a_g su sottosuolo tipo A da considerare nello stato limite in esame e l'accelerazione di gravità g;

- S è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche;

- T_a è il periodo di vibrazione fondamentale dell'elemento non strutturale;

- T_1 è il periodo di vibrazione fondamentale della costruzione nella direzione considerata;

- Z è la quota del baricentro dell'elemento non strutturale misurata a partire dal piano di fondazione;

- H è l'altezza della costruzione misurata a partire dal piano di fondazione, per strutture con isolamento sismico si assume Z=0.

La Norma, inoltre, nel paragrafo 7.3.7.2 riporta la verifica degli elementi strutturali in termini di contenimento del danno agli elementi non strutturali. Indicando che per le costruzioni ricadenti in classe d'uso I e II si deve verificare che l'azione sismica di progetto non produca agli elementi costruttivi non strutturali danni tali da renderla temporaneamente inagibile. Nel caso delle costruzioni civili e industriali, qualora la temporanea inagibilità sia dovuta a spostamenti eccessivi interpiano, questa condizione si può ritenere soddisfatta quando gli spostamenti interpiano ottenuti dall'analisi in presenza dell'azione sismica di progetto relativa allo SLD siano inferiori ai limiti indicati nel seguito:

a) Per tamponamenti collegati rigidamente alla struttura che interferiscono con la deformabilità della stessa

$$d_r \leq 0,005h \tag{1.8}$$

b) Per tamponamenti progettati in modo da non subire danni a seguito di spostamenti di interpiano d_{rp}, per effetto della loro deformabilità intrinseca ovvero dei collegamenti alla struttura:

$$d_r \leq d_{rp} \leq 0,001h \tag{1.9}$$

c) Per costruzioni con struttura portante in muratura ordinaria:

$$d_r \leq 0,003h \tag{1.10}$$

d) Per costruzioni con struttura portante in muratura armata:

$$d_r \leq 0,004h \tag{1.11}$$

Dove

- d_r è lo spostamento interpiano, ovvero la differenza di spostamento al solaio superiore ed inferiore;
- h è l'altezza del piano;

La Norma, inoltre, aggiunge che nel caso di coesistenza di diversi tipi di tamponamenti o struttura portante nel medesimo piano della costruzione, bisogna assumere il limite di spostamento più restrittivo e qualora gli spostamenti di interpiano siano superiori a 0,005 h bisogna estendere a tutti i tamponamenti, alle tramezzature interne ed agli impianti le verifiche della capacità di spostamento degli elementi non strutturali. Per le costruzioni ricadenti in classe d'uso III e IV si deve verificare che l'azione sismica di progetto non produca danni agli elementi costruttivi senza funzione strutturale tali da rendere temporaneamente non operativa la costruzione. Nel caso delle costruzioni civili e industriali questa condizione si può ritenere soddisfatta quando gli spostamenti interpiano ottenuti dall'analisi in presenza dell'azione sismica di progetto relativa allo SLO siano inferiori ai 2/3 di quelli indicati in precedenza.

1.2.3 Normativa Statunitense FEMA450 e Normativa Giapponese JASS14

La normative Statunitense NEHRP/FEMA 450 [6] prevede la progettazione sismica delle componenti architettoniche con particolare riferimento alle facciate continue. Oltre alle verifiche nei confronti dell'azione sismica da applicare al centro di masse dell'elemento non strutturale, calcolata in base ad opportuni coefficienti tabellati, viene richiesto che la facciata sia in grado di accomodare lo spostamento sismico relativo D_p della struttura per un selezionato stato limito. Pertanto viene definito il così detto $\Delta_{fallout}$, cioè il massimo spostamento interpiano che la facciata può accomodare senza subire danni ai suoi elementi principali e che può essere correlato al massimo spostamento interpiano che genera la caduta di uno dei pannelli di vetro. Come riportato nella norma, tale spostamento deve rispondere all' Eq.1.12

$$\Delta_{fallout} \geq 1.25 I D_p \geq 13mm \tag{1.12}$$

Dove I è un fattore di importanza.
Il valore di $\Delta_{fallout}$ può essere calcolato attraverso il così detto racking test dinamico, come

regolamentato dall' American Architectural Manufactures Association [8], o attraverso specifiche analisi numeriche. La valutazione del $\Delta_{fallout}$, in accordo con quanto riportato nel documento ASCE 7-10 del 2013 dell'American Society of Civil Engineers [9], può essere evitata quando il drift che causa il contatto tra i pannelli di vetro e il telaio è maggiore di 1,25 D_p. Tale valore di drift viene indicato come Δ_{clear} è può essere calcolato tramite l' equazione 1.13, di seguito riportata:

$$\Delta_{clear} = 2c * (1 + \frac{h}{b}) \geq 1,25 D_p \tag{1.13}$$

Dove c indica la distanza media tra il vetro e il telaio, mentre h e b sono rispettivamente larghezza e altezza del pannello in vetro.
Così come la normativa Statunitense, anche la normative Giapponese JASS 14 [10], specifica un valore minimo di capacità di drift della facciata in relazione all'altezza interpiano degli edifici. In particolare stabilisce delle soglie di valori in funzione della gravità dell'evento sismico e della probabilità di accadimento, per i quali devono essere garantite particolari prescrizioni. I requisiti di progettazione richiesti sono i seguenti:

- H/300: nessun danno sui componenti interni ed esterni. Soglia richiesta per eventi con un'alta probabilità di accadimento;

- H/200: tutti i componenti esterni non devono superare la sollecitazione ammissibile. L'uso prolungato è ammesso secondo la misura in cui vengano riparati. Soglia richiesta per eventi con la più alta intensità accaduti in passato;

- H/100: vietato il danneggiamento dei vetri e la caduta di qualsiasi componente. Soglia richiesta per gli eventi più intensi previsti nei prossimi 100 anni.

Pertanto nel caso più grave la facciata deve essere progettata per una spostamento relativo dell'1% dell'altezza interpiano dell'edificio.

1.3 Comportamento sismico

Durante un evento sismico gli edifici vengono sottoposti ad una combinazione di movimenti orizzontali e verticali, e al crescere dell'altezza subiscono spostamenti fuori piano sempre maggiori che si manifestano come spostamenti d'interpiano e rotazioni. La risposta sismica dell'edificio dipende non solo dalla struttura principale (elementi strutturali), ma anche da quella secondaria (elementi non strutturali, come tamponamenti). Durante un sisma, infatti, il trasferimento delle sollecitazioni dalla struttura principale a quelle secondarie, comporta che anche queste ultime risultano essere sollecitate. Tali sollecitazioni, seppure meno rilevanti rispetto a quelle agenti sulla struttura portante, possono causare gravi danni: le valutazioni in termini di danni post-terremoto sulle strutture evidenziano infatti che, quando si verifica un terremoto, un grave problema è il pericolo causato dal danneggiamento degli elementi non strutturali (come ad esempio soffitti, facciate, muratura, pannelli di vetro rotto, scaffalature), oltre alle consistenti perdite economiche (figura 1.7).

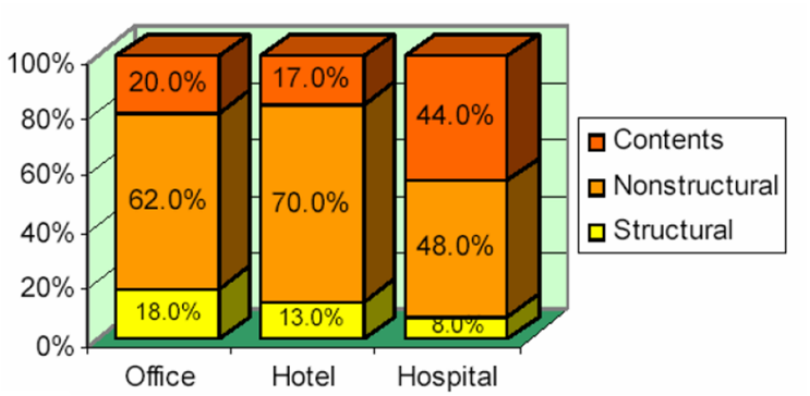


Figura 1.7: Costo percentuale dei vari elementi in funzione della destinazione d'uso degli edifici [*Miranda E. & Taghavi S., 2003*]

Anche quando un edificio è ben progettato dal punto di vista strutturale bisogna, pertanto, considerare attentamente la questione degli elementi non strutturali. Il loro collasso o mal funzionamento può, infatti, essere un pericolo diretto per chi dovesse trovarsi nelle immediate vicinanze, oltre al fatto che potrebbe influire sul comportamento

stesso della struttura portante o rendere inagibile l'edificio per un lungo periodo di tempo. Il danneggiamento di tali elementi potrebbe, dunque, comportare l'abbassamento del livello di prestazione dell'intero sistema costruttivo in una filosofia di progettazione agli stati limite, per cui la struttura deve essere in grado di soddisfare, nella sua globalità, determinate prestazioni al variare dell'intensità del sisma e della sua funzione (Performance-based design).

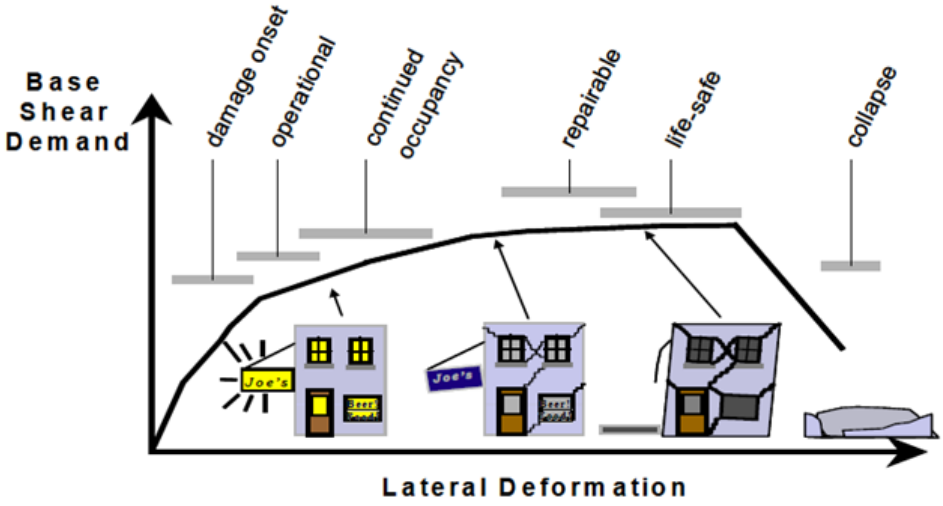


Figura 1.8: "Performance-based design" [*da Ron Hamburger*]

Come sottolineato precedentemente, gli elementi non strutturali nella maggior parte dei casi sono collegati alla struttura portante, che durante un terremoto è soggetta a valori molto elevati di spostamenti a deformazioni, pertanto gli elementi che sono ad essa collegata devono essere in grado di assorbirli senza diventare un potenziale pericolo. Se ci soffermiamo sul comportamento simico delle facciate continue, oggetto di studio in questo lavoro, è facile immaginare che la reazione all'azione sismica varia a seconda del tipo di facciata. In particolare la facciata a montanti e traversi, caso studio di questa tesi, durante un evento sismico tende a seguire il movimento della struttura alla quale è fissata e se il movimento avviene nel piano di facciata, la deformazione che ne scaturisce è una maglia formata da una serie di parallelogrammi a seconda del modo di vibrare e il pannello di vetro sarà soggetto a un moto roto-traslazionale.

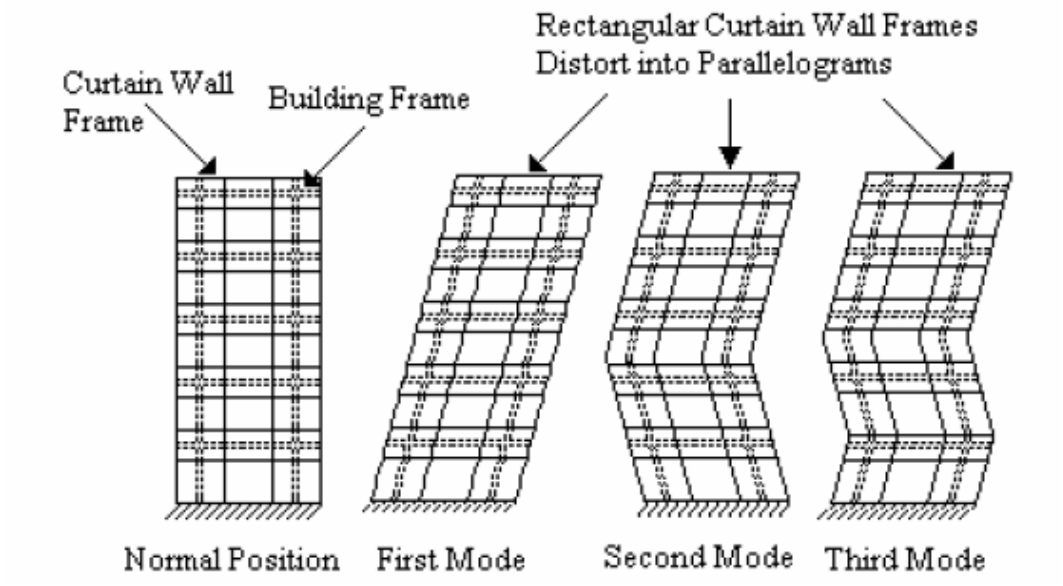


Figura 1.9: Schematizzazione dei modi fondamentali di vibrare di una tipica struttura con sistema a facciata continua

Pertanto il comportamento sismico delle facciate dipende strettamente dalla risposta sismica della struttura portante ed, in particolare, esse possono essere soggette ad elevate sollecitazioni conseguenti agli spostamenti interpiano della struttura a cui sono vincolate. È possibile prevedere, infatti, che la condizione più gravosa da considerare nel caso di analisi sismica delle facciate è il drift interpiano, cioè lo spostamento relativo tra due piani adiacenti, che le facciate dovranno essere in grado di sopportare. Allo stesso tempo è lecito aspettarsi che tale spostamento influenzerà maggiormente le lastre di vetro, data la loro natura fragile e il loro comportamento rigido, mentre il telaio avendo un comportamento globalmente duttile riuscirà a seguire più facilmente la storia di spostamenti relativi, spostandosi e deformando la sua forma. Il rischio principale che possiamo prevedere è allora la rottura fragile delle lastre di vetro o la fuoriuscita del pannello dal piano della facciata e la conseguente caduta. In particolare può accadere che per la classica facciata a montanti e traversi gli elementi portanti verticali tendono a deformarsi nel loro piano, provocando sulle tamponatura cambiamenti di forma che provocano rotture o espulsioni

dal piano [11].

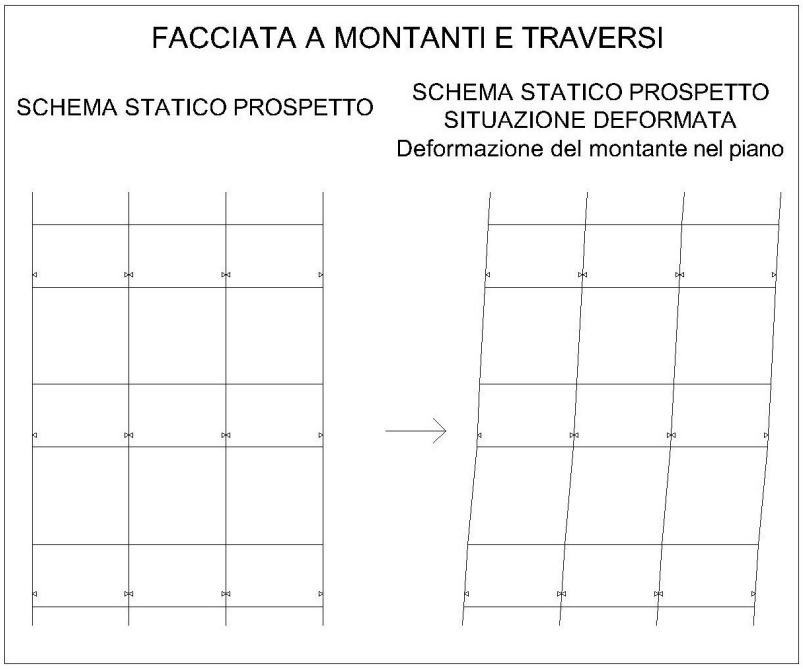


Figura 1.10: Schema statico facciata a montati e traversi

E' lecito, dunque, sostenere che durante l'evento sismico ciò che maggiormente danneggia un pannello di vetro di una facciata continua sono le deformazioni che si vengono a creare nel piano della facciata. Diversi studi hanno evidenziato che la risposta del pannello di vetro può essere descritta in due fasi [12]:

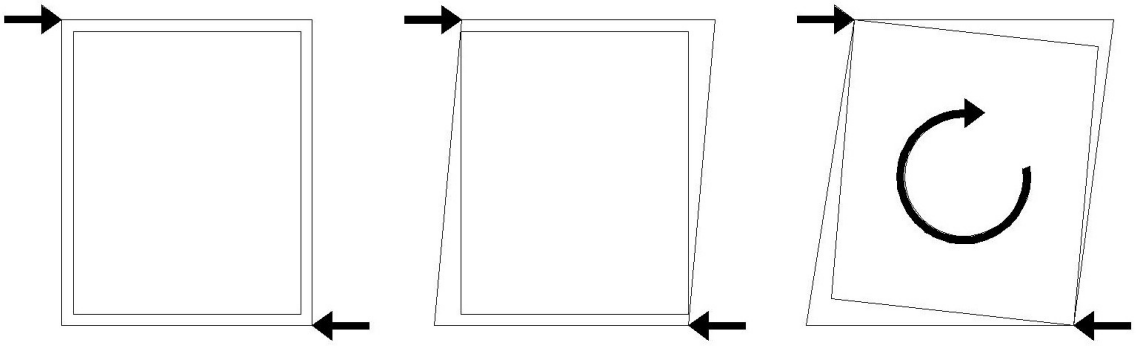


Figura 1.11: Deformazione del vetro nel piano della facciata

1. A seguito della deformazione del telaio la lastra di vetro trasla in direzione dell'azione sismica fino al generarsi del contatto tra telaio e lastra con successiva rotazione del vetro stesso

2. Il vetro viene sollecitato agli angoli opposti da un carico di compressione derivante dalla deformazione del telaio, in questa fase il vetro tende a curvarsi e contemporaneamente a accorciarsi lungo la diagonale con conseguente deformazione fuori piano del pannello.

1.4 Indagini sperimentali

Per avere un quadro generale di quella che è la situazione sperimentale nel campo delle facciate possiamo far riferimento a quanto esposto dal DIITET nella Conferenza tenutasi a Roma tra il 22-23 Novembre 2016 [13], nella quale viene sottolineato come sia sempre più riconosciuta l'importanza di condurre analisi e verifiche sismiche sulle facciate. Come riportato nel paragrafo precedente, infatti, le normative sismiche di tutto il mondo definiscono i criteri di progettazione per gli elementi non strutturali o secondari. Da qui la necessità di valutare il comportamento sismico delle facciate con test sperimentali di laboratorio sotto carico statico e/o dinamico. Viene inoltre sottolineato che, sebbene la normative europea EN 13830:2015 stabilisca i criteri di prova per la resistenza sismica sotto carico statico, i laboratori nazionali in grado di effettuare tale valutazione sono pochissimi e tale test, in Italia, non è obbligatorio ai fini della marcatura CE, per l'immissione delle facciate nel mercato. Per quanto riguarda, invece, la valutazione di resistenza delle facciate sotto carico dinamico è ancora in fase sperimentale. Le modalità di indagini maggiormente utilizzate nella pratica fanno riferimento ai metodi riportati dall'American Architectural Manufactures Association [8], che, in accordo alla normativa Americana, prevedono la valutazione del massimo spostamento interpiano che genera la caduta del vetro $\Delta_{fallout}$. Tali metodi sono l' AAMA 501.4_09 statick racking test e l' AAMA 501.6_09 dymanic racking tes (Testing, 2011) ((AAMA), 2001).

1.4.1 Static racking test e Dynamic racking test



Figura 1.12: Attuatore idraulico per l'applicazione dello spostamento orizzontale



Figura 1.13: Impianto di prova Dynamic racking test

Lo **Static racking test** è un metodo di prova statico che valuta il livello prestazionale della facciata in relazione alle funzionalità dei vari elementi e alla rottura dei pannelli di vetro a seguito di un evento sismico. Il campione viene sottoposto a una serie di test specifici con lo scopo di valutare i seguenti paramenti:

- Tasso di perdita d'aria
- Resistenza all'acqua
- Rendimento strutturale alla pressione del vetro
- Resistenza allo spostamento statico orizzontale pari all'1% del valore di altezza interpiano applicato con un attuatore idraulico, come mostrato in figura 1.12.

Il **dynamic racking test**, invece, è un metodo di prova dinamico che valuta la sicurezza sismica dei componenti in vetro all'inteno dei sistemi di facciata continua. Il test prevede l'installazione del campione in una elaborata apparecchiatura di prova come mostrato in figura 1.13, dove i punti di ancoraggio nella parte superiore vengono fatti oscillare attraverso movimenti sinusoidali con ampiezze progressivamente maggiori, mentre i punti di ancoraggio nella parte inferiore vengono fissati in modo da imprimere al campione un drift di interpiano.

Capitolo 2

Caso studio:Test sperimentale

Sulla base dello scenario normativo illustrato al §1.2, e con particolare riferimento alle prescrizioni delle normative Giapponesi e Amercane, il laboratorio dell'Istituto per le Tecnologie della Costruzione (ITC) del Consiglio Nazione di Ricerca Italiano (CNR) ha investigato sul comportamento sismico di facciate continue attraverso un test sperimentale su una facciata in alluminio/vetro in scala reale, oggetto di studio del presente elaborato di tesi. Il campione testato è attualmente disponibile sul mercato ed è costituito da un telaio a montanti e traversi e lastre in vetro isolate. La prova effettuata è una prova pushover nel piano, cioè un prova quasi statica in cui la facciata, adeguatamente vincolata, viene sottoposta a carichi orizzontali crescenti nel tempo. Di seguito vengono riportate la descrizione dell'impianto di prova e le attrezzature utilizzate, le caratteristiche geometriche del campione, le fasi del test e i relativi risultati.

2.1 Equipaggiamento di prova e attrezzature

L'impianto di prova consiste in un telaio in acciaio 5720 x 7370 mm costituito da tre travi rigide, che rappresentano la struttura principale dell'edificio. Come è possibile osservare nella figura 2.1, la facciata da testare è collegata in corrispondenza dei montanti a una trave sismica intermedia e a due travi fisse alle estremità superiore e inferiore.



Figura 2.1: Impianto di prova installato presso l'Istituto per le Tecnologie della Costruzione, San Giuliano Milanese, MI [*http://www.itc.cnr.it/*]

Le tre travi sono disposte ad altezze differenti in modo da adattarsi alle diverse configurazioni geometriche degli edifici sui quali le facciate continue verranno installate. È inoltre consentito il movimento della trave centrale in direzione orizzontale, per poter simulare l'azione sismica tramite l'applicazione di spostamenti laterali. Il carico è stato applicato sui montanti laterali in corrispondenza della connessione montanti-travi, attraverso un martinetto idraulico connesso a un sistema esterno che misura la forza applicata. Sui due montanti laterali sono stati, inoltre, collegati due trasduttori potenziometrici lineari (i.e. LVDT), con range $\pm$ 100 mm, al fine di misurare lo spostamento orizzontale della trave centrale. Sebbene il test in questione è un test di tipo statico, la presente apparecchiatura consente di effettuare anche prove dinamiche. Diverse prove sono state, infatti, recentemente effettuate con carichi dinamici, che hanno previsto, in prima fase, il 'Crescendo test' della norma americana AAMA 501-6, caratterizzato da una serie di spostamenti applicati ad ampiezza e frequenza crescente e, successivamente, prove dinamiche ad ampiezza e frequenza variabile. E' possibile inoltre sottoporre la facciata continua ad accelerogrammi e a spostamenti in ampiezza e frequenza variabile anche fuori dal piano. Gli ottimi risultati ottenuti dalle varie prove evidenziano il forte e innovativo contributo della nuova apparecchiatura nella valutazione sismica degli elementi di involucro [14].

