



GLOBAL JOURNAL OF SCIENCE FRONTIER RESEARCH: A
PHYSICS AND SPACE SCIENCE
Volume 22 Issue 8 Version 1.0 Year 2022
Type: Double Blind Peer Reviewed International Research Journal
Publisher: Global Journals
Online ISSN: 2249-4626 & Print ISSN: 0975-5896

Adaptive Strategies for Improving the Seismic Performance of Curtain Wall System Connection Components through Shape Memory Materials

By Sara Sansotta & Francesca Giglio

Mediterranean University of Reggio Calabria

Abstract- Technological innovation processes affecting the building envelope are increasingly oriented towards higher performance in terms of safety, comfort, and sustainability. These processes have sanctioned closure systems' etymological and performance shift from passive/massive to adaptive/responsive. The research addresses the issues related to the concept of adaptivity of the building envelope as a virtuous strategy for designing systems that can react to changing external conditions, decreasing the impacts and vulnerabilities resulting from seismic events. The objective of the research, conducted by the authors with the support of a curtain wall system company, concerns the evaluation and improvement of the dynamic behavior of such systems subject to seismic loads. The contribution concerns some results obtained in the research's experimental phase related to the material innovation fielded for the improvement of seismic mitigation technologies related to frame-facade connection systems and primary support structures through the application of intelligent materials, such as shape memory alloys.

Keywords: *adaptive envelope, seismic mitigation strategies, flexible connection, shape memory allow, testing on curtain wall, simulation of seismic load.*

GJSFR-A Classification: *DDC Code: 690.028 LCC Code: TH880*



ADAPTIVE STRATEGIES FOR IMPROVING THE SEISMIC PERFORMANCE OF CURTAIN WALL SYSTEM CONNECTION COMPONENTS THROUGH SHAPE MEMORY MATERIALS

Strictly as per the compliance and regulations of:



RESEARCH | DIVERSITY | ETHICS

© 2022. Sara Sansotta & Francesca Giglio. This research/review article is distributed under the terms of the Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0). You must give appropriate credit to authors and reference this article if parts of the article are reproduced in any manner. Applicable licensing terms are at <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Adaptive Strategies for Improving the Seismic Performance of Curtain Wall System Connection Components through Shape Memory Materials

Sara Sansotta ^α & Francesca Giglio ^ο

Abstract- Technological innovation processes affecting the building envelope are increasingly oriented towards higher performance in terms of safety, comfort, and sustainability. These processes have sanctioned closure systems' etymological and performance shift from passive/massive to adaptive/responsive