2.2 Descrizione del campione testato

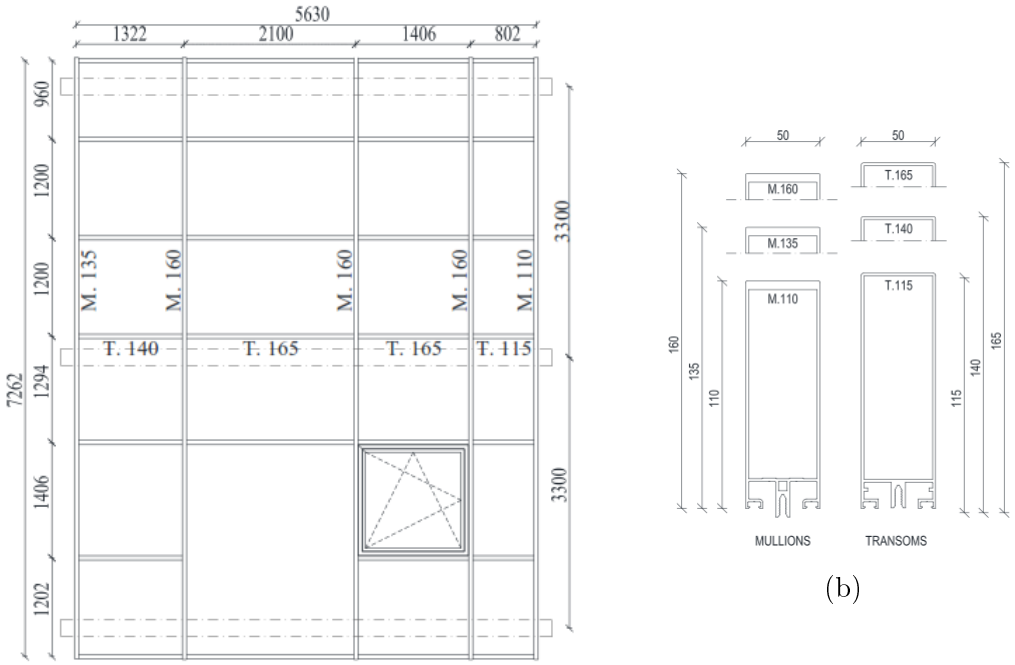


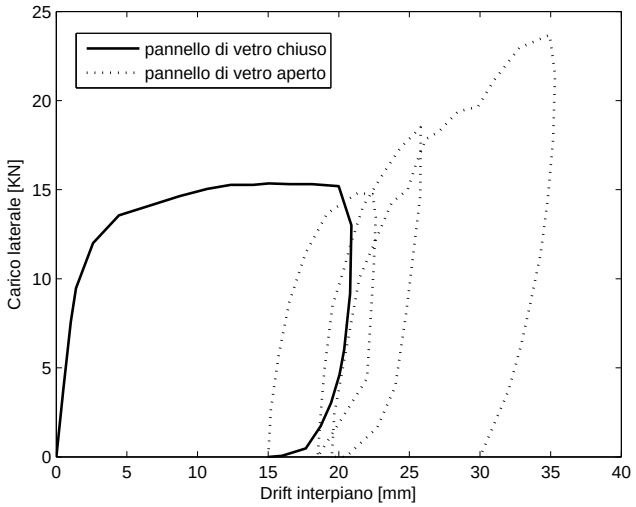
Figura 2.2: Campione testato: geometria (a), sezione trasversale montanti e traversi (b), dimensioni in mm [*Caterino et al., 2016*]

La figura 2.2a mostra lo schema geometrico della facciata, come è possibile osservare essa copre due piani con 3300 mm di altezza interpiano, è larga 5600 mm e alta 7200 mm ed è costituita da 5 montanti e 6 traversi. Come mostrato in figura 2.2b sia per i montanti che per i traversi sono stati utilizzati tre differenti profili, in particolare i traversi delle campate laterali sono caratterizzati da una sezione trasversale con un'inerzia inferiore rispetto a quelli centrali. Sono presenti 23 pannelli in vetro con camera d'aria di spessore complessivo 8+8.2+16+6 mm e solo uno di essi è apribile. Mentre i montanti sono continui lungo tutta l'altezza della facciata, i vari profili dei traversi sono collegati ai montanti attraverso un profilo ad U in acciaio, che è collegato sia a montanti che ai traversi tramite 4 bulloni in acciaio. La connessione tra vetri e telaio è, invece, ottenuta tramite una guarnizione siliconica uniformemente distribuita sia lungo la faccia interna che esterna del vetro. La distanza tra i pannelli di vetro e il telaio è di 5 mm. Montanti

e traversi sono realizzati in alluminio $EN - AW6060 - T6$, con modulo elastico E di 69 GPa, mentre i vetri sono dei vetri temperato il cui modulo elastico di riferimento è 70 GPa.

2.3 Analisi e risultati

Il provino oggetto di studio è stato sottoposto, come precedentemente evidenziato, ad un test quasi statico nel piano, effettuato aumentando la forza applicata al montante estero fino a raggiungere uno specifico valore di drift nel punto monitorato del montante opposto. Tale forza è stata poi scaricata per calcolare la deformazione plastica residua. In totale sono stati applicati quattro cicli di carico-scarico. Dal momento che il provino presenta una finestra mobile, il test è stato condotto prima sulla facciata con la finestra chiusa e successivamente sulla facciata con la finestra aperta, al fine di valutare l'influenza del singolo pannello di vetro sulla risposta globale della struttura. I risultati ottenuti, riportati di seguito in figura 2.3a, rappresentano la curva di capacità del campione testato in termini Forza laterale-Spostamento interpiano.



(a)



(b)

Figura 2.3: Risultati della prova sperimentale: (a) curva forza laterale-drift interpiano, (b) rottura dell'angolo superiore del vetro più grande nella fase di scarico [*Caterino et al., 2016*]

Durante il primo ciclo, in cui la finestra era chiusa, il massimo spostamento raggiunto è stato di 21,18 mm, in corrispondenza di una forza laterale tra i 15,9 KN e 16,09 KN, rimuovendo il carico, si è registrato uno spostamento residuo di 15,02 m. Il primo ciclo è stato ripetuto aprendo la finestra in modo da valutare l'influenza di ogni singolo pannello nella riposta globale della facciata. Applicando una forza laterale di 15,9 KN si è registrato uno spostamento di 22,64 mm. E' possibile notare che la rigidezza della curva è simile a quella del primo ciclo di carico, pertanto è lecito affermare che la mancanza di un pannello di vetro non modifica la risposta globale della facciata. L'unica differenza registrata consiste nella rottura dell'angolo superiore dello strato interno del vetro più grande nella fase di scarico mostrata in figura 2.3b, probabilmente dovuta ad una ridistribuzione delle forze a causa della mancanza del pannello di vetro. In questo caso lo spostamento residuo registrato è stato di 18,54 mm. Infine sono stati effettuati altri due cicli di carico, fino a raggiungere rispettivamente uno spostamento massimo di 26,29 mm e 35,86 mm, in corrispondenza di una forza di 19,25 KN e 23,48 KN. A tale spostamento che corrisponde al 1.08% di altezza interpiano (3300 mm) non si è verificata nessuna caduta dei pannelli di vetro.

Capitolo 3

Modellazione numerica

3.1 Software agli elementi finiti:Abaqus

Abaqus è un pacchetto di software per le analisi agli elementi finiti realizzato nel 1978. L' analisi agli elementi finiti (FEA) è intesa come la tecnica di simulazione a computer usata nelle analisi ingegneristiche e fondata sul metodo agli elementi finiti (FEM), che ha come obiettivo la risoluzione di problemi generici rappresentati mediante equazioni differenziali. Tale metodo consente di passare da un problema continuo a un problema discreto attraverso l'applicazione di step successivi necessari ad ottenere la soluzione del problema. In particolare a partire dalle equazioni fondamentali che regolano il fenomeno da studiare, introducendo opportune approssimazioni delle variabili in gioco, viene ricercata una soluzione che, seppure approssimata, tende alla soluzione esatta all'aumentare del numero di variabili discrete [15].

Lo schema risolutivo può essere sinteticamente riassunto nei seguenti punti:

- Descrizione del problema continuo tramite un sistema di equazioni differenziali;
- Discretizzazione del continuo tramite un numero finito di elementi;
- Riscrittura del problema tramite un sistema di equazioni algebriche;
- Soluzione numerica approssimata.

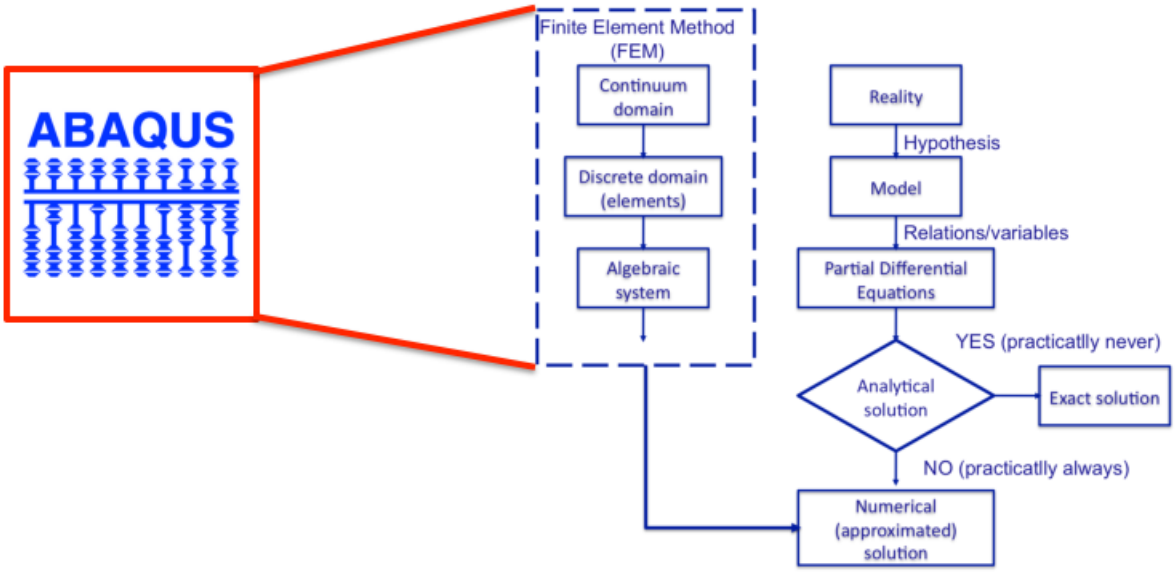


Figura 3.1: Schema risolutivo Abaqus [*Auricchio F. & Conti M., Pavia 2016*]

Il progresso scientifico e tecnologico ha portato, nel corso degli anni, ad una crescita esponenziale di software gli elementi finiti. Oggigiorno ne esistono sul mercato di verse varietà, accomunati dalla suddivisione del processo di analisi in tre step:

- *pre-processing* step che prevede la costruzione del modello (geometria, materiali, carichi, mesh)
- *processing* step di analisi in cui avviene la risoluzione del problema
- *post-processing* step di elaborazione e rappresentazione della soluzione

In particolare, Abaqus, è in grado di risolvere complessi problemi di progettazione che abbracciano analisi lineari relativamente semplici o simulazioni non lineari più impegnative, in cui intervengono gli effetti non trascurabili legati alla non linearità geometrica, ai materiali ed alle condizioni al contorno. Consente praticamente di modellare qualsiasi geometria e simulare il comportamento di una molteplicità di materiali. Per le analisi su modelli costituiti da più parti elementari, si ha la facoltà di associare a ciascuna di esse il rispettivo modello di materiale e definire le interazioni tra loro. Per la realizzazione delle analisi Abaqus dispone di due prodotti principali: Abqus/Explicit e Abaqus/Standard.

Abaqus/Explicit è particolarmente adatto per la simulazione di brevi eventi dinamici mentre Abaqus/Standard è la soluzione ideale per eventi dinamici e statici a bassa velocità. Entrambi i prodotti sono supportati dall'ambiente di modellazione grafica Abaqus/CAE per le esigenze di pre e post elaborazione.

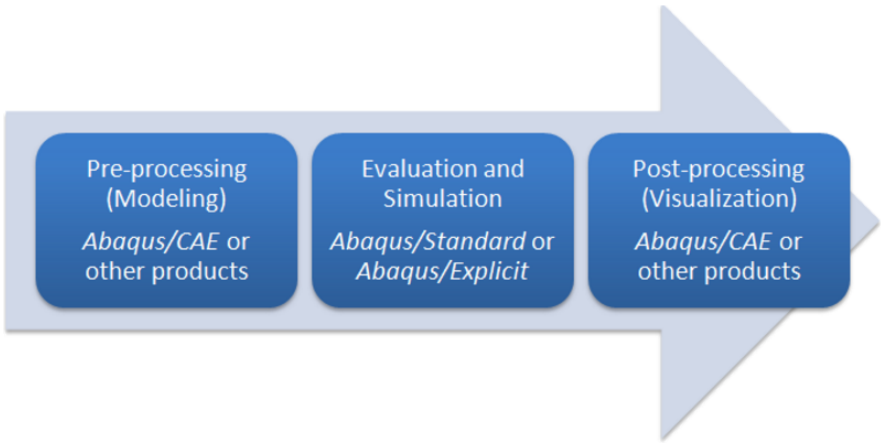


Figura 3.2: Ambienti principali di Abaqus per la realizzazzione delle simulazioni [*Saeed Veradi, 16 Luglio 2010*]

La modellazione è di tipo interattivo e viene suddivisa in moduli, ciascuno dei quali definisce un aspetto della modellazione e presenta diverse funzioni:

- *Pars*, realizzazione geometricadei singoli elementi del modello;
- *Property*, definizione di materiali e sezioni;
- *Assembly*, assemblaggio delle varie parti del modello;
- *Interaction*, possibilità di definire delle interazioni tra le parti a contatto, tra la struttura e l'ambiente circostante o stabilire un accoppiamento cinematico tra i gradi di libertà di un generico set di nodi ;
- *Step*, definizione del tipo di analisi e delle variabili di output;
- *Load*, applicazione dei carichi e delle condizioni al contorno;
- *Mesh*, realizzazione della mesh ;

- *Job*, analisi del modello;

- *Visualization*, visualizzazione dei risultati dell'analisi;

Attraverso i vari moduli si costruisce il modello finale dal quale ABAQUS CAE genera il file di input che sottopone ad ABAQUS/Standard o ABAQUS/Explicit per effettuare le analisi ed estrapolare i risultati [16].

3.2 Modellazione globale del campione testato

Sulla base della prova sperimentale descritta nel Capitolo 2 è stato sviluppato un modello tridimensionale della facciata sottoposta a test, con il duplice scopo di indagare sul comportamento della facciata e riprodurne le risposta globale in risposta ad una forza orizzontale. Nel modello è stata riprodotta la geometria della facciata, in particolare i 5 montanti continui lungo l'altezza, i 27 profili costituenti i traversi ad essi collegati e i 23 pannelli di vetro, riportati in figura 3.3.

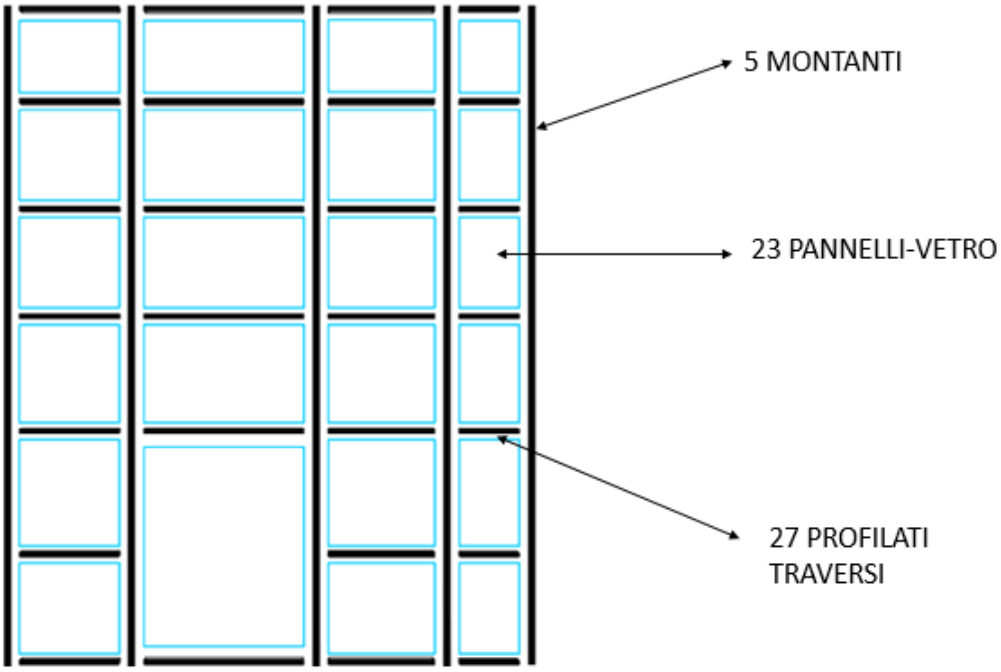


Figura 3.3: Esploso della facciata

I tre elementi costituenti la facciata sono stati successivamente collegati tra loro. Ricordiamo che la connessione tra montanti e traversi è realizzata mediante un profilato ad U in acciaio fissato sia ai traversi che ai montanti tramite bulloni in acciaio, mentre il vetro è collegato al telaio tramite una guarnizione siliconica che si estende sia sulla faccia interna che esterna del vetro. Al fine di ottimizzare il modello tridimensionale è stato necessario semplificare tali connessioni, pertanto si è scelta una modellazione tramite particolari elementi di connessione disponibili in Abaqus, denominati connettori (Connector). Per la connessione tra montanti e traversi è stato utilizzato un connettore a cerniera (Connector Hinge), che consente solamente la rotazione relativa tra i due elementi a contatto lungo l'asse perpendicolare allo sviluppo del telaio, in accordo con il tipo di prova effettuata; mentre per la connessione vetro-telaio è stato utilizzato un connettore planare (Connector Planar), che consente gli spostamenti e la rotazione del vetro nel piano della facciata. E' stato inserito un connettore a cerniere per ogni connessione montante-traverso e tre connettori planari lungo ogni lato di ogni pannello di vetro, disponendone uno in posizione centrale e due agli estremi. La modellazione scelta ha il duplice vantaggio di ridurre l'onere computazionale delle analisi e permettere la calibrazione del modello in modo da riprodurre il più fedelmente possibile i risultati sperimentali, dal momento che i connettori consentono di inserire per il grado di libertà non vincolato una curva plastica rappresentativa del comportamento della connessione considerata.

3.2.1 Creazione degli elementi e definizione dei materiali

La prima fase della modellazione ha previsto la creazione dei vari elementi costituenti la facciata all'interno del modulo "*Parts*" di Abaqus. In tale modulo è possibile definire ciascuna parte del modello specificando se si vuole definite una geometria tridimensionale, piana o con asse di simmetria e se si tratta di elementi deformabili piuttosto che rigidi. A seconda delle scelte effettuate verrà disegnata la geometria tramite forme solid, shell, wire o point [16]. Le parti create sono in totale 40 e sono tutte state disegnate direttamente sul software nella sezione Sketches. Le 40 parti create comprendono i 5 montanti, i 23 vetri tutti di differente geometria e il restante numero i profilati dei traversi non replicabili

per caratteristiche geometriche differenti. Al fine di ridurre l'onere computazionale delle analisi, viene sottolineato che si è scelto di modellare unicamente i vetri con elementi brick, mentre per i montanti e i traversi è stata utilizzata una modellazione ad elementi shell.

Montanti e Traversi

I montanti e i traversi sono stati modellati come elementi 3D shell deformabili, caratterizzati dall'avere una differente geometria a seconda della posizione all'interno della facciata, in modo da riprodurre i reali profilati della facciata (figura 3.4).

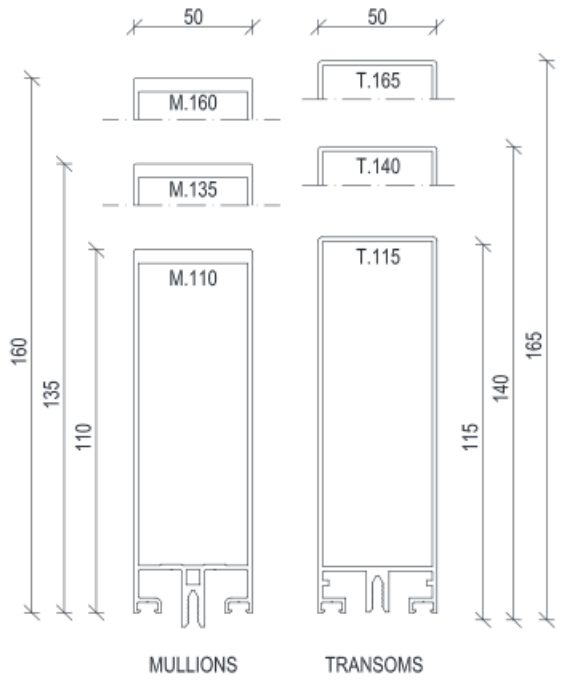


Figura 3.4: Geometria variabile dei profilati in alluminio

Al fine di facilitare il processo di meshatura, è stata semplificata la geometria attraverso il comando "Partition", che consente la separazione delle varie parti costituenti l'elemento.

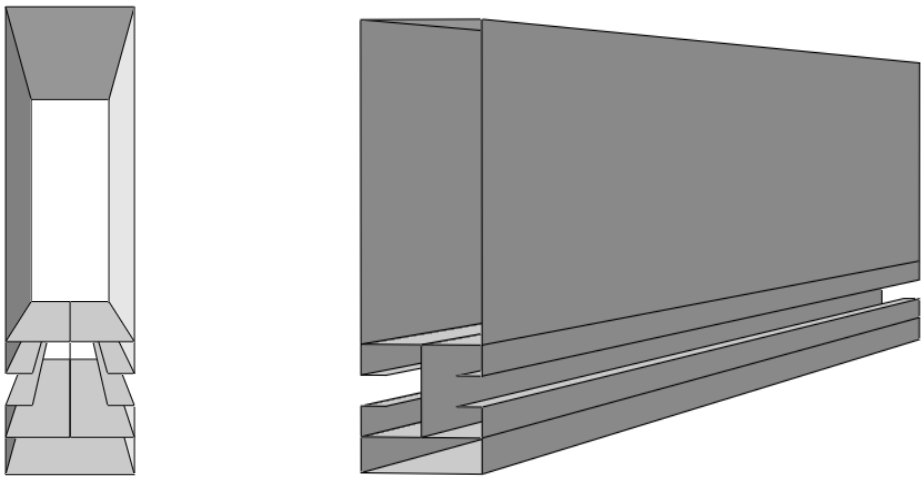


Figura 3.5: Rappresentazione tridimensionale dell'elemento "Montante/Traverso"

Pannelli di vetro

I pannelli in vetro sono stati modellati come elementi 3D brick deformabili, tutti di uguale spessore ma dimensioni differenti così come previsto dalla geometria della facciata testata.

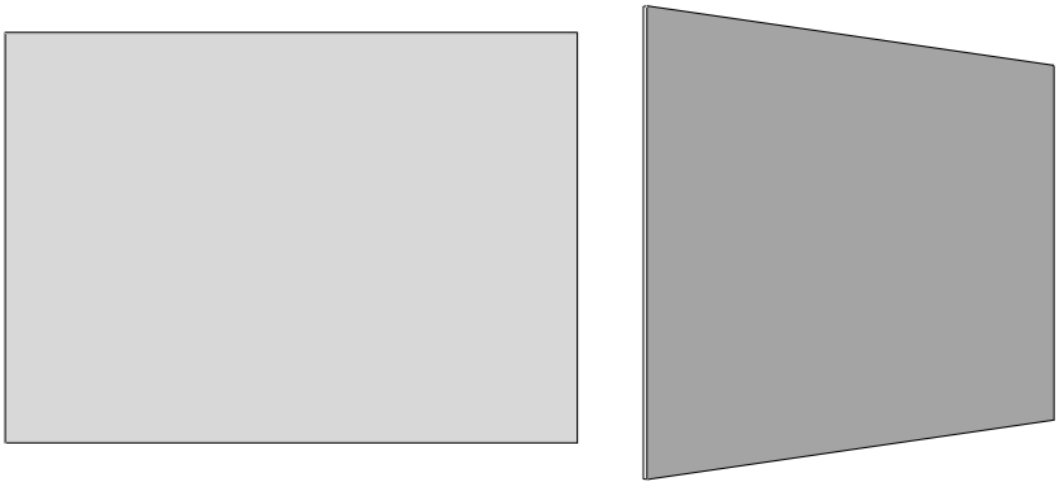


Figura 3.6: Rappresentazione tridimensionale dell'elemento "Vetro"

I pannelli in questione, caratterizzata dalla presenza di una camera d'aria, sono costituiti da tre lastre di vetro distinte, come è possibile osservare in figura 3.7.

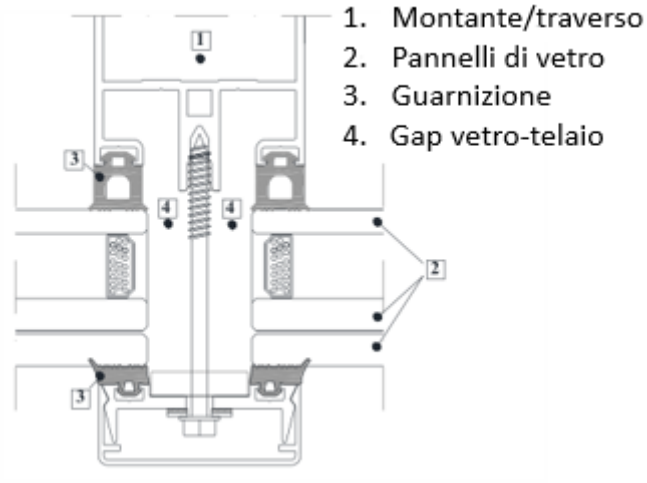


Figura 3.7: Dettaglio stratificazione dei pannelli di vetro [adattato da *Caterino et al., 2016*]

Con lo scopo di allegerire le analisi è stato calcolato uno spessore equivalente in accordo alla formulazione proposta dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) [17]:

$$\hat{h}_w = \sqrt[3]{\frac{1}{\frac{\eta}{\sum_{i=1}^{N} h_i^3 + 12 \sum_{i=1}^{N} (h_i d_i^2)} + \frac{(1-\eta)}{\sum_{i=1}^{N} h_i^3}}} \tag{3.1}$$

La formula 3.1 , derivante dal modello *Enhanced Effective Thickness (EET)*, consente il calcolo di spessori equivalenti sia per geometrie di tipo "trave" che di tipo "piastra" a partire dalla definizione dei seguenti parametri:

- h_i, spessore dell'i-esimo strato;

- d_i, distanza del baricentro dell'i-esimo strato dal baricentro geometrico della sezione stratificata;

- η, coefficiente che rende conto del "grado di accoppiamento" tra le lastre di vetro, dovuto alla presenza dell'intercalare. Il valore di tale coefficiente varia tra 0 (nel caso di *layered limit*) e 1 (nel caso di *monolithic limit*)

Per il valore di η pari a 0,25 è stato calcolato uno spessore equivalente del vetro di 12 mm.

Materiali

Gli elementi presenti nel modello hanno previsto la definizione di due materiali: vetro e alluminio, da assegnare rispettivamente ai pannelli e al telaio, ovvero montanti e traversi, all'interno del modulo "Property" di Abaqus. Il modulo Property ha lo scopo di attribuire diverse proprietà agli elementi realizzati. E' possibile specificare le proprietà di un elemento o di una parte di questo attraverso la creazione di una sezione. La definizione della sezione passa per l'assegnazione alla stessa di un materiale definito attraverso l'attribuzione di specifiche caratteristiche associate ad una determinata opzione o comportamento elementare (material behaviours) [16]. In particolare per l'alluminio è stato utilizzato un legame elasto-plastico con incrudimento, mentre per il vetro è stato scelto un legame infinitamente elastico. Le caratteristiche dei due materiali sono riportati in tabella 3.1 [18].

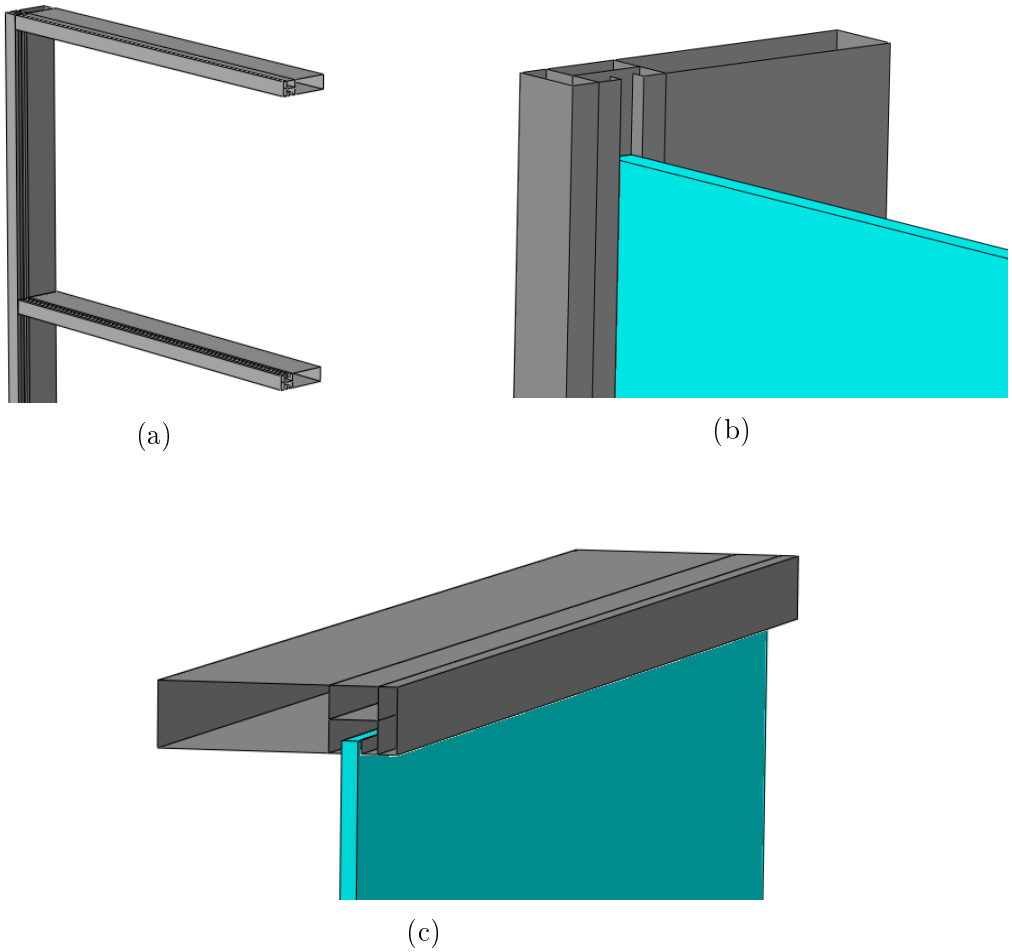
Materiale	Modulo di Young $[MPa]$	Coefficiente di Poisson	Tensione di snervamento $[MPa]$	Deformazione plastica allo snervamento	Tensione ultima $[MPa]$	Deformazione plastica a rottura
Alluminio EN-AW 6060-T6	69000	0,33	150	0	190	0,08
Vetro temperato	70000	0,3				

Tabella 3.1: Parametri dei materiali definiti all'interno del modello

3.2.2 Assemblaggio delle parti e creazione del modello globale

Nel modulo "Assembly" di Abaqus le varie parti realizzate, ognuna in un proprio sistema di riferimento, vengono assemblate in un unico sistema di riferimento globale. Attraverso il comando 'Instances' vengono inserite le varie parti che possono essere più

volte duplicate, se necessario. Abaqus, inoltre, dispone di specifici comandi che permettono di spostate,ruotate, posizionare una parte rispetto ad un un'altra, consentendo un assemblaggio più rapido [16]. Nel caso in esame tali comandi sono stati molto utili per posizionare i vetri all'interno del telaio e per allineare tra loro montani e traversi. Di seguito vengono riportate le fasi peculiari dell'assemblaggio. Come mostrato in figura 3.8 l'assemblaggio è stato eseguito allineando prima le file di montanti e traversi e, successivamente, inserendo i vetri al loro interno.



(a) (b)

(c)

Figura 3.8: Step principali della fase di assemblaggio: (a) allineamento tra montanti e traversi, (b) inserimento dei vatri all'interno dei montanti, (c) inserimento dei vetri all'interno dei traversi

Le operazioni esposte precedentemente, sono state ripetute per tutti i moduli all'interno della facciata. Così procedendo è stato riprodotto il modello globale del campione,

la cui rappresentazione è riportata in figura 3.9.

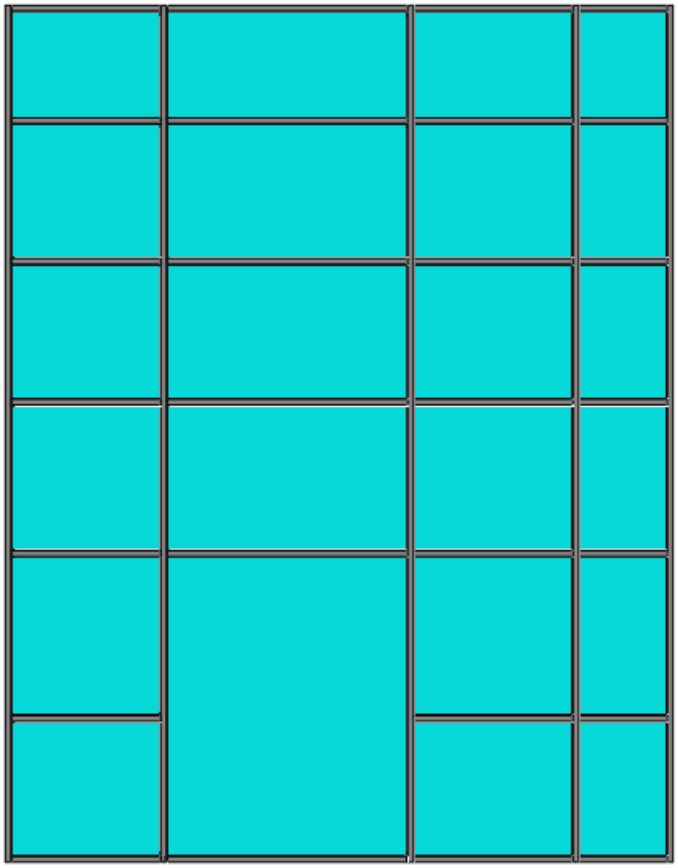


Figura 3.9: Rappresentazione del modello globale in seguito all'assemblaggio

3.2.3 Definizione delle interazioni tra i componenti del modello

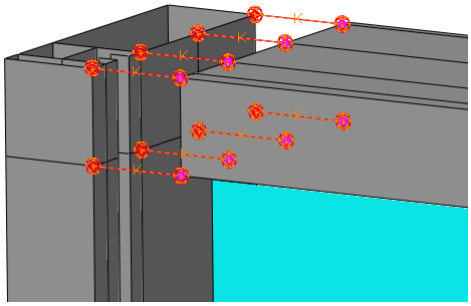
All'interno del modulo "Interaction" sono state create e definite le interazioni tra i vari elementi della facciata, ovvero:

1. Connessione Montante-Traverso;
2. Connessione Vetro-Telaio.

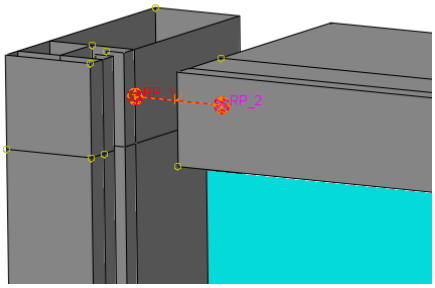
Dopo aver passato in rassegna le varie strategie di modellazione disponibili in Abaqus è stata scelta quella che meglio si adattava alla risposta attesa della facciata. In particolare sono state analizzate le seguenti strategie:

- Connessioni mediante elementi "**Springs**"

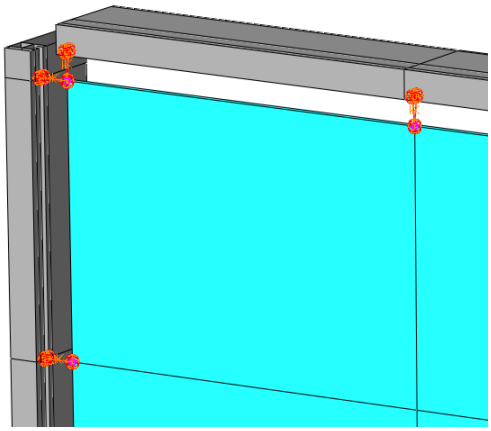
  Gli elementi "Springs" di Abaqus sono elementi molla monodimensionali che consentono di collegare due nodi all'interno del modello attribuendo un determinato valore di rigidezza lungo la direzione longitudinale della molla [16]. Per definire le connessioni di nostro interesse attraverso tali elementi è stato necessario partizionare le superfici a contatto in modo da avere una distribuzione uniforme di nodi da collegare. Tale operazione è stata ripetuta sia per le superfici a contatto di montanti e traversi che per quelle di vetro e scatolare, come mostrato in figura 3.10.



(a) Connessione montante-traverso distribuzione uniforme di molle



(b) Connessione montante-traverso molla tra 'Reference-point'



(c) Connessione vetro-scatolare

Figura 3.10: Fasi di modellazione tramite elementi "Springs"

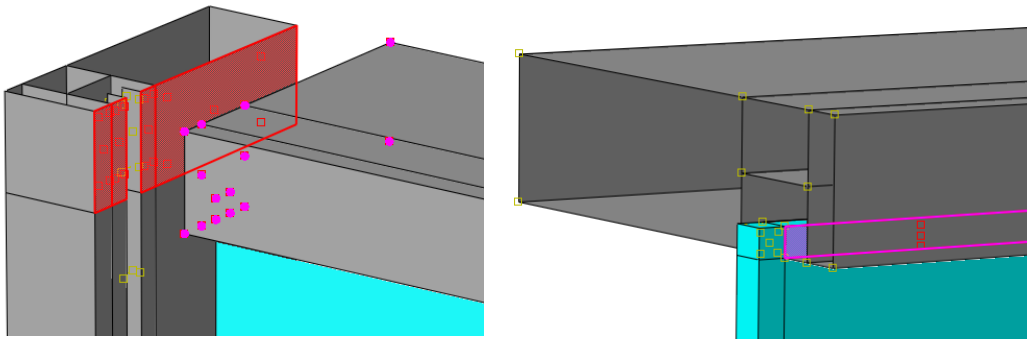
L'utilizzo di questa soluzione ha messo in luce diverse criticità, in particolare:

* Elevato onere computazionale dovuto al numero di molle;

* Difficoltà di convergenza della analisi con un carico di tipo 'static general';
* Possibilità di inserire solamente un valore di rigidezza e soltanto nella direzione di applicazione della molla, pertanto l' impossibilità di assegnare un legame momento-curvatura o tensione-deformazione in modo da realizzare un modello di connessione da calibrare con quella del campione di prova;
* Analisi rallentate sia nel caso di distribuzione uniforme delle molle lungo le connessioni, che mediante l'utilizzo di 'Reference-point';
* Necessità di inserire una minima distanza tra gli elementi collegati tramite springs (elementi non a zero lenght);
* Difficoltà nello stabilire una distribuzione appropriata di rigidezza.

- Connessioni mediante contatto tra "**Surfaces**"

  Abaqus consente di collegare due superfici a contatto previa la definizione delle loro proprietà di interazione [16]. Per definire le connessioni di nostro interesse attraverso tale procedura è stato necessario definire all'interno del modello le superfici da collegare e le proprietà di contatto tra queste. La geometria cava di montanti e traversi ha richiesto il partizionamento in sotto-geometrie in modo da poter realizzare i collegamenti. Tale procedura è stata utilizzata sia per le superfici a contatto di montanti e traversi che per quelle di vetro e scatolare, come mostrato in figura 3.11.



(a) Connessione montante-traverso (b) Connessione vetro-scatolare

Figura 3.11: Fasi di modellazione tramite contatto tra "Surfaces"

Anche in questo caso la modellazione ha evidenziato diverse problematiche:

* Nella definizione delle proprietà di interazione da assegnare alle superfici a contatto, non vi è la possibilità di assegnare un legame momento-curvatura o tensione-deformazione in modo da realizzare un modello di connessione da calibrare con quella del campione di prova;
* Definibili i parametri unicamente come rigidezze e non come percorsi plastici sforzo-deformazione o tempo-deformazione a progressione non lineare;
* Alto onere computazionale;
* Parametri definibili unicamente come rigidezze e non come percorsi plastici sforzo-deformazione o tempo-deformazione a progressione non lineare;
* Problematiche dovute al contatto tra superficie esterna del montante e scatolare aperto del traverso;
* Difficoltà di convergenza impostando master-slave di differente entità computazionale (brick con shell).

- Connessioni mediante elementi "**Connectors**"
  Gli elementi "Connectors" di Abaqus sono connettori in grado di collegare varie regioni del modello, attraverso la connessione tra due punti nell'assemblaggio o di un punto dell'assemblaggio e la terra. Per modellare un connettore in Abaqus è necessario:
  - Definire un 'filo' di connessione tra i due nodi da collegare; (wire figure);
  - Definire una sezione del connettore (connector section);
  - Assegnare la sezione al connettore (connector section assignment).

  Esistono vari tipi di connettori, di seguito vengono riportati quelli utilizzati nel presente lavoro:
  - **Connector Hinge**: connettore a cerniere che consente di vincolare tutti i gradi di libertà tra due punti, ad eccezione del momento lungo una direzione

desiderata, tale scelta viene gestita attraverso la definizione di un sistema di riferimento locale;

– **Connector Planar**: connettore planare che consente di vincolare tutti i gradi di libertà tra due punti, ad eccezione di due gradi di libertà traslazionali e uno rotazionale, tale possibilità viene gestita attraverso la definizione di un sistema di riferimento locale [16].

Per definire le connessioni di nostro interesse attraverso tale procedura è stato necessario procedere per step successivi differenti per ognuna delle due connessioni. La descrizione dettagliata della modellazione è riportata di seguito.
Rispetto alle altre procedure, l'utilizzo dei connettori ha fornito diversi vantaggi:

* Nella definizione delle proprietà dei connettori vi è la possibilità di assegnare un legame momento-curvatura o tensione-deformazione in modo da realizzare un modello di connessione da calibrare con quella del campione di prova;

* Parametri definibili non soltanto come rigidezze, ma come percorsi plastici sforzo-deformazione o tempo-deformazione a progressione non lineare in modo da simulare il comportamento fortemente non lineare della connessione in alluminio;

* Facilità di convergenza anche impostando una connessione tra elementi di differente entità computazionale (brick con shell).;

* Esiguo onere computazionale senza perdite nella qualità della modellazione.

Sulla base delle motivazioni precedentemente elencate si è scelto di modellare le connessioni della facciata tramite l'utilizzo dei connettori. In particolare è stato utilizzato il connettore Hinge per definire la connessione tra montanti e traversi, mentre il connettore Planar per la connessione tra vetro e telaio in alluminio.

Connessione Montante-Traverso

La facciata in questione, come più volte accennato in precedenza, presenta della connessioni montante-traverso realizzate tramite un profilo ad U in acciaio, connesso sia ai montanti che ai traversi tramite bulloni in acciaio come mostrato in figura 3.12.

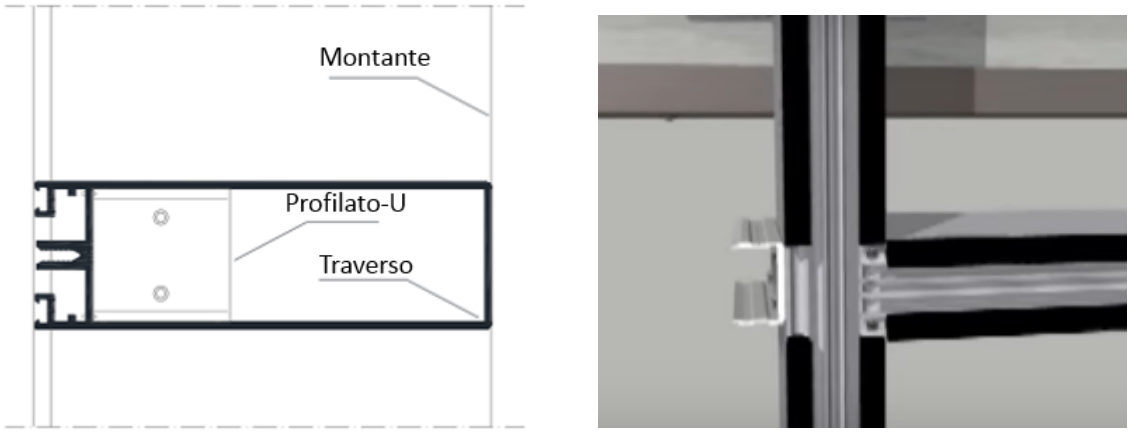
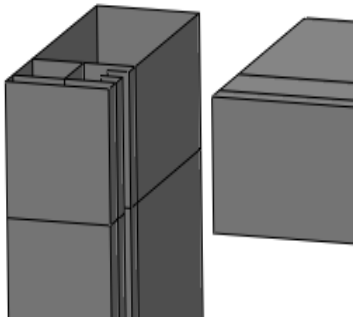


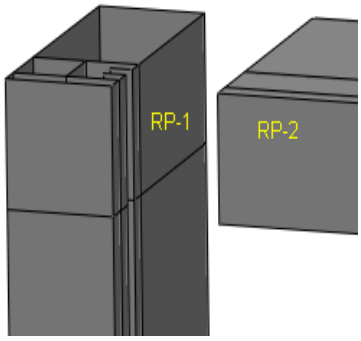
Figura 3.12: Connessione Montante-Traverso nel campione sottoposto a test

All'interno del modello tridimensionale della facciata tale connessione è stata ottenuta attraverso l'inserimento del connettore a cerniera, con lo scopo di alleggerirne le analisi e ridurne l'onere computazionale. Ulteriore vantaggio consiste nel poter assegnare alla connessione, oltre che una rigidezza elastica relative al grado di libertà prescelto, anche una curva plastica 'Yield Moment- Plastic Motion', che simuli il degrado non lineare della connessione col procedure del livello di deformazione della struttura globale. In tal modo sarà dunque possibile affidare ad un unico punto intermedio il comportamento non-lineare della connessione in esame. L'inserimento di tale curva ha consentito, inoltre, la calibrazione del modello rispetto ai dati sperimentali. E' possibile seguire la procedura utilizzata per la realizzazione della connessione tramite connettore attraverso gli step di modellazione riportati in figura 3.13.

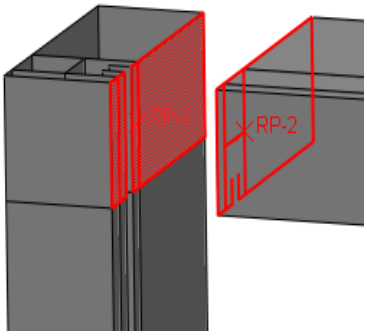
Il passo successivo consiste nell'assegnare al connettore la curva plastica, la cui calibrazione e assegnazione verrà discussa al paragrafo § 3.3.



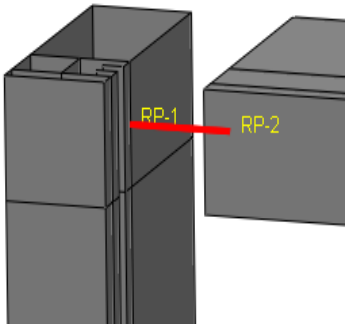
(a) Partizione dei montanti in corrispondenza della connessione con i traversi



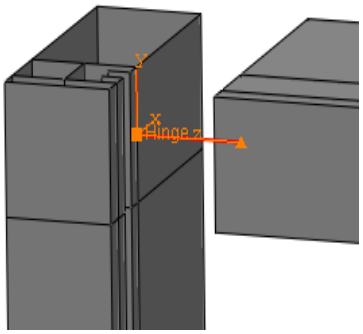
(b) Definizione di un 'Reference Point' su ognuna delle due superfici a contatto



(c) Assegnazione di un vinvolo 'Rigid Body' tra i punti della superficie e il 'Reference Point'



(d) Collegamento dei 'Refernce Point' mediante la definizione di un 'Wire Feature'



(e) Assegnazione al 'Wire Feature' del 'Connector section' di tipo 'Hinge'

Figura 3.13: Fasi di modellazione della connessione Montante-Traverso mediante Connector Hinge

Connessione Vetro-Telaio

La connessione Vetro-Telaio è realizzata attraverso una guarnizione siliconica disposta sia lungo il lato interno che esterno del vetro come mostrato in figura 3.14

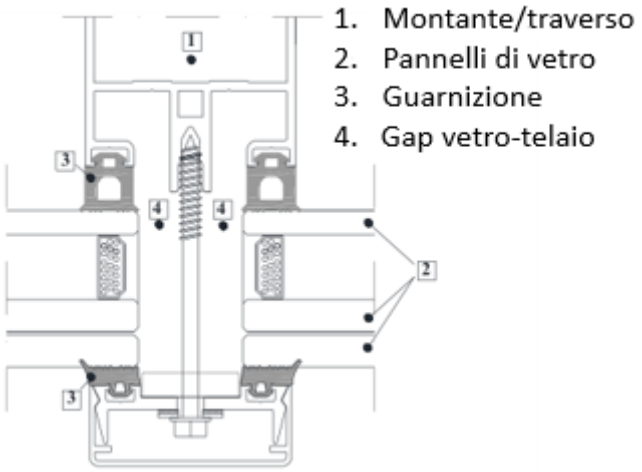
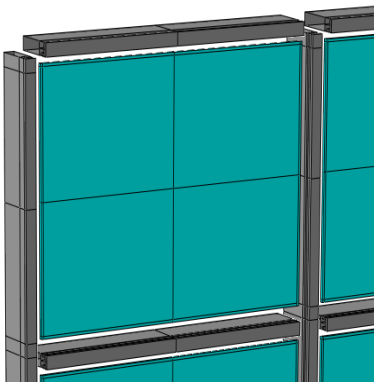


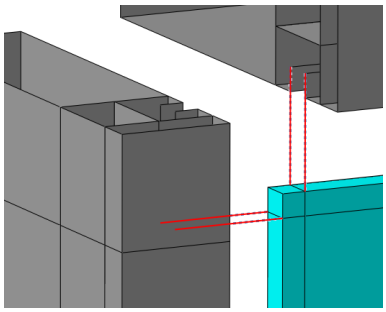
Figura 3.14: Connessione Vetro-Telaio nel campione sottoposta a test

All'interno del modello tridimensionale della facciata tale connessione è stata riprodotta attraverso l'inserimento del connettore Planare, ottenendo tutti i vantaggi di modellazione riportati per la connessione a cerniera. In questo caso è stato necessario distribuire i connettori lungo ogni lato del vetro, in particolare si è scelto di disporre per ogni lato di ogni vetro tre connettori: uno centrale e due laterali. Così facendo sarà possibile affidare a tali punti il comportamento non-lineare della connessione in esame e di calibrare il modello realizzato rispetto ai dati sperimentali attraverso l'inserimento delle curve plastiche per ogni grado di libertà non vincolato dal connettore.
La procedura utilizzata per la realizzazione di questo tipo di connettore è riportata negli step di modellazione di figura 3.15.

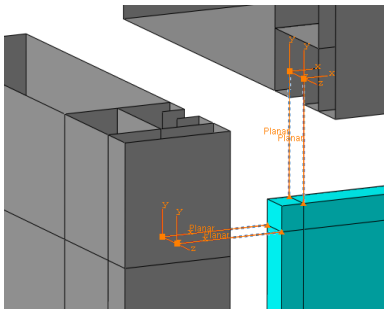
Anche in questo caso lo step finale consiste nell'assegnare al connettore le curve plastiche, la cui calibrazione e assegnazione verrà discussa al paragrafo § 3.3.



(a) Realizzazione di una partizione nella mezzeria di montanti, traversi e vetri e lungo il contorno dei vetri a una distanza pari all'ancoraggio del vetro all'interno dello scatolare



(b) Definizione di un 'Wire Feature' tra ogni nodo coincidente di vetro e telaio lungo le partizioni effettuate



(c) Assegnazione al 'Wire Feature' del 'Connector section' di tipo 'Planar'

Figura 3.15: Fasi di modellazione della connessione Vetro-Telaio mediante Connector Planar

3.2.4 Applicazione dei carichi e definizione delle condizioni al contorno

All'interno del modulo "Load" sono stati definiti i carichi e le condizioni al contorno. La definizione dei vari paramentri è stata effettuata prendendo in considerazione lo schema di prova, riportato in figura 3.16 [7].

Per poter riprodurre tali condizioni sono state effettuate delle partizioni sul modello in corrispondenza delle tre travi esterne. Al fine di valutare l'influenza delle condizioni di carico sulla modellazione effettuata, è stata eseguita sia un'analisi in spostamenti che

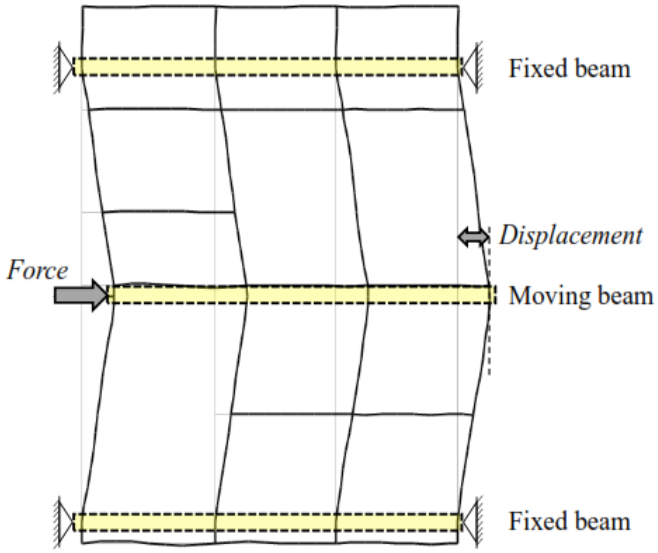


Figura 3.16: Schema di prova: carichi e condizioni al contorno [*Caterino et al., 2016*]

in forze. Nella prima è stato assegnato un carico di tipo 'Displacement', applicato lungo i punti in corrispondenza della trave sismica centrale. Lo spostamento è stato assegnato con distribuzione uniforme e con una legge di carico temporale attraverso il comando 'Amplitude', tale comando consente di modificare il valore dello spostamento per tutta la durata dello step [16].

Time [s]	Displacement [mm]
0	0
0.1	4
0.2	8
0.3	12
0.4	16
0.5	20
0.6	24
0.7	28
0.8	32
0.9	36
1	40

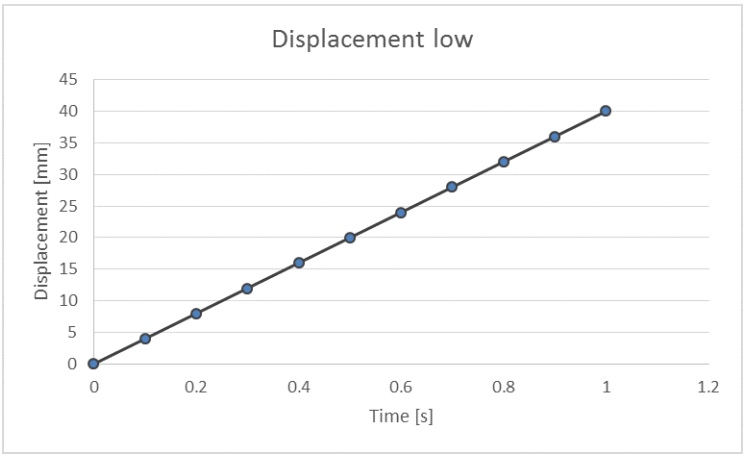


Figura 3.17: Legge di carico in spostamenti applicata al modello

Come riportato in figura 3.17, nel caso specifico, la legge di carico utilizzata applica alla struttura uno spostamento globale che va da 0 mm ad un massimo di 40 mm, in accordo con i risultati della prova sperimentale.
Nella seconda, invece, è stato applicato un carico concentrato in corrispondenza di un nodo rappresentativo della superficie laterale del montate caricato nel test sperimentale. Anche in questo caso è stata definita una legge di carico temporale, in modo da incrementare il valore del carico per tutta la durata dello step [16].

Time [s]	Load [KN]
0	0
0.1	2.8
0.2	5.6
0.3	8.4
0.4	11.2
0.5	14
0.6	16.8
0.7	19.6
0.8	22.4
0.9	25.2
1	28

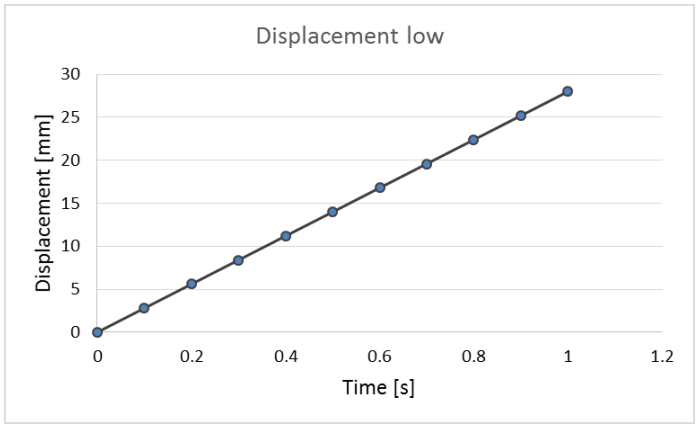
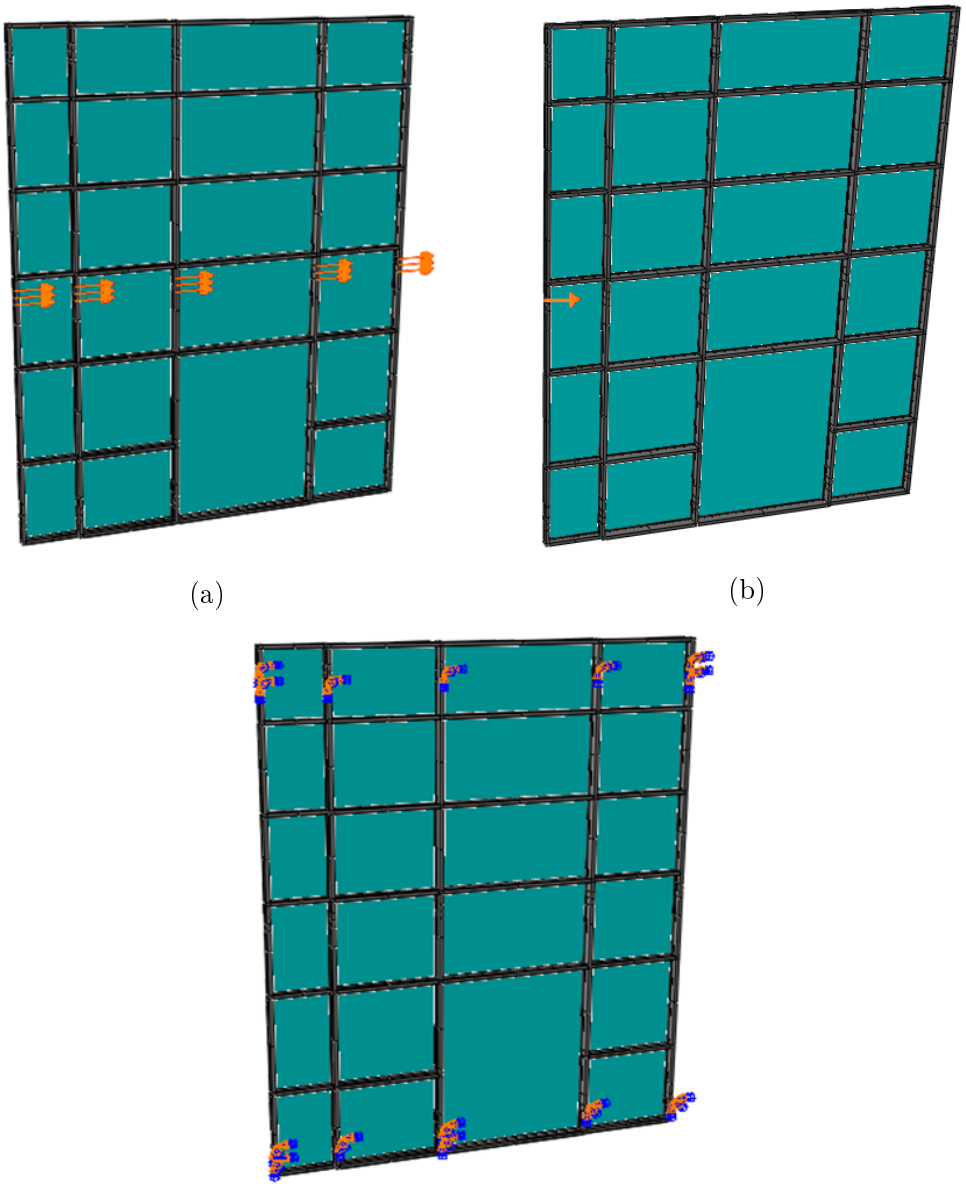


Figura 3.18: Legge di carico in forze applicata al modello

La legge di carico utilizzata applica alla struttura un carico che va da 0 KN ad un massimo di 28 KN, in accordo con la prova sperimentale (figura 3.18).
In entrambi i casi i nodi in corrispondenza delle due travi fisse sono stati vincolati tramite incastro. La rappresentazione dei carichi imposti e delle condizioni di vincolo è riassunta in figura 3.19.
L'analisi fatta, come precedentemente descritto, non tiene conto dell'apertura del pannello di vetro in quanto tale condizione, durante il test sperimentale, non ha evidenziato significativi cambiamenti nella risposta. Il modello, inoltre, non è stato sottoposto a cicli di scarico, in quanto sulla curva sperimentale è possibile notare come le fasi di scarico e successivamente di carico non comportano significative perdite di resistenza della facciata, in aggiunta al fatto che lo scopo di tale lavoro è stato quello di ricalcare l'andamento

qualitativo della curva ottenuta dai risultati sperimentali e valutarne, successivamente, la variazione a seguito dell'utilizzo dei materiali innovativi.



(a) (b)

(c)

Figura 3.19: Carichi e condizioni al contorno: carico in spostamenti (a), carico in forze (b), incastri (c)

3.2.5 Definizione della mesh, creazione del file di output e lancio delle analisi

La definizione della mesh dei vari elementi è stata effettuata individualmente per ogni parte costituente il modello globale. Per tutte le parti, data la regolarità della geometria, è stata utilizzata una mesh strutturata. Per i montanti e i traversi gli elementi utilizzati sono **elementi shell a 4 nodi**, con integrazione ridotta e hourglass control, denominati all'interno del software ABAQUS con il simbolo **S4R**, mentre per i vetri sono stati utilizzati **elementi brick a 8 nodi** con integrazione ridotta e hourglass control, denominati con il simbolo **C3D8R** [16]. La mesh è stata assegnata ai vari elementi in modo da raggiungere un buon compromesso tra la velocità computazionale del modello e l'accuratezza dei risultati, considerando che le due tipologie di elementi sono collegati tramite connettori. L'operazione finale prima di poter lanciare l'analisi è stata la definizione del 'Job'. Tale definizione consiste essenzialmente nell'assegnare un nome al file di output .ODB che contiene i risultati dell'analisi. Infine, attraverso i comandi 'Submit' e 'Monitor' è possibile avviare e monitorare l'analisi, al termine della quale si procede con l'estrapolazione dei risultati [16].

3.3 Calibrazione del modello

3.3.1 Analisi di calibrazione

La calibrazione del modello FEM sulla base dei risultati sperimentali della prova effettuata in laboratorio è risultata essere la fase più delicata della modellazione. Tale procedure ha consentito di determinare e assegnare le curve plastiche ai connettori, indispensabili per la definizione del comportamento delle connessioni modellate all'interno della facciata. Prima di procedere con la ricerca dei parametri di calibrazione del modello è stato necessario effettuare una campagna di analisi parametriche, attraverso le quali sono stati analizzati e compresi a fondo i meccanismi alla base della risposta globale della facciata, con particolare riferimento a:

- **telaio in alluminio**: geometria e rigidezza rotazionale della connessione montante-traverso;
- **distanza tra pannelli di vetro e telaio (gap)**: aumento di rigidezza locale a seguito dell'impatto;
- **interazione tra vetro e alluminio**: comportamento meccanico della guarnizione (rigidezza elastica e forza di snervamento)

Il ruolo di ogni componente nella risposta globale della facciata è stato analizzato attraverso 5 modelli. Il passaggio da un modello all'altro è stato effettuato fissando di volta in volta i parametri analizzati, in modo da ottenere modelli di completezza sempre maggiore con l'avanzare delle analisi. La definizione dei parametri presi in considerazione è stata eseguita applicando ai connettori Hinge e Planar curve variabili a seconda del comportamento analizzato. I risultati ottenuti vengono riportati di seguito.

Rigidezza della connessione montante-traverso

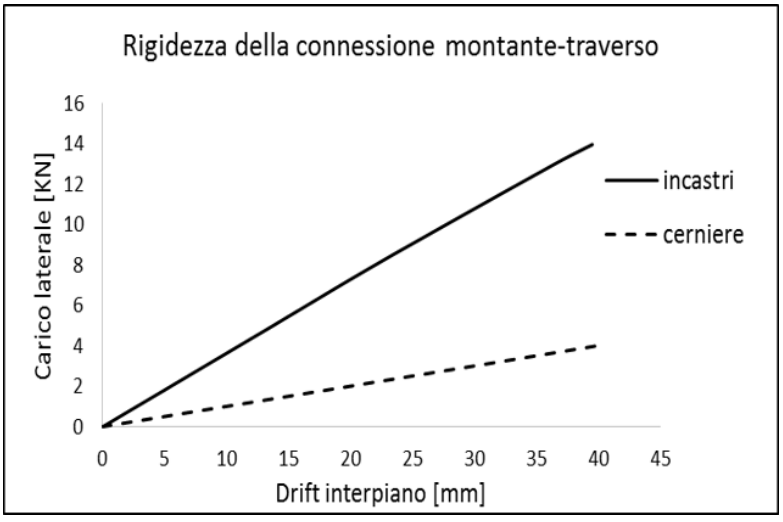


Figura 3.20: Risposta della facciata alla variazione della rigidezza montante-traverso

L'analisi della connessione montante-traverso è stata effettuata considerando un modello del solo telaio, privo dei pannelli di vetro. E' stata prima inserita una connessione

incastrata (connector Beam) e, successivamente, incernierata (connector Hinge). I risultati ottenuti, in entrambi i casi, hanno evidenziato che il comportamento globale del telaio è un comportamento elastico lineare, dipendente dalla geometria della facciata e dal tipo di connessione.

Tratto rigidezza elastica della connessione vetro-telaio

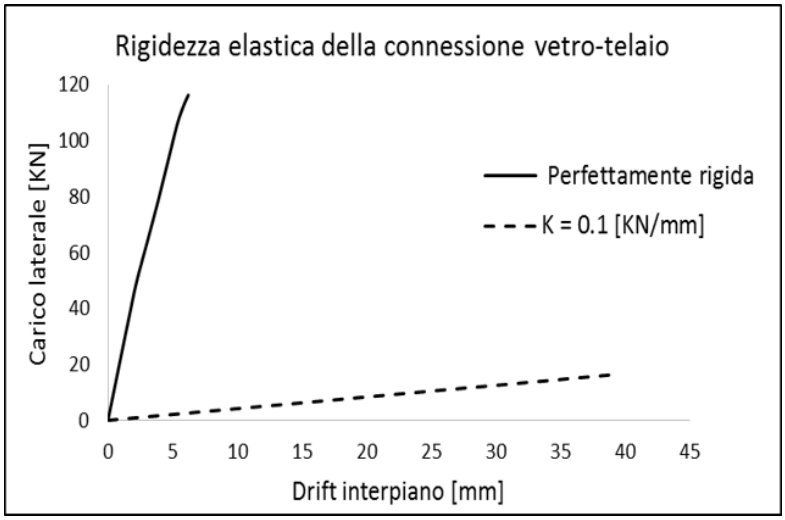


Figura 3.21: Risposta della facciata alla variazione del tratto rigido elastico della connessione vetro-telaio

L'analisi del tratto rigido-elastico della guarnizione siliconica, che collega vetro e telaio, è stata effettuata attribuendo una rigidezza elastica ai connettori Planar, in particolare sono stati assegnati due valori estremi di rigidezza: perfetta rigidezza (ottenuta applicando valori molto elevati al modello) e rigidezza molto bassa. Dai risultati ottenuti è chiaro come la connessione vetro-telaio influenza in modo significativo la risposta elastica della facciata. A supporto di tale osservazione è stata effettuata un'ulteriore analisi, applicando alla facciata diverse combinazioni tra le due connessioni:

[1] Connessione montante-traverso incastrata e connessione vetro-telaio perfettamente rigida;

[2] Connessione montante-traverso incernierata e connessione vetro-telaio perfettamente rigida;

[3] Connessione montante-traverso incastrata e connessione vetro-telaio flessibile;

[4] Connessione montante-traverso incernierata e connessione vetro-telaio flessibile.

I risultati ottenuti, riportati in figura 3.22, dimostrano che, per la facciata in questione, la connessione che maggiormente influenza la risposta iniziale del campione è la connessione vetro-telaio.

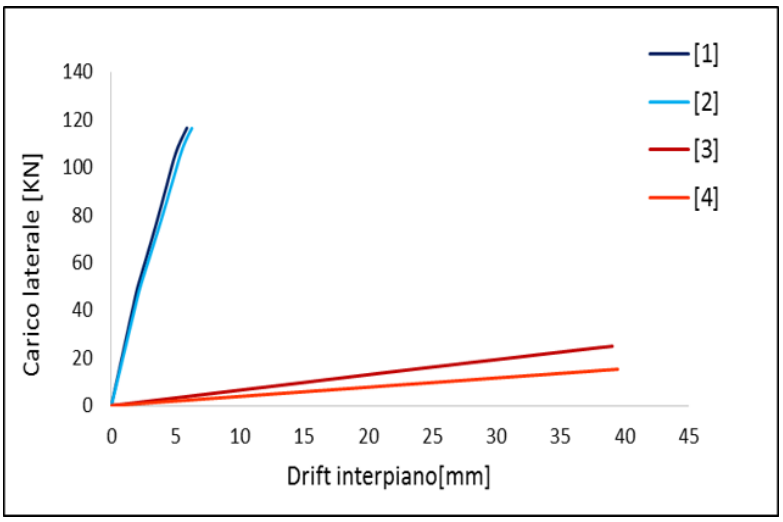


Figura 3.22: Possibili combinazioni tra le connessioni della facciata

Alla variazione della connessione montante-traverso, per un prefissato valore della connessione vetro-telaio, sia nel caso di connessione perfettamente rigida ([1]-[2]), che nel caso di connessione flessibile ([3]-[4]) , corrisponde una leggera variazione della risposta. Nel caso contrario, invece, è possibile osservate come, sia fissando la connessione montante-traverso incastrata ([1]-[3]) che incernierata ([2]-[4]), la riposta è fortemente influenzata dalla variazione della connessione vetro-telaio.

Forza di snervamento della guarizione

In figura 3.23 viene mostrato, invece, l'andamento della curva globale al variare della forza di snervamento della guarnizione, assegnata alla curva del connettore tra vetro e

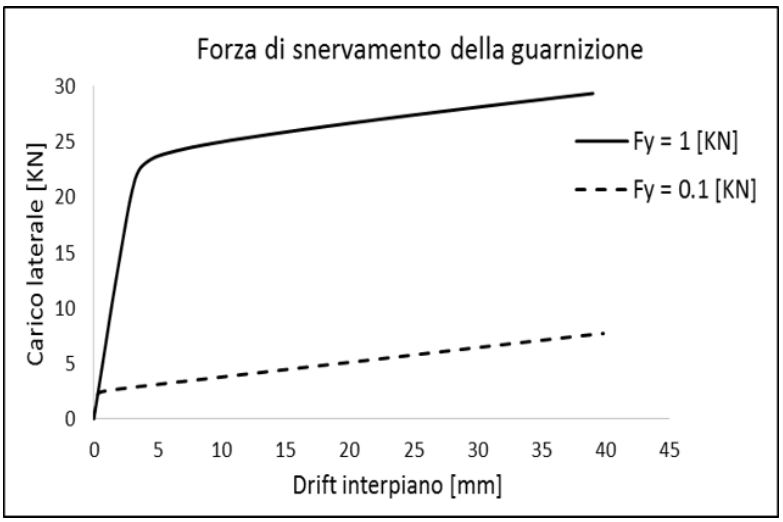


Figura 3.23: Risposta della facciata alla variazione della forza di snervamento della guarnizione

telaio. E' ben evidente come quest'ultimo sia il componente responsabile della risposta non lineare del campione. Le guarnizioni siliconiche durante la fase di carico sono soggette ad elevate deformazioni di taglio che, raggiunti i valori limite, causano l'annullamento del contributo alla rigidezza globale dell'attrito all'interfaccia tra pannelli di vetro e guarnizione.

Gap vetro - telaio

Gli ultimi due componenti analizzati riguardano il contributo dei pannelli di vetri alla rigidezza della facciata a seguito dell'impatto tra vetro e telaio, entrabi ottenuti modificando il comportamento della curva del connettore Planar. In particolare, in figura 3.24, si può osservare come al variare della distanza tra vetro e telaio vi sia lo spostamento sulla curva del punto in cui ha inizio l'incremento di rigidezza. Prima della chiusura del gap, infatti, i pannelli di vetro sono liberi di muoversi come corpi rigidi, in quanto la rotazione nel piano della facciata è libera [7]. Si può inoltre sottolineare che per valori elevati di gap , come ad esempio il valore utilizzato di 10 mm, nel campione analizzato, non si verifica l'impatto tra i pannelli di vetro e il telaio, in quanto sulla curva non viene registrato nessun aumento di rigidezza.

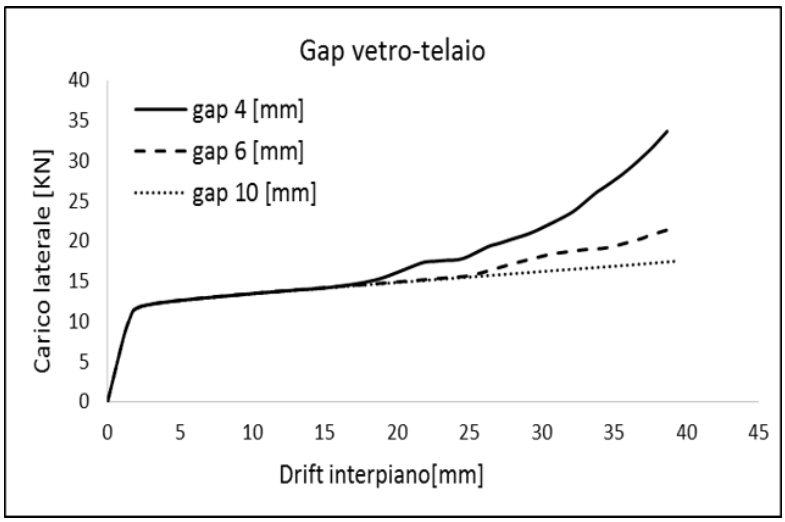


Figura 3.24: Risposta della facciata alla variazione del gap vetro-telaio

Rigidezza a seguito dell'impatto

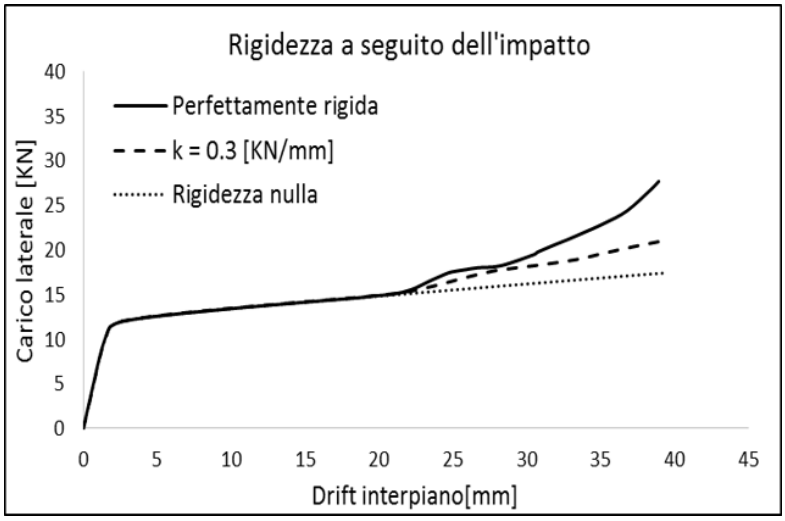


Figura 3.25: Risposta della facciata alla variazione della rigidezza locale a seguito dell'impatto

La figura 3.25, mostra, invece, come per un assegnato valore del gap, al variare della rigidezza locale dell'impatto la pendenza della rigidezza globale, attribuita al contributo dei pannelli di vetro, si modifica a sua volta. E' evidente che per un valore di rigidezza locale a seguito dell'impatto nullo, la curva non subisce variazioni.

Dopo aver analizzato la suscettibilità della struttura alla variazione di tali parametri è possibile sintetizzare affermando che:

- La rigidezza elastica della struttura è influenzata maggiormente dalla rigidezza iniziale della connessione vetro-scatolare, e limitatamente dalla geometria e dalla rigidezza rotazionale della connessione montante-traverso;
- Il comportamento non lineare della facciata è invece funzione della forza di snervamento della guarnizione;
- Il punto in cui avviene l'incremento di rigidezza nella parte finale della curva dipende dalla distanza vetro-scatolare, mentre l'entità dell'incrementi è legato al valore della rigidezza locale a seguito dell'impatto.

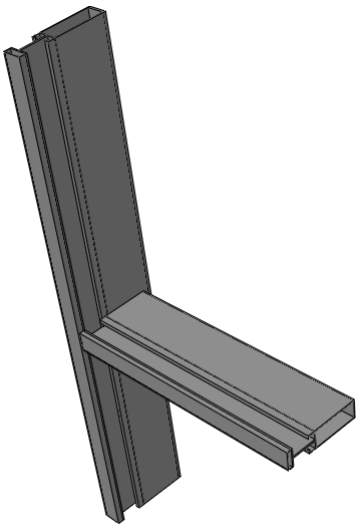
Le suddette valutazioni oltre ad evidenziare le componenti che maggiormente influenzano la risposta della facciata ad una forza orizzontale, sono stati di fondamentale importanza per la ricerca dei parametri di calibrazione, ottenuti attraverso la realizzazione di un modello tridimensionale per entrambe le connessioni.

3.3.2 Parametri di calibrazione

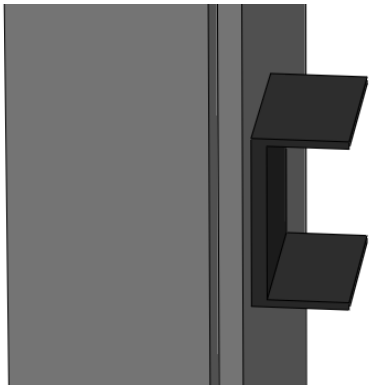
Montante-Traverso

Allo scopo di determinare il reale comportamento della connessione montante-traverso della facciata e quindi di estrapolare la curva Momento-Rotazione di calibrazione da assegnare al connettore di tipo 'Hinge' è stato realizzato un modello tridimensionale della connessione. Come è possibile osservare in figura 3.28, il modello in esame riproduce i tre elementi costituenti la connessione: un montante, un traverso e un giunto ad U in acciaio, detto 'cavallotto', collegate tra loro. La prima fase della modellazione ha previsto la creazione delle tre parti. In particolare, per quanto riguarda la geometria da assegnare a montante e traverso, non essendo la facciata in esame costituita da moduli regolari, si è scelto un modulo di riferimento considerando di esso l'interpiano e metà lunghezza del traverso. Tale semplificazione è stata poi compensata assegnando delle curve di rigidezza

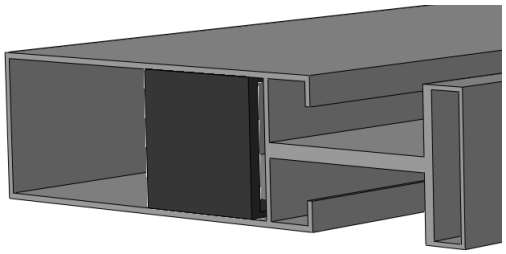
variabile a seconda delle dimensioni degli elementi collegate dal connettore all'interno del modello globale.



(a) Montante-Traverso



(b) Montante-Cavallotto



(c) Traverso-Cavallotto

Figura 3.26: Modellazione tridimensionale della connessione Montante-Traverso

Per il cavallotto, invece, si è scelto di modellarlo come elemento unico trascurando l'influenza dei bulloni. Dopo aver assemblato i vari elementi, si è proceduto collegando l'anima del cavallotto al montante e le ali al traverso per mezzo della definizione di un 'Tie Constraint', vincolo che permette la connessione di due regioni anche se la mesh dei due elementi è dissimile [16]. L'ultima fase di modellazione è stata l'aggiunta dell'acciaio all'elenco dei materiali utilizzati per il modello globale, i cui parametri sono riportati in tabella 4.1.

Materiale	Modulo di Young $[MPa]$	Coefficiente di Poisson	Tensione di snervamento $[MPa]$	Deformazione plastica allo snervamento	Tensione ultima $[MPa]$	Deformazione plastica a rottura
Acciaio S235	209000	0,3	235	0	360	0,22

Tabella 3.2: Parametri assegnati all'acciaio

L'analisi del modello è stata effettuata applicando una legge di spostamento verticale all'estremità del traverso e incastrando tutti i nodi alle estremità superiore e inferiore del montante, seguendo le procedure descritte per la modellazione globale.

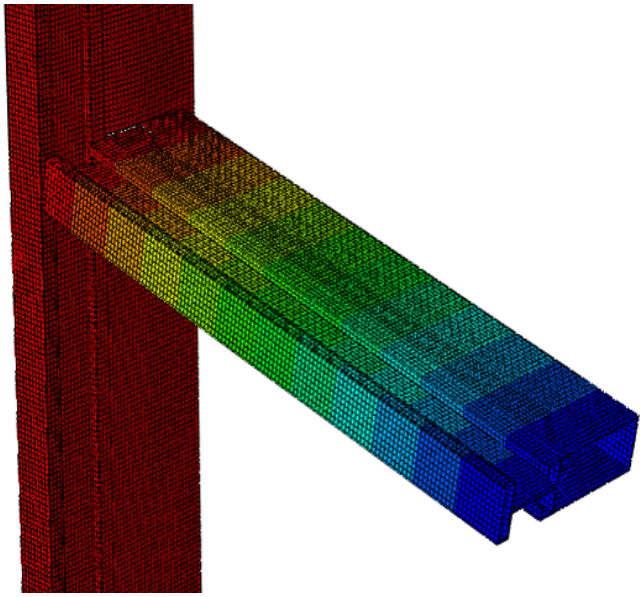
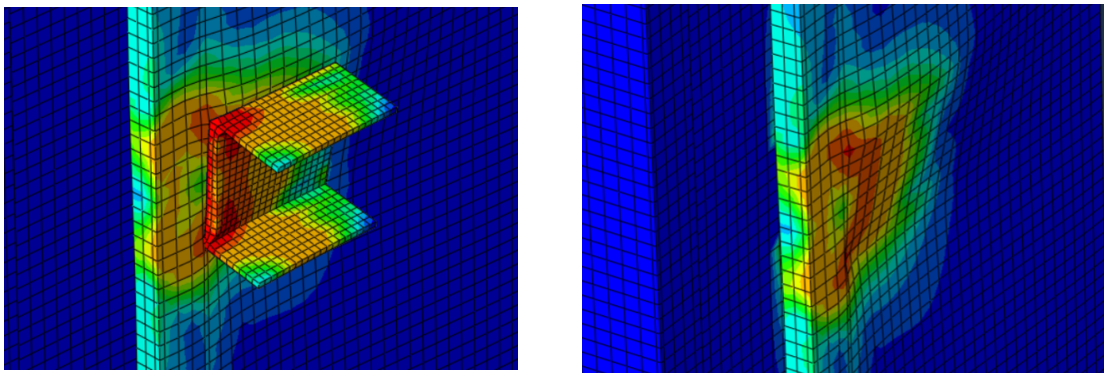


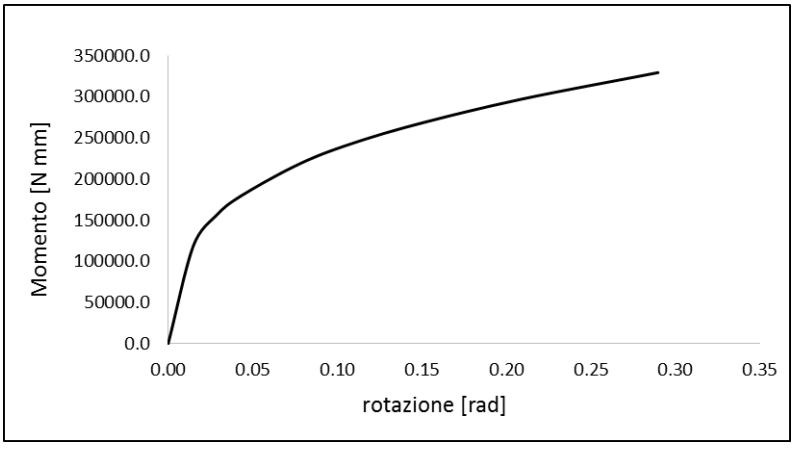
Figura 3.27: Spostamento verticale della connessione

Poichè Abaqus non consente, però, di estrapolare direttamente come variabile il momento risultante, per ottenere il grafico momento-rotazione della connessione è stato necessario utilizzare una strategia alternative. È stato calcolato il carico totale verticale imposto dallo spostamento all'estremità del traverso come sommatoria delle reazioni verticali di tutti i nodi incastrati, tale valore è stato poi moltiplicato per la lunghezza del traverso in modo da ottenere il momento trasmesso dalla connessione. Mentre le rotazioni plastiche sono state calcolate creando un 'Reference Point' all'interno del cavallotto e

vincolando ad esso, attraverso da definizione di un 'MPC Constraint', vincolo che lega il movimento dei nodi slave di una determinata regione al moto di un singolo punto [16], la rotazione delle facce interne del cavallotto. Così facendo è stato possibile calcolare la rotazione della connessione come rotazione del 'Refernce Point' [31]. Dalla combinazione delle due variabili estrapolate è stata infine definita la curva 'Yield Moment-Plastic motion' riportata in figura 3.28c.



(a) (b)



(c)

Figura 3.28: Connessione Montante-Traverso: deformazione del cavallotto (a), deformazione del montante (b), curva Momento-Rotazione (c)

Come accennato precedentemente, il risultato ottenuto è stato assegnato ai connettori cerniera effettuando una variazione di $\pm 20\%$ della curva plastica a seconda della geometria degli elementi collegati dal connettore in relazione a quella utilizzata nel modello

tridimensionale dettagliato. I valori utilizzati vengono riportati in figura 3.29.

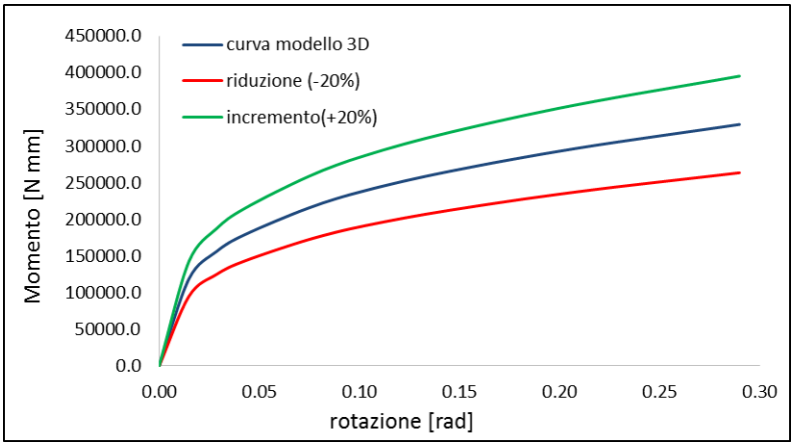


Figura 3.29: Variazione della curva Momento-Rotazione

La deformazione presente nel modello al seguito dell'analisi conferma la valutazione fatta in merito alla minore partecipazione della connessione montante-traverso alla resistenza della facciata, rispetto alla connessione vetro-telaio. Come è possibile osservare, nelle figure 3.28a e b, infatti, il cavallotto ruota quasi rigidamente e la deformazione è maggiormente concentrata sul profilo in alluminio e limitatamente sull'anima del giunto in acciaio, mentre le due ali sembrano non apportare resistenza al moto.

Interazione Vetro-Telaio

Come per la connessione Montante-Traverso, anche per la determinazione della curva plastica di interazione Vetro-Telaio da assegnare al connettore di tipo Planar è stato realizzato il modello 3D della connessione, riportato in figura 3.30.

E' possibile riconoscere da 4 parti distinte: un montante/traverso, un pannello di vetro e due strati di guarnizione in gomma siliconica che scorrono lungo le due facce del vetro al contatto con il telaio. La prima fase della modellazione ha previsto la creazione delle parti costituenti la connessione. In particolare, per quanto riguarda la definizione della geometria anche in questo caso si è scelto un modulo di riferimento. La scelta è stata effettuata considerando il modulo reale che più si avvicina alle dimensioni medie che

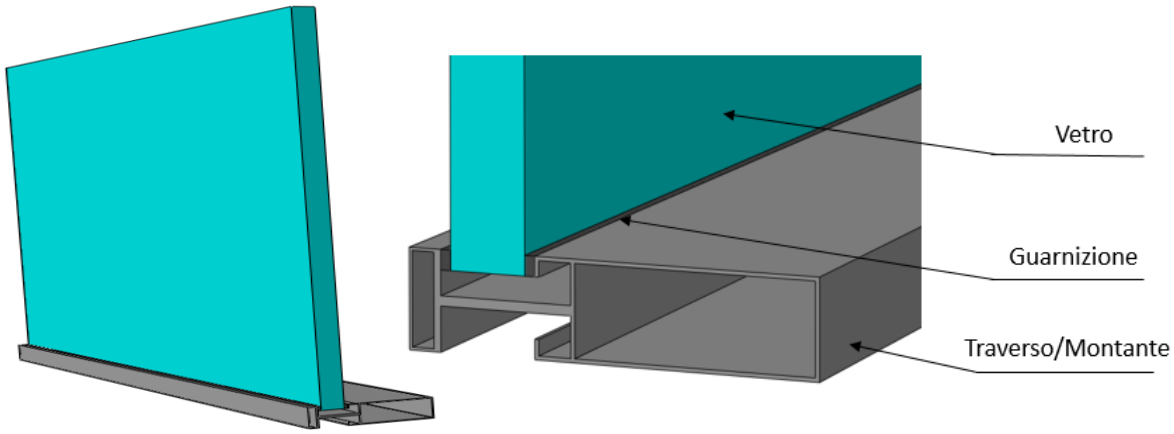
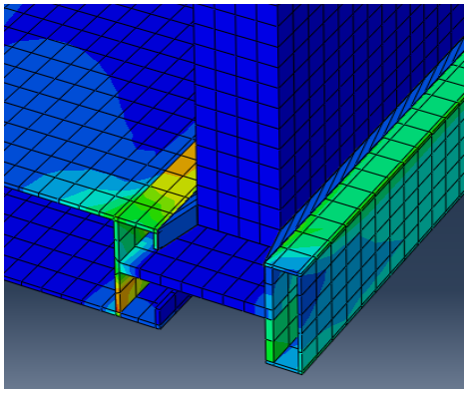


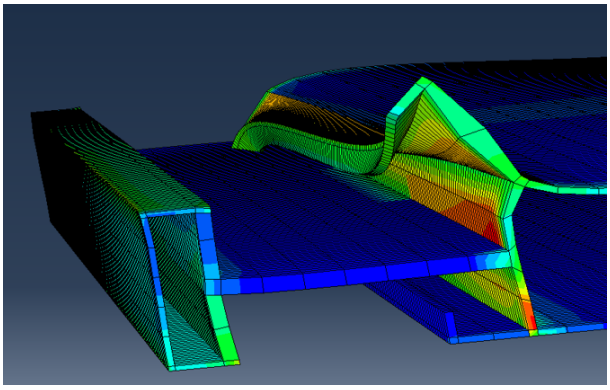
Figura 3.30: Modellazione tridimensionale della connessione Vetro-Telaio

i pannelli avrebbero se fossero tutti uguali. Tale semplificazione consente di ottenere un comportamento globale della facciata in termini di interazione vetro-telaio compensando tra loro gli scorrimenti dei pannelli di dimensioni maggiori e minori rispetto a quelle del vetro di riferimento, pertanto è stata poi assegnata la medesima curva a tutte le connessioni all'interno del modello globale. I vari elementi sono stati collegati tra loro attraverso la creazione di un 'Tie Constraint' lungo le superfici a contatto. L'analisi è stata effettuata applicando un carico di tipo 'Displacement' al pannello di vetro, impedendone gli spostamenti fuori-piano in modo da riprodurre le condizioni di prova e incastrando tutti i nodi alla base del montante/traverso. La definizione del materiale da assegnare alla gomma siliconica è stata utilizzata, invece, come strategia di calibrazione del modello. Dal momento che le varie analisi effettuate hanno evidenziato che la connessione che maggiormente influenza il comportamento della facciata è l'interazione vetro-telaio, fissato il comportamento delle varie connessioni a cerniera, è stata attribuita una curva tensione-deformazione alla guarnizione, ottenuta attraverso analisi iterative successive. Tale curva ha dovuto cogliere i quattro aspetti analizzati del comportamento di interazione tra vetro e scatolare: la rigidezza iniziale della connessione, lo snervamento della guarnizione, il gap tra vetro e telaio e l'irrigidimento locale a seguito dell'impatto. La calibrazione fatta sarà fondamentale per valutare successivamente quanto l'inserimento dell'attuatore in SMA modifichi il comportamento della connessione, consentendo di applicare le modifiche sullo stesso modello. Così procedendo è stata estrapolata lungo la superficie a contatto

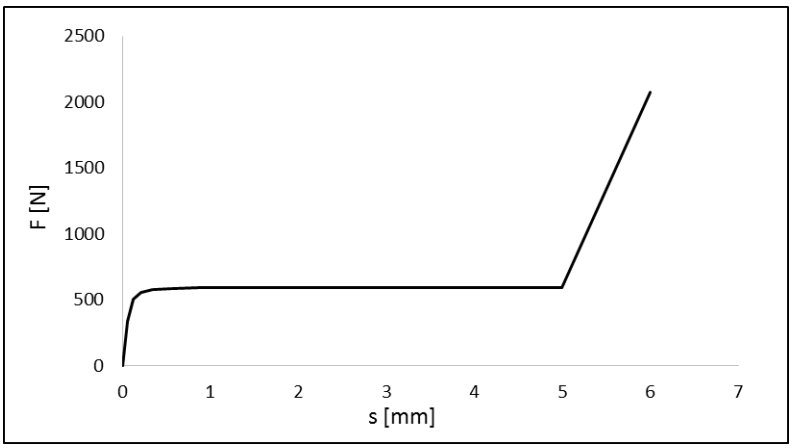
vetro-guarnizione la curva 'Yield Force-Plastic Motion' riportata in figura 3.31c.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.31: Interazione Vetro-Telaio: deformazione globale della connessione (a), deformazione del montante/traverso (b), curva Forza-spostamento (c)

E' possibile osservare che la curva coglie simultaneamente la rigidezza iniziale della connessione, lo snervamento della guarnizione tra le facce a contatto di vetro e telaio e il successivo incremento di rigidezza a seguito dell'impatto una volta superata la distanza tra i pannelli di vetro e telaio.

L'inserimento nel modello globale di tale curva, ripartita tra i tre connettori presenti lungo ogni lato del vetro a contatto con il telaio, ha consentito di riprodurre il comportamento sperimentale del campione.

Di seguito vengono analizzati i parametri di calibrazione, ottenuti tramite le modellazioni

3D, in relazione ai risultati della campagna di analisi descritta precedentemente, al fine di caratterizzare i reali meccanismi della facciata.

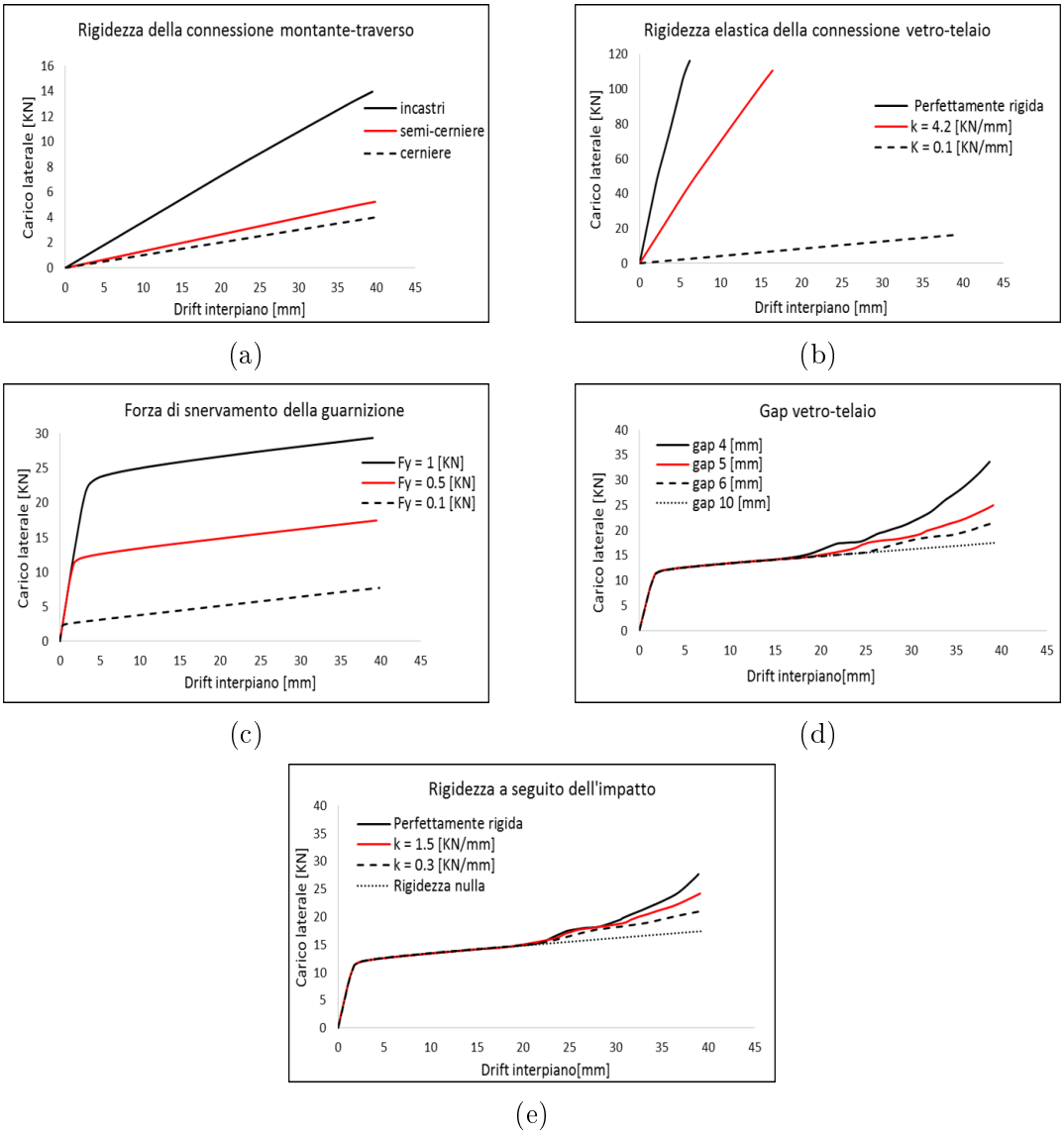


Figura 3.32: Inquadratuta dei parametri di calibrazione all'interno delle analisi condotte sulla facciata

In base ai risultati ottenuti, evidenziati in figura 3.32 tramite le curve in rosso, è possibile affermare che:

- la connessione tra montanti e traversi, presente all'interno della facciata, è caratte-

rizzata da un comportamento flessibile di semi-cerniera;

- la connessione tra vetro e telaio è inizialmente molto rigida fino ad assumere un comportamento non lineare a causa dello snervamento della guarnizione.
- l'incremento di rigidezza si verifica dopo la chiusura del gap di 5 mm, con un valore abbastanza elevato di rigidezza locale coinvolta nell'impatto tra vetro e telaio;

3.4 Estrapolazione dei risultati, analisi e confronti

In seguito alla modellazione del campione, sopra descritta, e alla successiva calibrazione delle connessioni presenti all'interno del modello, è stata estrapolata la curva Forza-drift interpiano della facciata. In figura 3.33 è possibile osservare i risultati ottenuti dalle analisi in forze e in spostamenti, le due procedure non hanno evidenziato sostanziali differenze in termini di risposta globale, tuttavia l'analisi in spostamenti è risultata più vantaggiosa in termini di velocità di convergenza delle analisi, ragion per cui è stata adottata nelle simulazioni successive.

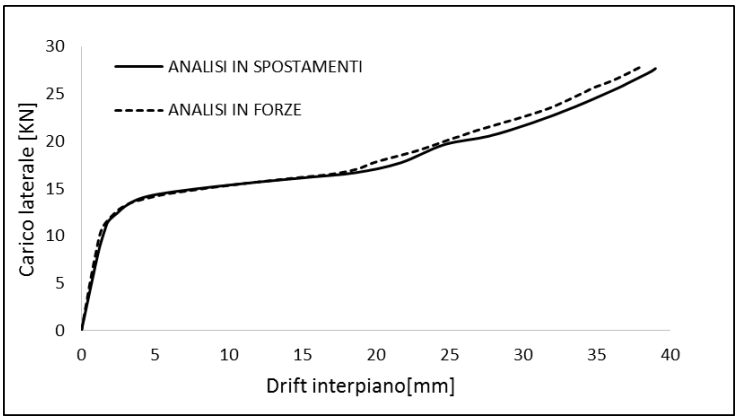


Figura 3.33: Confronto tra i risultati dell'analisi in forze e in spostamenti

Il confronto tra l'analisi FEM e i risultati sperimentali, riportato in figura 3.34, mostra una buona compatibilità tra la curva del modello numerico e quella sperimentale.

Per quanto riguarda invece il comportamento dei pannelli di vetro, da un'analisi di distribuzione delle tensioni è emersa, come era intuibile aspettarsi, una concentrazione di

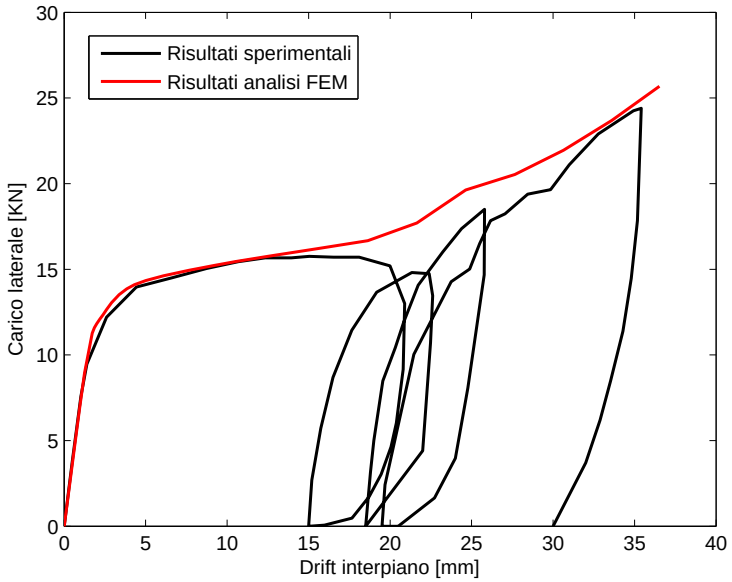


Figura 3.34: Confronto tra risultati numerici e sperimentali

sforzi agli spigoli, con valori massimi in corrispondenza del pannello più grande durante l'ultima fase dell'analisi pushover, come riportato in figura 3.35.

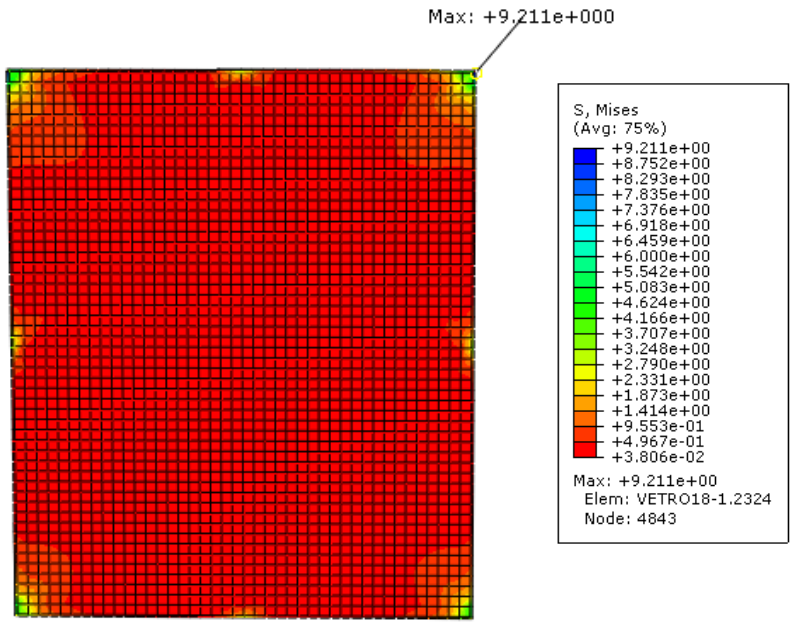


Figura 3.35: Distribuzione delle tensioni sul pannello di vetro all'ultimo step della pushover [MPa]

In ultima istanza, i parametri di modellazione e i risultati ottenuti sono stati confrontati con valori ottenuti da modellazioni differenti dello stesso campione, riportati nell'articolo 'Seismic assessment and finite element modelling of glazed curtain walls' [Caterino et al. 2016] [7]. Viene sottolineato che a causa della differente strategia di modellazione utilizzata non tutte i parametri di modellazione possono essere confrontati, ma laddove è possibile il confronto risulta essere abbastanza soddisfacente, come si può osservare in tabella 3.3 e in figura 3.36.

	Modellazione FEM utilizzata	Modellazione FEM Caterino et al.
Connessione Montante-Traverso	Flessibile (cerniera parziale)	Flessibile (cerniera)
Numero di link utilizzati	630	676
Rigidezza locale a seguito dell'impatto	1,5 KN/mm	5 KN/mm
Distanza Vetro-Telaio	5 mm	5 mm
Rigidezza elastica guarnizione	4,2 KN/mm	7 KN/mm
Forza di snervamento guarnizione	0,5 KN	0,5 KN

Tabella 3.3: Confronto tra i parametri utilizzati e quelli riportati in Caterino et al.

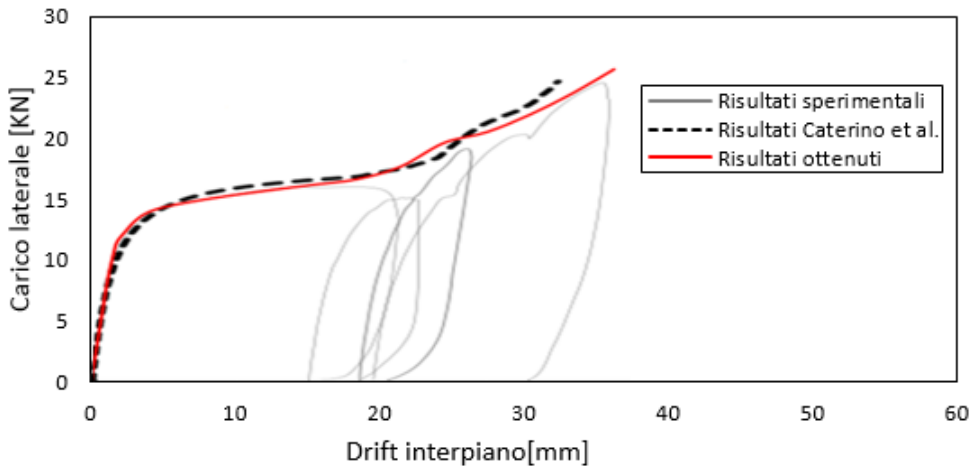
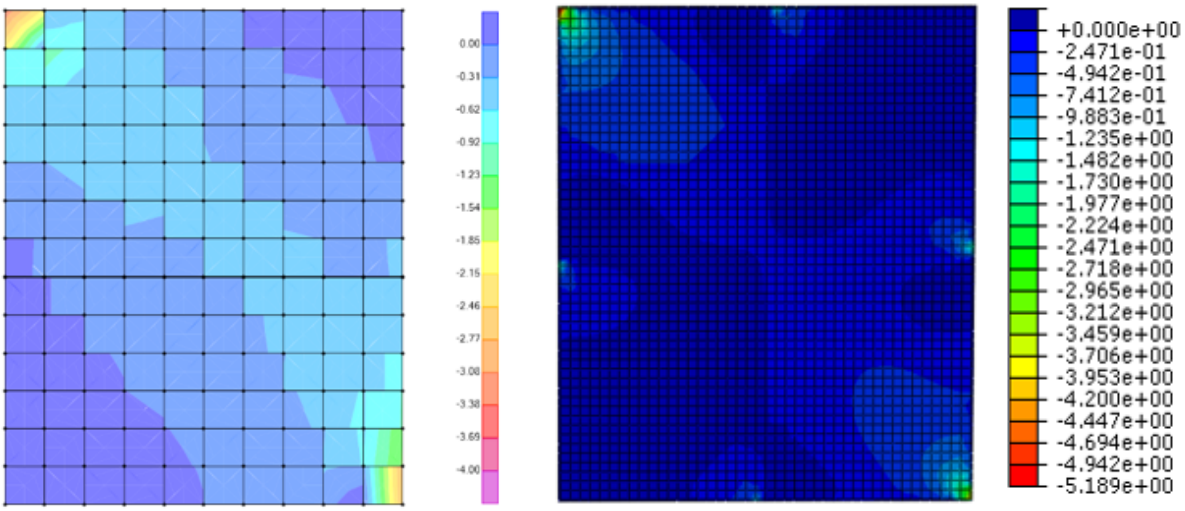


Figura 3.36: Confronto tra la curva ottenuta e quella riportata in Caterino et al.

Dal confronto tra le due curve di modellazione è possibile osservare che il modello utilizzato, grazio all'inserimento delle curve plastiche, consente di seguire più dettagliatamente l'andamento della curva sperimentale. Nella fase finale, inoltre, l'utilizzo di un

valore di rigidezza locale a seguito dell'impatto minore, ha permesso di cogliere meglio la risposta della facciata. Una buana compatibilità dei risultata è stata ottenuta anche dal confronto della distribuzione delle tensioni di compressione lungo il pannello di vetro più grande della facciata, riportato in figura 3.37.



(a) (b)

Figura 3.37: Tensione di compressione all'ultimo step della pushover: Caterino et al. (a), modello in esame (b), valori in [MPa]

In entrambi i casi è facilmente riconoscibile il puntone di compressione lungo la diagonale principale del pennello di vetro. I valori massimi di tensione sono tra loro molto simili, infatti il panello di figura 5.9a raggiunge una massima tensione di compressione di circa 4 MPa, mentre quello di figura 5.9b di circa 5.19 MPa, e comunque entrambe piuttosto basse se confrontata con i valori tipici di progetto dei vetri (20 $\div$ 75 MPa) [7]. Dai risultati ottenuti in entrambi i modelli, però, non si riesce a spiegare la rottura sperimentale del vetro durante la fase di scarico mostrata in figura 2.3b. Una probabile spiegazione potrebbe essere ricondotta al fatto che durante la fase di scarico diminuisce il confinamento tra vetro e telaio, che non risulta più in grado di preservare la stabilità del pannello.

Capitolo 4

Shape Memory Alloys (SMA)

4.1 Definizione

Il termine 'Shape Memory Alloys' indica una famiglia di materiali metallici con caratteristiche peculiari, non presenti nei tradizionali materiali di uso comune nell'ingegneria civile [19] [20]. Tra le quali se ne distinguono due in particolare:

- **superelasticity**, capacità di recuperare elevate deformazioni (dell'ordine del 10%) durante cicli di carico-scarico, senza sviluppare fenomeni di plasticizzazione;

- **shape-memory effect (SMA)**, capacità di riacquistare una determinata forma geometrica originale, impressa attraverso dei cicli termici [21].

Entrambe queste proprietà possono essere associate a una trasformazione di fase indotta sul materiale mediante variazioni di temperatura o di stati di sforzo. Le SMA, infatti, subiscono una trasformazione di fase cristallina quando passano dalla loro configurazione più stabile ad alta temperatura *Austenite*, alla configurazione a più bassa energia e temperatura *Martensite*. Quest'ultima può presentarsi in diverse forme cristallografiche equivalenti dette varianti.

4.2 Cenni storici

Le prime osservazioni del fenomeno risalgono al 1932. Due ricercatori, Chang e Read, studiando una lega AuCu, notarono la reversibilità della trasformazione sulla base di osservazioni metallografiche e di variazione di resistenza del materiale [22]. Un comportamento analogo fu osservato anche in una lega CuZn (ottone) al Massachusetts Institute of Technology nel 1938, ma il riconoscimento ufficiale delle leghe a memoria di forma si ebbe solo nel 1962, anno in cui Buenler [23] e i suoi collaboratori presso i laboratori del NOL (U.S. Naval Ordnance Laboratory) scoprirono casualmente la leghe a memoria di forma NiTi, avviando così i primi studi su questa classe di materiali. Nei decenni successivi si sviluppò sempre di più l'interesse, sia scientifico che commerciale, per questo tipo di leghe, che iniziarono ad essere impiegate in svariati settori: dalla meccanica all'ingegneria chimica, dalla medicina all'idraulica, dall'industria aerospaziale a quella automobilistica. Il merito di tutto questo successo è legato certamente alle loro proprietà. Alle più importanti, sopra citate, si aggiungono la capacità di smorzare le vibrazioni, di rientramento e il vantaggio di essere materiali progettabili e dunque adattabili alle più svariate richieste. A partire dagli anni '80 questi materiali sono stati analizzati sempre più approfonditamente al fine si comprendere i meccanismi che presiedono alla complessa trasformazione che li caratterizza, detta trasformazione martensitica [24].
Esistono differenti leghe che presentano proprietà 'shape memory', ma tra tutte le più interessanti e utili dal punto di vista applicativo si sono rivelate quelle del gruppo NiTi e Cu. Le prime possiedono migliori proprietà di memoria di forma (fino al 10% contro il 5% di quelle a base di rame), sono più stabili termicamente e hanno una buona resistenza alla corrosione e a fatica. Presentano inoltre buone proprietà elettriche e meccaniche. Tale composto possiede caratteristiche tali da poter essere attivato elettricamente per effetto Joule, cioè quando una corrente lo attraversa si genera sufficiente calore da indurre la trasformazione di fase. Le seconde, invece, possono essere fuse con più facilità e sono caratterizzate da un più ampio intervallo di trasformazione, oltre ad essere meno costose, motivo per il quale negli ultimi anni si è assistito a un loro notevole sviluppo. Viene di seguito riportato un confronto tra le proprietà più importanti di queste due tipologie di

leghe [24]:

Proprietà	NiTi (48-52%Ni)	CuAlNi (10-14%;2-5%Ni)	CuZnAl (15-30%Zn;3-7% Al)
Temp. Fusione [$°C$]	1300	650÷1020	1020÷1100
Densità [g/cm^3]	6,45	7,64	11÷13
Resistività [$\mu\Omega * cm^3$]	Austenite=-100 Martensite=-70	8,5÷9,7	11÷13
Conduttività [W/cm*$°C$]	Austenite=18 Martensite=8,5	120	30÷43
Capacità termica [J/Kg*$°C$]	837	400	373÷574
Modulo Young [GPa]	Austenite=70÷100 Martensite=28÷41	Fase Beta=72 Martensite=70	Fase Beta=85 Martensite=80
Limite snervamento [MPa]	Austenite=200÷700 Martensite=70÷150	Fase Beta=350 Martensite=80	Fase Beta=400 Martensite=80
Tensione ultima [MPa]	900÷1900	600	500÷800
Temp. Trasformazione [$°C$]	-200÷110	≤120	≤200
Shape Memory Strain	MAX 8,5%	4%	4%
Isteresi Termica [$°C$]	01/12/50	15/25	15/20

Tabella 4.1: Confronto tra le proprietà delle principali leghe a memoria di forma

4.3 Trasformazione di fase e temperature caratteristiche

Come accennato in precedenza, alla base del comportamento macroscopico delle leghe a memoria di forma vi è il processo che permette la trasformazione di fase da Austenite a Martensite, detta trasformazione martensitica termoelastica. La trasformazione martensitica si realizza tra due fasi ben distinte che prendono il nome di fase austenitica, stabile ad alte temperature, e fase martensitica, stabile alle basse temperature. E' una trasformazione del primo ordine, ovvero con cessione di calore ed isteresi termica associata alla trasformazione stessa ed esiste un intervallo di temperatura entro cui si ha coesistenza delle due fasi [26]. Ciò che rende interessante la trasformazione di fase delle leghe a memoria di forma è il fatto che le trasformazioni martensitiche sono generalmente trasformazioni dislocative, il che consente di avere una diversa fase cristallina senza cambiamento della composizione chimica in quanto, a differenza delle trasformazioni diffusive,

non richiede spostamenti atomici elevati. Come si può osservare in figura 4.1, infatti, il progredire della trasformazione da austenite e martensite all'interno del materiale avviene lungo un'interfaccia che interessa solamente un piano di atomi alla volta, pertanto ad un singolo atomo è richiesto uno spostamento tale da non generare la rottura dei legami chimici.

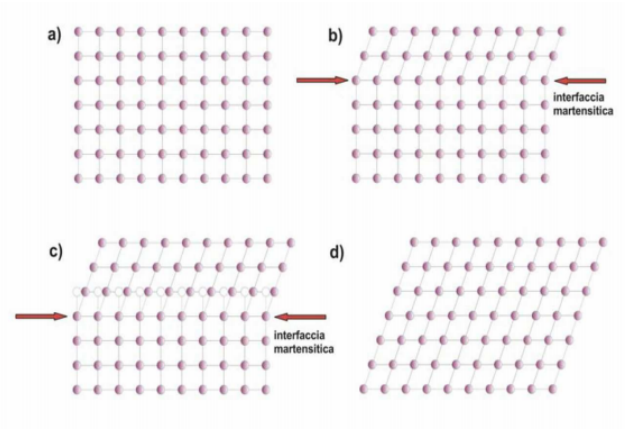


Figura 4.1: Schematizzazione bidimensionale della trasformazione di fase da Austenite a Martensite

Tuttavia, la martensite che si viene a formare da questo tipo di trasformazione può presentare forma e volume diversi da quelli della fase genitrice austenitica. Ragion per cui è necessaria una fase di accomodamento della nuova struttura all'interno del materiale. Tale accomodamento è realizzabile attraverso due meccanismi: slittamento atomico, o slip, e geminazione, o twinning. Entrambi consentono al materiale di assumere la stessa forma macroscopica della fase genitrice conservando però la struttura martensitica appena formata, senza cioè modificare i parametri cristallografici. Con la differenza che lo slittamento atomico è un processo permanete, tipico degli acciai, poichè modifica in maniera irreversibile la microstruttura del materiale, attraverso la rottura e lo slittamento dei legami, invece la geminazione è un processo reversibile ed è tipico delle leghe a memoria di forma caratterizzate dunque dalla reversibilità della trasformazione. La geminazione avviene attraverso un moto degli atomi affacciati ad un piano caratteristico, detto bordo di geminazione, o twin boundary. Tale piano, come si puo' notare dalla figura 4.2, è un

piano di simmetria perfettamente speculare.

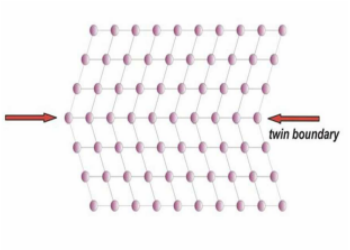


Figura 4.2: Rappresentazione schematica di un bordo di geminazione (twin boundary)

Poichè gli atomi di questo piano presentano lo stesso numero e lo stesso tipo di legami degli atomi non appartenenti al piano, il twin boundary risulta essere un'interfaccia ad energia molto bassa e con elevata mobilità. Ciò comporta che, per effetto di una sollecitazione la microstruttura del materiale si disponga secondo una variante predefinita, ossia quella la cui orientazione è più sfavorevole nel confronti dello sforzo applicato. Come è visibile in figura 4.3, l'applicazione di uno sforzo, come ad esempio uno sforzo di taglio, produce coalescenza delle diverse varianti in una singola variante, e il fenomeno prende il nome di degeminazione o detwinning, ciò comporta un cambiamento di forma macroscopico.

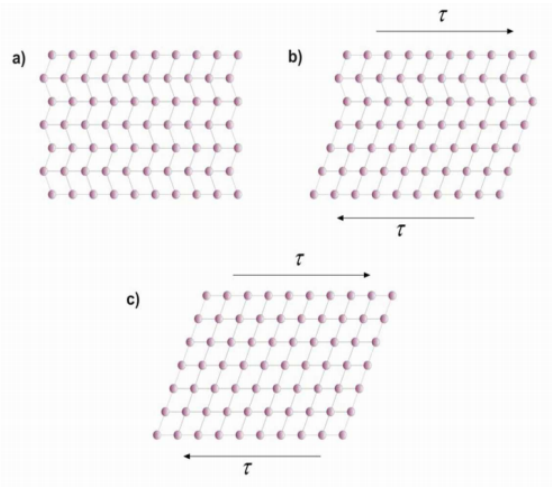


Figura 4.3: Cambiamento macroscopico nella forma geometrica a causa di uno sforzo di taglio

Tale comportamento insieme alla variabilità della geminazione consentono, a seguito di un riscaldamento, alle varianti della martensite a simmetria inferiore rispetto al quella relativa alla fase austenitica di trasformarsi nella forma di partenza. Tale fenomeno è alla base dell'effetto di memoria di forma [24]. La trasformazione martensitica può essere indotta o da una variazione di temperatura o da una variazione di carico. Per comprendere il ruolo di questi fattori nella trasformazione si fa riferimento al grafico in figura 4.4, in cui è possibile riconoscere un ciclo di isteresi dove individuare le fasi del materiale e le temperature caratteristiche:

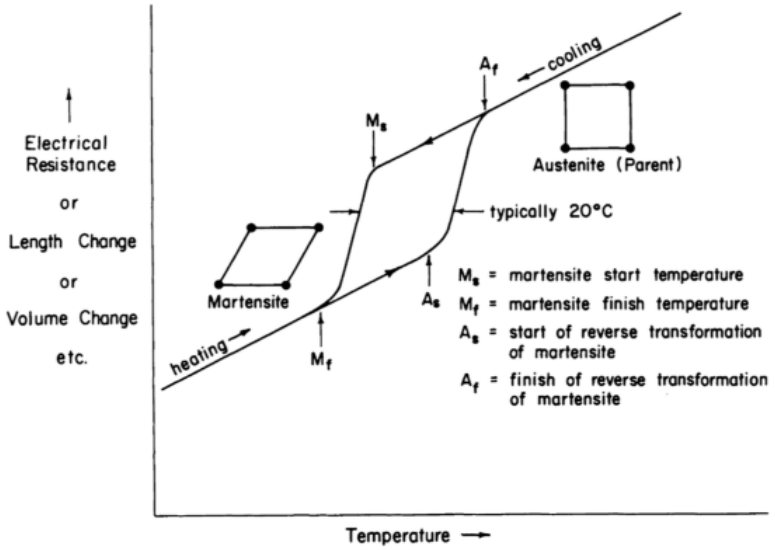


Figura 4.4: Variazione delle proprietà delle SMA in funzione della temperatura

- A_s o *Austenite Start*, temperatura di inizio trasformazione da martensite a austenite in riscaldamento;
- A_f o *Austenite Finish*, temperatura di fine trasformazione da martensite a austenite in riscaldamento;
- M_s o *Martensute Start*, temperatura di inizio trasformazione da austenite a martensite in raffreddamento;

- M_f o *Martensite Finish*, temperatura di inizio trasformazione da austenite a martensite in raffreddamento.

Queste temperature possono cambiare in intervalli più o meno ampi e anche la grandezza dell'isteresi dipende dal tipo di lega, generalmente nelle leghe a memoria di forma i valori sono compresi tra 20°C e 40°C. Oltrepassanti i punti di trasformazione da una fase all'altra si verifica anche un'importante variazione delle proprietà del materiale dal momento che le caratteristiche fisiche di austenite e martensite sono tra loro molto differenti. Ad esempio, una proprietà che cambia in modo significativo è la resistenza allo snervamento. La struttura martensitica, infatti, può deformarsi spostando i twin boundaries, che sono particolarmente mobili, mentre la struttura austenitica può trasformarsi solo attraverso fenomenti dislocativi. Ragion per cui la resistenza allo snervamento della martensite è inferiore di quella dell'austenite. Solo una certa quantità di deformazione martensitica può essere assorbita, superata la quale il materiale si deforma prima elasticamente e poi plasticamente, come mostra la prova di trazione in figura 4.5.

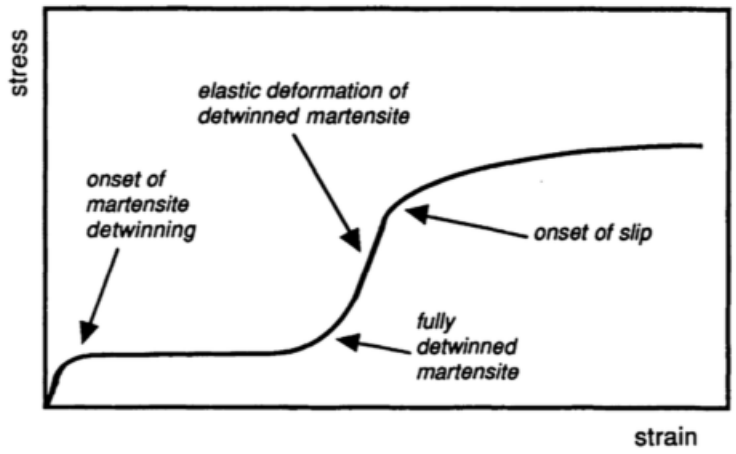


Figura 4.5: Curva tensione-deformazione di un materiale con martensite

Le proprietà meccaniche di una lega a memoria di forma sono, inoltre, influenzate dalla temperatura a cui essa si trova. All'inteno del grafico di figura 4.6 è possibile analizzare l'andamento tensione-deformazione al variare della temperatura a cui è sottoposto un provino di materiale:

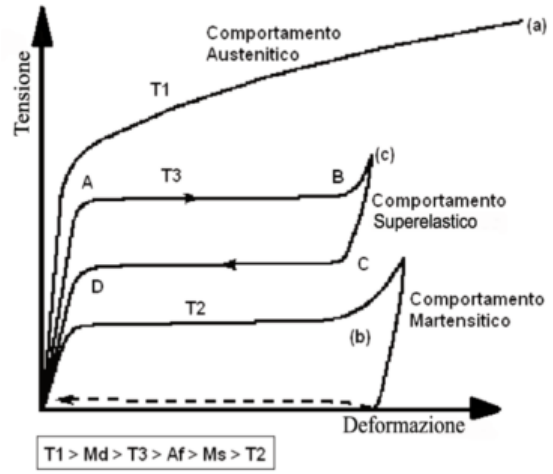


Figura 4.6: Comportamento di una lega a memoria di forma in funzione della temperatura

- per T $< M_f$ il provino è facilmente deformabile, scaricando il provino a questa temperatura rimane una deformazione residua recuperabile portando la temperatura a valori maggiori di A_f, trasformando così la martensite in austenite.

- per $A_f <$ T $< M_d$, dove M_d è la temperatura di trasformazione tra la fase superelastica e quella austenitica, si manifesta il fenomeno della superelasticità.

- per T $> M_d$ non è possibile nessun recupero di forma, la fase austenitica mostra una normale deformazione plastica dopo aver superato il punto di snervamento come un classico metallo [27].

4.4 Memoria di forma e Superelasticità

Le proprietà più importanti di questa leghe, come già affermato, sono la l'effetto memoria di forma e la suerelasticità. L'effetto memoria di forma, ovvero la capacità del materiale di ritornare spontaneamente nella forma macroscopica originaria, deriva sostanzialmente da un concetto di tipo geometrico. Essendo, infatti, la martensite una fase a simmetria minore rispetto a quella austenitica, essa può deformasi in diversi modi, ma la trasformazione opposto ha solamente una possibilità di ritorno nella struttura auste-

nitica. Nel passaggio dalla fase austenitica a quella maetensitica il mantenimento delle caratteristiche dimensionali, ottenuto tramite il processo di accomodamento, comporta la disposizione del materiale in strati con varianti ad orientamento alternato del reticolo. Dall'esempio riportato in figura 4.3 si può infatti notare come l'applicazione di una sollecitazione esterna può generare differenti tipologie di varianti martensitiche. Se però il metariale viene portato ad una temperatura adeguata, in modo da attivare la trasformazione nella fase austenitica, vi sarà solamente una tipologia di struttura austenitica disponibile in cui trasformarsi. Pertanto possiamo affermando che le SMA esibiscono l'effetto memoria di forma quando, dopo essere state deformate nella fase martensitica e quindi scaricate ad una temperatura al di sotto di A_s e poi riscaldate a una temperatura superiore ad A_f, recuperano la loro forma originaria ritornando nella fase austenitica genitrice (figura 4.7) [28].

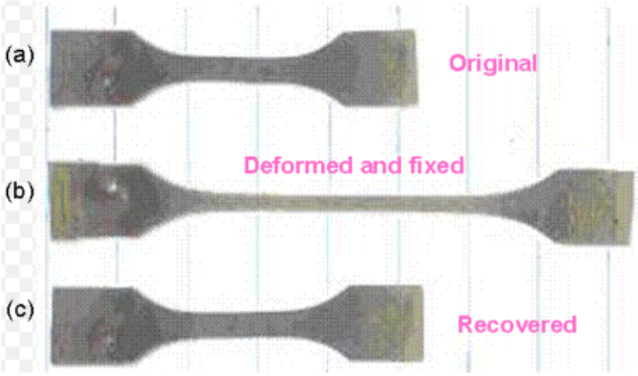
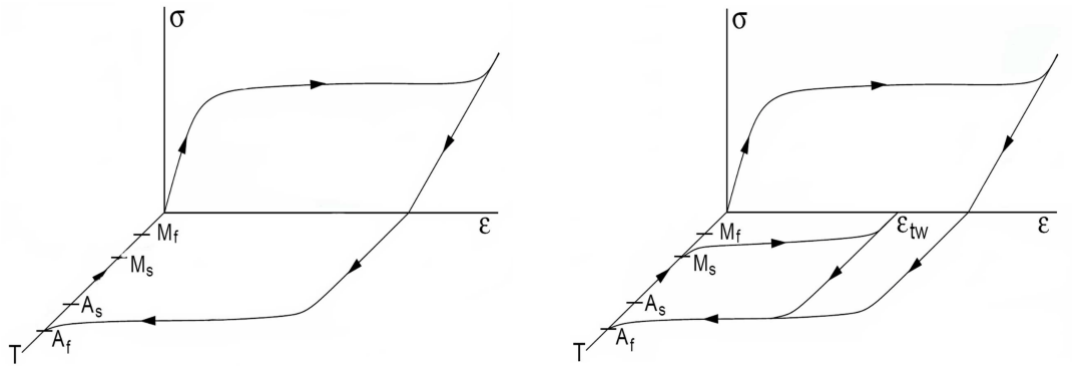


Figura 4.7: Effetto memoria di forma su una placchetta in SMA

La temperatura alla quale la lega "ricorda" la sua forma originaria può essere modificata o variandone la composizione o attraverso trattamenti termici specifici. Possiamo inoltre fare una distinzione tra effetto di memoria di forma a una via oppure a due vie, nel primo caso, come mostrato in figura 4.8a, l'effetto a memoria di forma si ha solamente una volta dal passaggio dalla fase martensitica a quella austenitica, raffreddando il provino non si avranno cambiamenti di forma a livello macroscopico; nel secondo caso, invece, una volta ottenuta la fase austenitica se il provino viene raffreddato si genera una

nuova deformazione recuperabile con un secondo riscaldamento (figura 4.8b).



(a) (b)

Figura 4.8: Effetto della memoria di forma: ad una via *One Way Shape Memory Effect, OWSME* (a), a due vie *Two Ways Shape Memory Effect, TWSME* (b)

La superelasticità, invece, è la capacità del materiale di recuperare completamente deformazioni fino all'ordine del 10%, senza evidenziare fenomeni di plasticizzazione. Come più volte sottolineato, la formazione di martensite è data da una diminuzione di temperatura da M_s a M_f, tuttavia è possibile ottenere martensite ad una temperatura costante e maggiore di quella di trasformazione applicando uno sforzo, in questo caso la trasformazione è dovuta ad un'azione meccanica e non termica e la martensite prende il nome di *Stress-induced-martensite(SIM)*,che si trova a temperatura maggiore del suo campo di esistenza. Il comportamento superelastico si manifesta quando la SIM si trova in un range di temperatura compreso tra A_f e M_d, in questo caso la martensite indotta da stess è instabile pertanto non appena viene rimosso il carico essa di riconverte in austenite indeformata. In altre parole, facendo riferimento al grafico di figura 4.9, è possibile sintetizzare dicendo che: dato un provino ad una temperatura maggiore di A_f e a uno stato tensionale nullo in cui solamente l'austenite è stabile, se il provino viene caricato, mantenendo la temperatura costante, il materiale segue l'andamento della curva ABC con formazione al punto C della martensite deformata; scaricando, mantenendo ancora la temperatura costante, si ha la trasformazione inversa da martensite deformata a austenite (curva CDA), essendo la martensite instabile a tensione nulla. Come è evidente il processo di carico-scarico non ha prodotto deformazioni permanenti sul materiale bensì

è individuabile nel percorso un ciclo di isteresi [20].

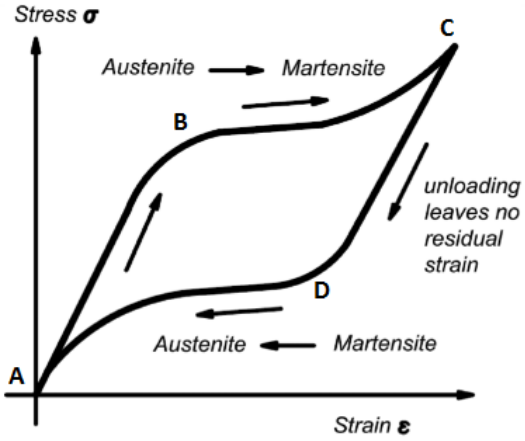


Figura 4.9: Diagramma tensione-deformazione in un materiale a memoria di forma

Capitolo 5

Applicazione delle SMA sul campione testato

Negli ultimi decenni intensi sforzi di ricerca si sono concentrati nell'applicazione delle leghe a memoria di forma nel campo dell'ingegneria strutturale. Le SMA, infatti, possiedono caratteristiche fisiche e meccaniche che le rendono idonee all'utilizzo in questo campo, con particolare attenzione al controllo della risposta sismica delle strutture.

In primo luogo, esse svolgono un ruolo chiave nello sviluppo e implementazione di materiali/dispositivi intelligenti, principalmente in leghe NiTi o in rame che, integrati nelle strutture, possono fornire funzioni come rilevamento, dissipazione energetica, attuazione, monitoraggio, auto-adattamento e riparazione delle strutture [25][29].
Oltre al vantaggio di poter essere inserite nelle più svariate forme geometriche, che comprendono fili, barre, molle, fogli, nastri o tubi, consentono di controllare forze e spostamenti in tre regimi di deformazione caratteristici:

- Per valori bassi di deformazione ($\epsilon < 1\%$) il modulo elastico dell'austenite può essere utilizzato per limitare le deformazioni sotto carichi di esercizio;

- Per valori intermedi di deformazione ($1\% < \epsilon < 6\%$) la riduzione del modulo di Young nella zone del plateau superelastico permette di ridurre la forza trasmessa

alla struttura mentre è sottoposta a grandi spostamenti;

- Per valori elevati di deformazione ($\epsilon > 6\%$) l'incremento del modulo elastico, dovuto alla trasformazione del materiale nella fase martensitica, consente di controllare gli spostamenti sotto elevate forze sismiche.

Va, inoltre, ricordata la dissipazione isteretica di energia durante la fase di scarico, caratteristica di notevole interesse soprattutto in merito al controllo sismico delle strutture. In aggiunta a tali proprietà, con particolare attenzione al caso in esame, possiamo sottolineate i seguenti vantaggi dell'utilizzo delle SMA per il miglioramento prestazionale delle facciate continue:

- **Memoria di forma:** capacità di ricenraggio, il surriscaldamento dell'elemento SMA può essere realizzato mediante corrente elettrica, preferito in quanto la temperatura viene resa uniforme in tutto l'elemento in breve tempo senza la generazione di tensioni interne. A seguito di azioni da vento/sisma che abbiano decentrato i vetri è possibile dunque ricentrarli scaldando l'elemento;

- **Superelasticità:** capacità di recupero completo delle deformazioni anche fino al 10% senza fenomeni di plasticizzazione;

- **Smorzamento:** la capacità di smorzamento, associata alle buone caratteristiche di resistenza meccanica, ha stimolato la ricerca di applicazioni con differenti finalità, tra le quali: riduzione del rumore, smorzamenti di vibrazioni, aumento della resistenza ai carichi impulsivi;

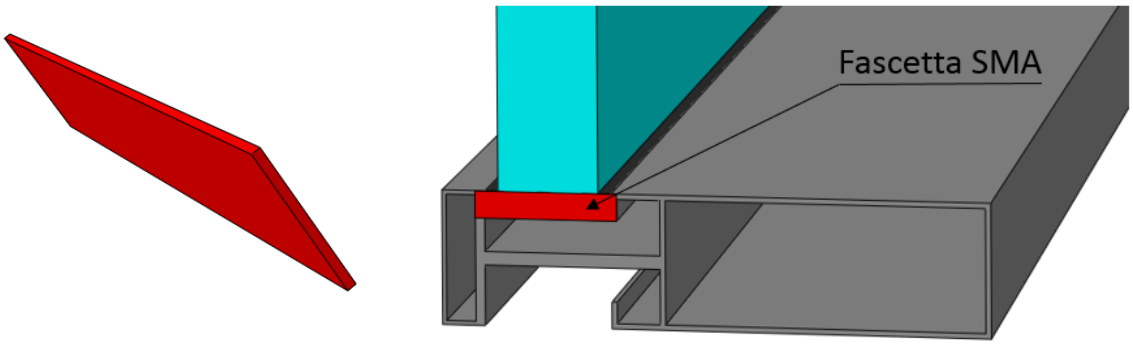
- **Progettabilità:** le leghe a memoria di forma sono materiali progettabili pertanto adattabili a svariate richieste, in questo caso potrebbero essere tarate in merito a deformazioni indotte dal vento piuttosto che dal sisma, dato il largo impiego delle facciate continue negli edifici alti;

- **Durabilità e resistenza alla fatica:** non necessitano di manutenzione;

Nonostante tali materiali mostrano proprietà funzionali del tutto particolari rispetto ai tradizionali materiali metallici, che consentono di classificarli come "materiali intelligenti", la loro applicazione del campo dell'ingegneria civile strutturale risulta fortemente condizionata dal quantitativo di materiale richiesto, in volumi differenti rispetto ad altri campi, come quello biomedicale o automobilistico. Tale motivazione ha suggerito una soluzione alternativa che consiste nell'applicazione delle SMA nel campo dell'ingegneria civile non-strutturale, per il quale il mercato non fornisce ancora nessun tipo di dispositivo.

5.1 Modifica della Connessione Vetro-Telaio

Le osservazioni fatte in merito ai vari meccanismi presenti nel modello, hanno evidenziato come l'interazione tra i pannelli di vetri e il telaio sia la maggiore responsabile del comportamento globale della facciata. Ragion per cui si è scelto di intervenire su tale connessione attraverso l'inserimento di un attuatore in SMA. Tale dispositivo, ideato sotto forma di fascetta, è stato collegato trasversalmente alle estremità laterali di vetro e telaio, come mostrato in figura 5.1.



(a) (b)

Figura 5.1: Modifica della connessione Vetro-Telaio: rappresentazione tridimensionale della fascetta in SMA (a), applicazione al modello (b)

Nella definizione delle proprietà da attribuire alla fascetta un ruolo chiave hanno assunto la definizione del materiale e la progettazione della geometria. Per quanto riguarda

il materiale, Abaqus consente, tramite l'opzione *User Material*, di inserire le costanti che definiscono il comportamento delle SMA, richiamando una *User subrutine*, di tipo UMAT nel caso di analisi con ABAQUS/Explicit [16]. Come è possibile notare in figura 5.2, il legame costitutivo utilizzato è di tipo superelastico-plastco e utilizza 31 variabili di stato, da specificare tramite l'opzione *Depvar*.

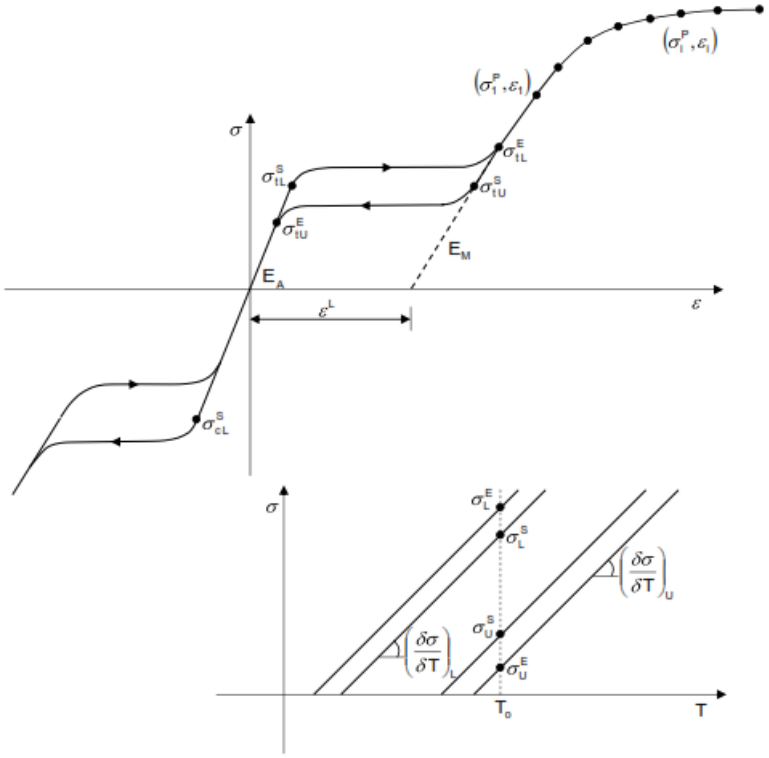


Figura 5.2: Modello superelastico-plastico Auricchio-Taylor [*Simulia-Dassault Systemes*]

Necessita, inoltre, dell'inserimento di 15 costanti e un massimo di 8 punti plastici, riportati in tabella 5.1 [31]. Il nome da assegnare al materiale, inoltre, non può essere causale ma dipende dagli elementi utilizzati nella simulazione, nel caso specifico l'utilizzato di elementi tridimensionali solidi ha richiesto il nome: ABQ_SUPER_ELASTIC [30].

INPUT	SIGNIFICATO	VALORE
E_A	Austenite elasticity	50000 [MPa]
ν_A	Austenite Poissin's Ratio	0,33
E_M	Martensite elasticity	45000 [MPa]
ν_M	Martensite Poissin's Ratio	0,33
ϵ^L	Trasformation strain	0.05
$(\frac{\delta\sigma}{\delta T})L$	$(\frac{\delta\sigma}{\delta T})loading$	6.7
σ_L^S	Start of trasformation loading	380[MPa]
σ_L^E	End of trasformation loading	490[MPa]
T_0	Reference Temperature	22 [°C]
$(\frac{\delta\sigma}{\delta T})U$	$(\frac{\delta\sigma}{\delta T})unloading$	6.7
σ_U^S	Start of trasformation unloading	220[MPa]
σ_U^E	End of trasformation unloading	120[MPa]
σ_{CL}^S	Start of trasformation stress during loading in compression	0
ϵ_V^L	Volumetrie transformation strain	0.05
N_A	Number of annealings to be performed during the analysis	0
N_P	Number of stress-strain pairs to define yield curve	8
σ_1^P,ϵ_1^P	Stress-strain point 1	660[MPa],0,067
σ_2^P,ϵ_2^P	Stress-strain point 2	760[MPa],0,072
σ_3^P,ϵ_3^P	Stress-strain point 3	810[MPa],0,075
σ_4^P,ϵ_4^P	Stress-strain point 4	860[MPa],0,079
σ_5^P,ϵ_5^P	Stress-strain point 5	900[MPa],0,084
σ_6^P,ϵ_6^P	Stress-strain point 6	940[MPa],0,093
σ_7^P,ϵ_7^P	Stress-strain point 7	970[MPa],0,122
σ_8^P,ϵ_8^P	Stress-strain point 8	975[MPa],0,150

Tabella 5.1: Significato e valore attribuito ai parametri di definizione del materiale a memoria di forma

Dalla definizione di tali parametri si è ottenuta la curva tensione-deformazione, riportata in figura 5.3, che definisce il legame costitutivo della fascetta in SMA.

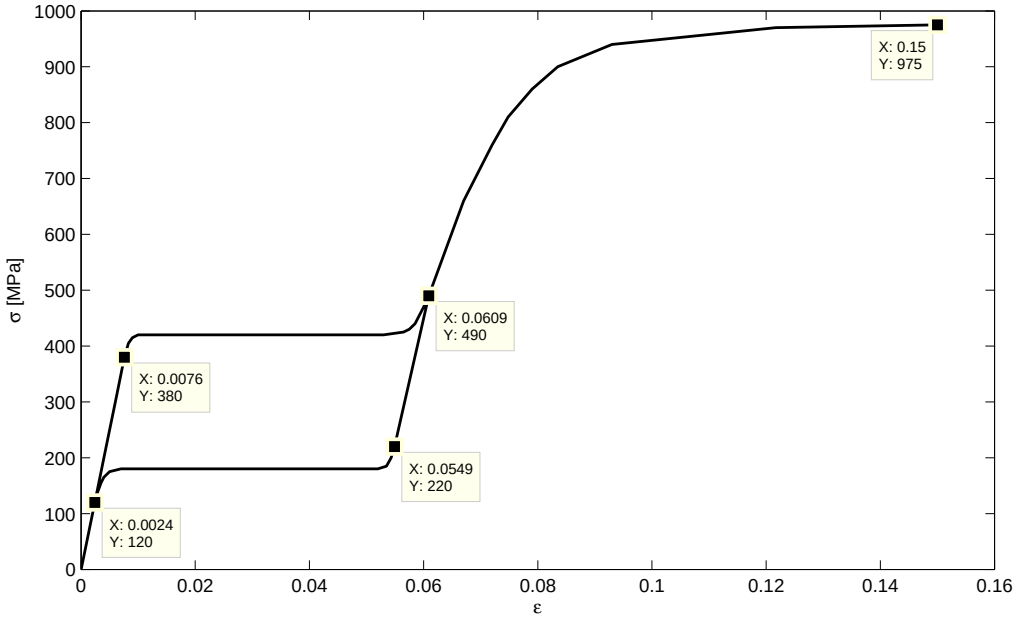


Figura 5.3: Legame costitutivo assegnato alla fascetta in SMA

La progettazione della fascetta, con particolare riferimento alle dimensioni geometriche, è stata, invece, effettuata in modo da ottenere un buon compromesso tra l'aumento di capacità della facciata e il controllo delle tensione sui vari elementi del campione, essendo la progettazione mirata a preservare le funzionalità degli elementi della facciata anche a discapito dell'attuatore. A causa di mancate prescrizioni normative dettagliate sulla progettazione in SMA e del carattere innovativo del lavoro, che non riscontra precedenti in letteratura, è stato necessario effettuare una progettazione virtuale attraverso analisi numeriche e di modellazione. Dopo aver fissato la lunghezza della fascetta, scelta dettata dalla geometria del telaio stesso, le varie simulazioni sono stata effettuate applicando al modello tridimensionale della connessione vetro-telaio fascette in SMA di differente altezza e spessore. Così procedendo, è stato possibile valutare sia gli incrementi tensionali sui vari elementi all'ultimo step dell'analisi, riportati in tabella 5.2, che l'aumento

di capacità della facciata, come mostrato in figura 5.4. Bisogna sottolineare che, poichè l'analisi delle tensioni è stata effettuata tramite simulazioni sul modello tridimensionale della connessione vetro-telaio, i valori ottenuti potrebbero non coincidere perfettamente con i valori di tensione raggiunti nel modello globale, tuttavia sono utili per valutare la variazione generale dello stato tensionale nei vari elementi.

	GEOMETRIA FASCETTA SMA			TENSIONI MASSIME		
	H	L	s	telaio	vetro	gurnizione
	[mm]	[mm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
I soluzione	8	52,9	0,5	47,04	7,48	0,33
II soluzione	10	52,9	0,5	61,15	8,04	0,38
III soluzione	10	52,9	0,6	97,15	12,11	1,97
IV soluzione	10	52,9	0,7	131,60	19,14	1,97

Tabella 5.2: Incrementi tensionali a seguito della variazione geometrica della fascetta SMA [σ_{Mises}]

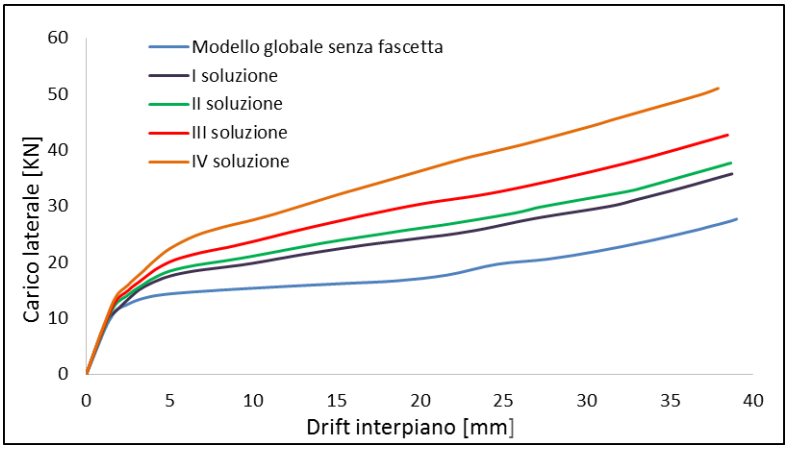


Figura 5.4: Incrementi di capacità a seguito della variazione geometrica della fascetta SMA

Sulla base dei risultati ottenuti dalle varie simulazioni, è stata scelta la geometria della fascetta corrispondente alla terza simulazione, i cui valori sono riportati in tabella 5.3. Tale scelta consente di ottenere un aumento considerevole di capacità della facciata

GEOMETRIA SCELTA		
H (altezza)	L (lunghezza)	s (spessore)
[mm]	[mm]	[mm]
10	52,9	0,6

Tabella 5.3: Dimensioni geometriche assegnate alla fascetta SMA

preservandone, con un certo margine di sicurezza, gli elementi principali, quali telaio in alluminio e pannelli di vetro.

5.2 Analisi e confronto dei risultati

Dalle scelte fatte e dalla corrispondente simulazione numerica è stata ricavata la nuova curva rappresentativa dell'interazione vetro-telaio-fascetta. Il confronto tra l'interazione prima e dopo l'inserimento della fascetta SMA, riportato in figura 5.5, mostra un aumento di resistenza della connessione, mantenendo all'incirca costante la rigidezza iniziale e la pendenza del tratto di contatto tra vetro e scatolare, in entrambi i casi posto all'incirca a 5 mm di spostamento relativo. E', inoltre, facilmente individuale il contributo della fascetta distinguendo una prima fase a comportamento super-elastico, con totale recupero di deformazione, e una seconda fase di plasticizzazione a seguito di un aumento deformativo.

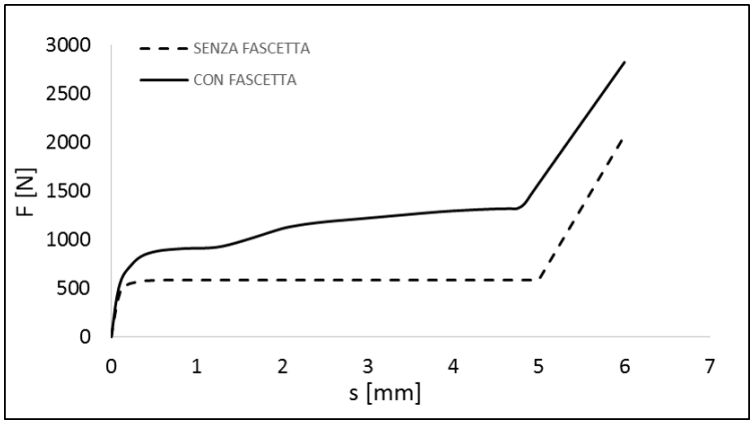


Figura 5.5: Variazione della curva di interazione vetro-telaio a seguito dell'inserimento dell'attuatore in SMA

Dopo aver implementato il risultato ottenuto, all'interno del modello globale della facciata, al fine di valutarne il comportamento a seguito dell'inserimento dell'attuatore in SMA, è stata estrapolata la nuova curva Carico laterale - Drift interpiano. Il confronto tra la curva di capacità prima e dopo l'inserimento della fascetta in SMA è riportato in figura 5.6.

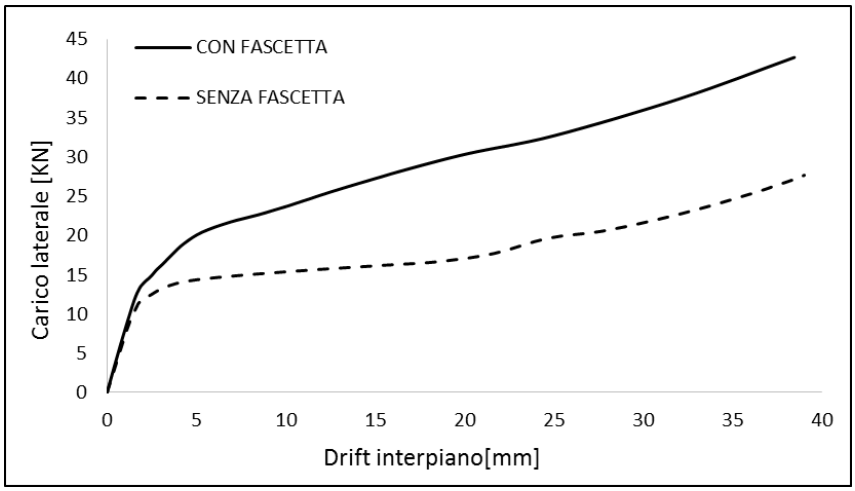


Figura 5.6: Variazione della curva di capacità della facciata a seguito dell'inserimento dell'attuatore in SMA

Con il solo scopo di effettuare un'analisi più consapevole dei risultati ottenuti, è stata effettuata una bilinearizzazione delle due curve di capacità, in modo da rendere più immediata la valutazione della riposta del nuovo telaio in relazione al suo comportamento originale. Come è bene noto, infatti, la verifica di una pushover consiste nel confrontare che la capacità di spostamento u_{max} del sistema sia maggiore della domanda d_{max}, che nel caso in questione possiamo esprimere in termini di drift interpiano. Affichè ciò avvenga è possibile intervenire sulla struttura in modo da:

- aumentare la capacità deformativa;
- aumentare la resistenza;
- aumentare la rigidezza.

Ovviamente, se tutti e tre questi parametri aumentano la verifica risulta essere migliorata, se invece all'aumentare di alcuni di essi altri diminuiscono è necessario valutare se l'effetto positivo dei parametri che aumentano è maggiore dell'effetto negativo di quelli che diminuiscono. Riportando tali osservazioni ai risultati ottenuti, prendendo dunque in considerazione le bilineari di figura 5.7, è possibile notare che, fissata la capacità deformativa a causa del tipo di prova eseguita, la rigidezza si mantiene pressochè costante, mentre aumenta la resistenza fino ad un valore massimo del 36%. Ragion per cui è lecito affermare che l'intervento scelto consente di migliorare le prestazioni della facciata.

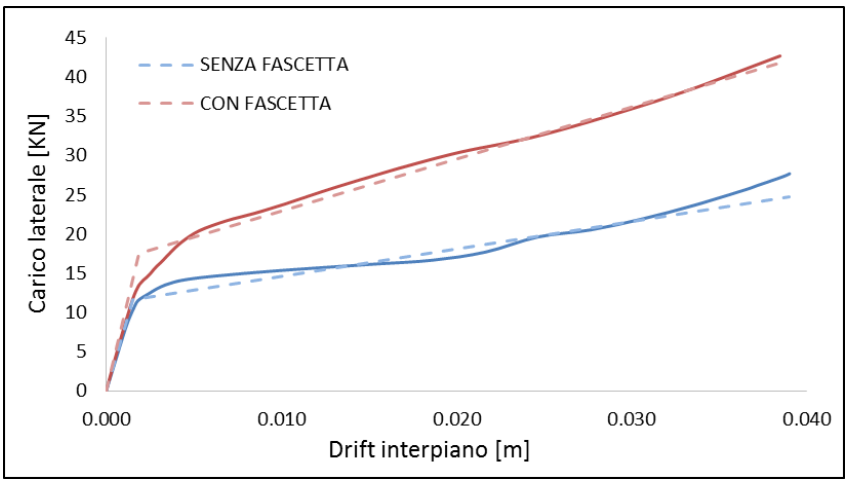
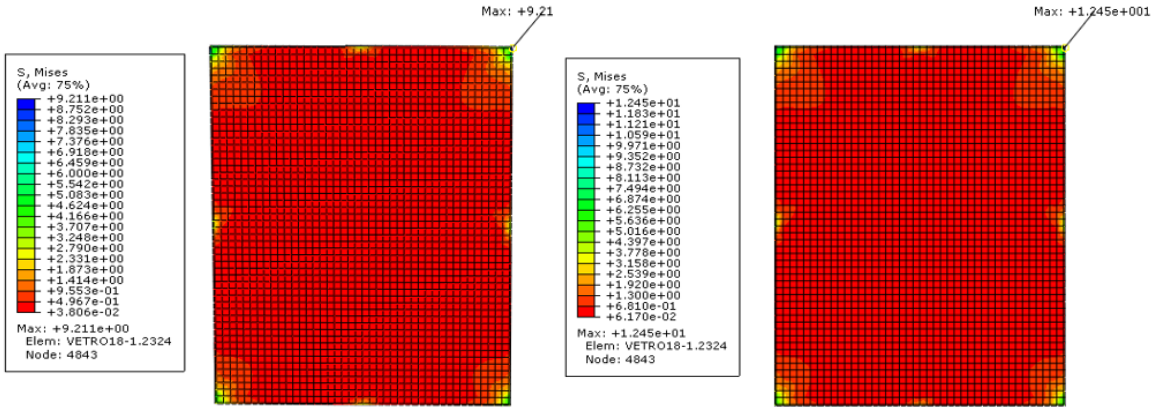


Figura 5.7: Confronto tra le curva di capacità pre e post intervento con attuatore in SMA

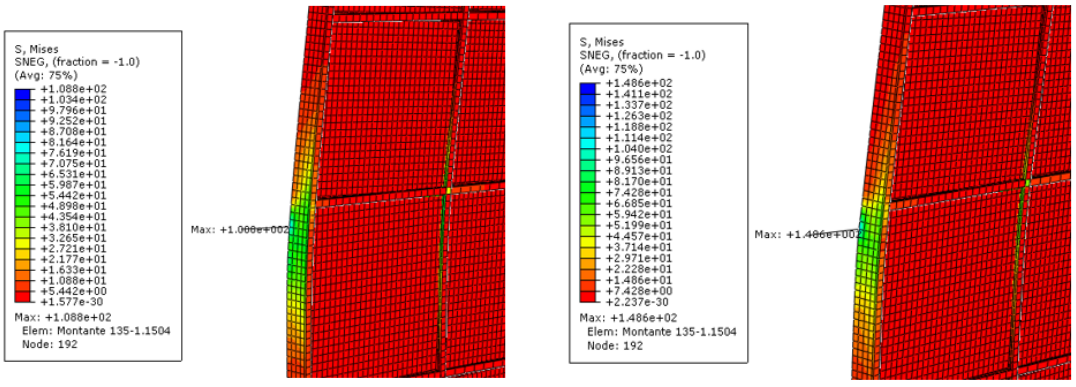
Ulteriori analisi sono state effettuate sulle variazioni tensionali degli elementi, confrontando la distribuzione di tensione sui pannelli di vetro e sul telaio prima e dopo l'inserimento dell'attuatore in SMA, riportate rispettivamente in figure 5.8 e 5.9.

A seguito dell'inserimento della fascetta in SMA, come è visibile nella tabella riassuntiva 5.4, si è registrato un aumento di tensione sui componenti della facciata e tale valore risulta essere molto simile al valore previsto dalla modellazione 3D della connessione per il pannello di vetro, mentre nel caso del telaio la modellazione 3D sottostima le tensioni (tabella 5.2 III soluzione). Tuttavia, tale incremento risulta essere di modesta entità e non comporta la rottura dei pannelli di vetro, verifica discrimine nella valutazione sismica delle facciate.



(a) (b)

Figura 5.8: Confronto distribuzione di tensioni sul pannello di vetro più grande all'ultima fase della pushover: prima dell'inserimento della fascetta (a), a seguito dell'inserimento della fascetta (b) [MPa]



(a) (b)

Figura 5.9: Confronto distribuzione di tensioni sul montante più sollecitato all'ultima fase della pushover: prima dell'inserimento della fascetta (a), a seguito dell'inserimento della fascetta (b) [MPa]

	$\sigma_{max}[MPa]$	
	facciata priva di fascetta SMA	facciata con fascetta SMA
VETRO	9,21	12,45
TELAIO	100,08	148,60

Tabella 5.4: Tabella riassuntiva delle variazioni tensionali

Infine è stata eseguita una valutazione delle prestazioni della fascetta per tutta la durata dell'analisi. A tal proposito è stato calcolato lo spostamento relativo tra i vetri e il telaio, per ognuno dei panneli di vetro presenti nella facciata. Tale spostamento, registrato come valore massimo sul pannello di vetro più grande, consente di determinare lo stato della fascetta all'avanzare del drift interpiano. Secondo quanto riportati nella Normativa Giapponese [10], è possibile specificare il valore minimo di capacità di drift della facciata in relazione all'altezza di interpiano degli edifici in base alla gravità dell'evento sismico:

- evento con un'altra probablilità di accadimento;

$$\frac{H}{300} = 11mm \tag{5.1}$$

- evento con la più alta intensità mai verificatosi;

$$\frac{H}{200} = 16.5mm \tag{5.2}$$

- corrispondente all'evento più intenso previsto nei prossimi 100 anni;

$$\frac{H}{100} = 33mm \tag{5.3}$$

Dove H è l'altezza interpiano pari a 3300 mm.
Pertanto, per ognuno dei seguenti valori di drift limite è stato calcolato lo spostamento relativo massimo del vetro più grande, in corrispondenza del quale è stata valutata, nel modello tridimensionale della connessione, la deformazione massima raggiunte dalla fascetta in SMA. I valori ottenuti vengono riportati in tabella 5.5.

Drift limite	ϵ_{max}
(H/300) 11mm	0.055
(H/200) 16.5mm	0.083
(H/100) 33mm	0.16

Tabella 5.5: Deformazione massima della fascetta per i valori limite di drift interpiano

Tali deformazioni evidenziano per il pannello di vetro più critico che, per eventi con elevata probabilità di accadimento, la fascetta si mantiene nel range a totale recupero di deformazione, per poi avere una leggera plasticizzazione nel secondo caso, fino a raggiungere la zona di rottura nel caso di gravi terremoti, preservando, però, i pannelli di vetro. Pertanto è possibile affermare che i requisiti richiesti dalla Norma per ognuno dei limiti imposti, riportati al §1.2.3, sono verificati. Tuttavia le osservazioni fatte spingono a considerare la possibilità di utilizzare leghe con caratteristiche migliori rispetto ai valori assegnati, seppur più costose, o d'altro canto studiare una geometria alternativa dell'attuatore.

Capitolo 6

Conclusioni e sviluppi futuri

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo quello di analizzare il comportamento sismico di una facciata vetrata a montanti e traversi soggetta a carichi laterali e, successivamente, variarne le performance sismiche mediante l'utilizzo di un attuatore in SMA. Le analisi sperimentali, effettuate precedentemente su tale facciata e riportate in una curva carico laterale-drift interpiano, hanno evidenziato un comportamento iniziale non-lineare del campione, che si evolve in una seconda fase caratterizzata da un'improvviso aumento di rigidezza. La modellazione FEM della facciata ha permesso di studiarne e comprendere a fondo i meccanismi alla base di tale comportamento, riuscendo a riprodurre numericamente i risultati sperimentali. Attraverso le varie fasi di calibrazione sono stati analizzati i principali meccanismi responsabili della risposta globale della facciata, con particolare riferimento allo studio delle connessioni tra montanti e traversi e tra vetro e telaio. Dalle analisi fatte è emerso che il comportamento sismico della facciata dipende principalmente da :

- rigidezza iniziale della connessione vetro-telaio e, limitatamente, da geometria e rigidezza rotazionale della connessione montante-traverso;
- comportamento meccanico della guarnizione;
- distanza tra pannelli di vetro e telaio e conseguente incremento di rigidezza locale a seguito dell'impatto, dovuto alla chiusura del gap tra i due elementi.

L'ottima compatibilità tra risultati sperimentali e numerici porta ad osservare come tale modellazione può essere utilizzata come linea generale per predire il comportamento delle facciate.
La seconda parte del lavoro, riguardante il miglioramento delle prestazioni sismiche del campione, ha evidenziato come le leghe a memoria di forma possano essere candidate per l'adeguamento sismico delle facciate continue. Applicando al campione una fascetta in SMA, di geometria estremamente miniaturizzata e facilmente integrabile, è stato registrato un notevole aumento della resistenza, mantenendo inalterate le verifiche prestazionali sui pannelli di vetro, soggetti ad un limitato incremento tensionale.
Diversi sono, tuttavia, gli spunti per studi e approfondimenti futuri:

- valutazione sismica della facciata sotto azioni di tipo dinamico, effettuando analisi dinamiche non lineari e test di laboratorio con tecnologie all'avanguardia che consentano di imprimere alla struttura una storia temporale di spostamenti che simuli la vibrazione del telaio strutturale al quale è collegata;

- studi sulla definizione dei vari parametri di calibrazione in funzione della geometria e dei collegamenti tecnologici, in modo da riuscire a predire il comportamento delle facciate anche in assenza di test sperimentali;

- valutazione dell'incidenza delle facciate sul comportamento sismico di edifici strategici;

- analisi delle variazioni prestazionali della fascetta al variate della temperatura, valutazione del comportamento sotto azioni dinamiche e cicli di carico-scarico, studio di geometrie differenti e calibrazione dei parametri del materiale a memoria di forma per questa specifica tipologia di interventi, in modo da perfezionare il funzionamento dell'attuatore.

Elenco delle figure

1.1 Tacoma Building,Chicago 1904 4

1.2 Lever house, New York 1952 5

1.3 Torre Isozaki, Milano, 2015. Facciata con elementi cellulari a triplo vetro ricurvo 5

1.4 Shanghai Tower, Cina, 2015. Facciata doppia a recupero di calore e riduzione dei carichi da vento 6

1.5 Classificazione delle principali tipologie di facciate continue 7

1.6 Dettaglio connessione tra facciata continua in vetro e solaio [*Prof. Paolo Rigoni, Bolzano 7 Marzo 2013*] 8

1.7 Costo percentuale dei vari elementi in funzione della destinazione d'uso degli edifici [*Miranda E. & Taghavi S., 2003*] 18

1.8 "Performance-based design" [*da Ron Hamburger*] 19

1.9 Schematizzazione dei modi fondamentali di vibrare di una tipica struttura con sistema a facciata continua 20

1.10 Schema statico facciata a montati e traversi 21

1.11 Deformazione del vetro nel piano della facciata 21

1.12 Attuatore idraulico per l'applicazione dello spostamento orizzontale . . . 23

1.13 Impianto di prova Dynamic racking test 23

2.1 Impianto di prova installato presso l'Istituto per le Tecnologie della Costruzione, San Giuliano Milanese, MI [*http://www.itc.cnr.it/*] 26

2.2 Campione testato: geometria (a), sezione trasversale montanti e traversi (b), dimensioni in mm [*Caterino et al., 2016*] 27
2.3 Risultati della prova sperimentale: (a) curva forza laterale-drift interpiano, (b) rottura dell'angolo superiore del vetro più grande nella fase di scarico [*Caterino et al., 2016*] 28

3.1 Schema risolutivo Abaqus [*Auricchio F. & Conti M., Pavia 2016*] 32
3.2 Ambienti principali di Abaqus per la realizzazzione delle simulazioni [*Saeed Veradi, 16 Luglio 2010*] 33
3.3 Esploso della facciata 34
3.4 Geometria variabile dei profilati in alluminio 36
3.5 Rappresentazione tridimensionale dell'elemento "Montante/Traverso" . . 37
3.6 Rappresentazione tridimensionale dell'elemento "Vetro" 37
3.7 Dettaglio stratificazione dei pannelli di vetro [adattato da *Caterino et al., 2016*] 38
3.8 Step principali della fase di assemblaggio: (a) allineamento tra montanti e traversi, (b) inserimento dei vatri all'interno dei montanti, (c) inserimento dei vetri all'interno dei traversi 40
3.9 Rappresentazione del modello globale in seguito all'assemblaggio 41
3.10 Fasi di modellazione tramite elementi "Springs" 42
3.11 Fasi di modellazione tramite contatto tra "Surfaces" 43
3.12 Connessione Montante-Traverso nel campione sottoposto a test 46
3.13 Fasi di modellazione della connessione Montante-Traverso mediante Connector Hinge 47
3.14 Connessione Vetro-Telaio nel campione sottoposta a test 48
3.15 Fasi di modellazione della connessione Vetro-Telaio mediante Connector Planar 49
3.16 Schema di prova: carichi e condizioni al contorno [*Caterino et al., 2016*] . 50
3.17 Legge di carico in spostamenti applicata al modello 50
3.18 Legge di carico in forze applicata al modello 51

3.19 Carichi e condizioni al contorno: carico in spostamenti (a), carico in forze (b), incastri (c) 52
3.20 Risposta della facciata alla variazione della rigidezza montante-traverso . 54
3.21 Risposta della facciata alla variazione del tratto rigido elastico della connessione vetro-telaio 55
3.22 Possibili combinazioni tra le connessioni della facciata 56
3.23 Risposta della facciata alla variazione della forza di snervamento della guarnizione 57
3.24 Risposta della facciata alla variazione del gap vetro-telaio 58
3.25 Risposta della facciata alla variazione della rigidezza locale a seguito dell'impatto 58
3.26 Modellazione tridimensionale della connessione Montante-Traverso 60
3.27 Spostamento verticale della connessione 61
3.28 Connessione Montante-Traverso: deformazione del cavallotto (a), deformazione del montante (b), curva Momento-Rotazione (c) 62
3.29 Variazione della curva Momento-Rotazione 63
3.30 Modellazione tridimensionale della connessione Vetro-Telaio 64
3.31 Interazione Vetro-Telaio: deformazione globale della connessione (a), deformazione del montante/traverso (b), curva Forza-spostamento (c) . . . 65
3.32 Inquadratuta dei parametri di calibrazione all'interno delle analisi condotte sulla facciata 66
3.33 Confronto tra i risultati dell'analisi in forze e in spostamenti 67
3.34 Confronto tra risultati numerici e sperimentali 68
3.35 Distribuzione delle tensioni sul pannello di vetro all'ultimo step della pushover [MPa] 68
3.36 Confronto tra la curva ottenuta e quella riportata in Caterino et al. . . . 69
3.37 Tensione di compressione all'ultimo step della pushover: Caterino et al. (a), modello in esame (b), valori in [MPa] 70

4.1 Schematizzazione bidimensionale della trasformazione di fase da Austenite a Martensite 74
4.2 Rappresentazione schematica di un bordo di geminazione (twin boundary) 75
4.3 Cambiamento macroscopico nella forma geometrica a causa di uno sforzo di taglio 75
4.4 Variazione delle proprietà delle SMA in funzione della temperatura . . . 76
4.5 Curva tensione-deformazione di un materiale con martensite 77
4.6 Comportamento di una lega a memoria di forma in funzione della temperatura 78
4.7 Effetto memoria di forma su una placchetta in SMA 79
4.8 Effetto della memoria di forma: ad una via *One Way Shape Memory Effect, OWSME* (a), a due vie *Two Ways Shape Memory Effect, TWSME* (b) . 80
4.9 Diagramma tensione-deformazione in un materiale a memoria di forma . 81

5.1 Modifica della connessione Vetro-Telaio: rappresentazione tridimensionale della fascetta in SMA (a), applicazione al modello (b) 85
5.2 Modello superelastico-plastico Auricchio-Taylor [*Simulia-Dassault Systemes*] 86
5.3 Legame costitutivo assegnato alla fascetta in SMA 88
5.4 Incrementi di capacità a seguito della variazione geometrica della fascetta SMA 89
5.5 Variazione della curva di interazione vetro-telaio a seguito dell'inserimento dell'attuatore in SMA 90
5.6 Variazione della curva di capacità della facciata a seguito dell'inserimento dell'attuatore in SMA 91
5.7 Confronto tra le curva di capacità pre e post intervento con attuatore in SMA 92
5.8 Confronto distribuzione di tensioni sul pannello di vetro più grande all'ultima fase della pushover: prima dell'inserimento della fascetta (a), a seguito dell'inserimento della fascetta (b) [MPa] 93

5.9 Confronto distribuzione di tensioni sul montante più sollecitato all'ultima fase della pushover: prima dell'inserimento della fascetta (a), a seguito dell'inserimento della fascetta (b) [MPa] 93

Elenco delle tabelle

1.1 Valori di q_a per elementi non strutturali 12

3.1 Parametri dei materiali definiti all'interno del modello 39
3.2 Parametri assegnati all'acciaio 61
3.3 Confronto tra i parametri utilizzati e quelli riportati in Caterino et al. . . 69

4.1 Confronto tra le proprietà delle principali leghe a memoria di forma . . . 73

5.1 Significato e valore attribuito ai parametri di definizione del materiale a memoria di forma 87
5.2 Incrementi tensionali a seguito della variazione geometrica della fascetta SMA $[\sigma_{Mises}]$ 89
5.3 Dimensioni geometriche assegnate alla fascetta SMA 90
5.4 Tabella riassuntiva delle variazioni tensionali 94
5.5 Deformazione massima della fascetta per i valori limite di drift interpiano 95

Bibliografia

[1] N.Pevsner,J.H. [1981] , *Dizionario di Architettura*. Torino: Einaudi, 1981.

[2] EN 13830 [2015] , *Curtain Walling-Product standard*. UNI EN 13830, 2015.

[3] Rossetti *Facciate Continue*. http://www.iuav.it/SISTEMA-DE/Archivio-d/approfondi/materiali-/FACCIATE-CONTINUE-ROSSETTI.pdf.

[4] EN 1998-1[2005], Eurocodice 8 (EC8) *Progettazione delle strutture per la resistenza sismica. Parte 1: Regole generali, azioni sismiche e regole per gli edifici*, UNI EN 1998-1, Gennaio 2005.

[5] NTC08[2008], *Norme tecniche per le costruzioni*, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasposti, Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008.

[6] FEMA 450 [2003], *Racommended previsions for seismic regulations for new buildings and other structures*, FEMA.

[7] Caterino et al. [2016], *Seismic assessmentand finite element modelling of glazed curtain walls.*

[8] American Architectural Manifacturers association (AAMA) [2001], *Racommended Dynamic Test Method for Determining the Seismic Drift Causing Glass Fallout from a Wall System*, AAMA 501.6-01.

[9] ASCE [2013], *Minimum design loads for buildings and other structures*, ASCE 7-10, Reston, VA.

[10] JASS 14 [1996], *Japanese Architectural Standard Specification Curtain Wall*, AIJ, Architectural Institute of Japan.

[11] Marta Mazzilli, Isa Spa , *Prove sismiche su facciate in vetro e alluminio. Un esempio sognificativo di progettazione antisismica.* Nuova Finestra.

[12] Matteo Poso, *Studio del sistema di connessione alla struttura portante per facciate continue del tipo a cellula sottoposte ad azione sismica*, Tesi di laurea magistrale in ingegneria Edile/Architettura, Politecnico di Milano, A.A.2013/2014.

[13] Giovanni Cavanna-ITC [2016], *Valutazione del comportamento sismico di elementi non strutturali: le facciate continue.*

[14] ITC-CNR, Istituto per le Tecnologie della Costruzione, Consiglio Nazionale della Ricerca, *http://www.itc.cnr.it/piattaforma-vibrante/.*

[15] Zienkiewicz OC, Taylor RL., Zhu JZ. [2005], *The finite element method: its basis and foundamentals*, Butterworth-Heinemann.

[16] SIMULIA, *Dessault Sistem*, Abaqus 6.14.

[17] Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) , *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Costruzioni con Elementi Strutturali di Vetro*, CNR-DT 210 [2013].

[18] MITRA, *Leghe di alluminio da estrusione*, Tabella Catalogo EN AW-6060.

[19] Otsuka K., Wayman CM., *Shape Memory Materials*, Cambrige University Press [1998].

[20] Auricchio F., Fugazza D., Desroches R., *Earthquake performance of steel frames with nitinol braces*, Journal of Earthquake Engineering [2006].

[21] Auricchio F., Taylor R. L., Lubliner J., *Shape-Memory Alloys: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior*, Computer Methods Appl. Mech. Engrg, 146 [1997] 281-312.

[22] Chang LC, Read TA. *Trans*, AIME [1951].

[23] Buehler W. J., Gilfrich J.V., Wiley R.C., *J. Apply Phys*,[1963].

[24] Virgilli V., *Materiali a Memoria di Forma: caratterizzazione e applicazioni nel campo dei Beni Culturali*, Alma Mater Studiorum - Università di Bologna.

[25] Menna C., Auricchio F., Asprone D., *Applications of Shape Memory Alloys in Structural Engineering*,Shape memory alloy engineering for Aerospace, Structural and Biomedical Applications. Lecce L, Concilio A. Butterworth-Heinemann [2015] 13 369-401.

[26] Fuentes J.M.G., Gampel P., Strittmatter J., *Phase change behavior of NiTiNOL shape memory alloys*, Advance Engineering Materials [2002] .

[27] Wayman C.M., Duerig T.W. , *An introduction to martensite and shape memory*, Engineering aspects of shape memory alloys, Butterworth-Heinemann [1990] 3-20.

[28] Kumar P.K., Lagoudas D.C., *Introduction to Shape Memory Alloys*, TiNi Aerospace, Inc., Innovative Mechanism Solutions.

[29] Attanasi G., Auricchio F., Fenves G.L., *Feasibility Assessment of an Innovative Isolation Bearing System with Shape Memory Alloys*, Journal of Earthquake Engineering [2009].

[30] Simulia Copyright Dassault Systemes, *UMAT-Superelastic-plastic.pdf*.

[31] Toccalini Diego, *Studio e simulazione numerica di una connessione trave-colonna equipaggiata con bulloni in SMA*, Tesi di laurea magistrale in ingegneria Civile, Università degli studi di Pavia, A.A.2014/2015.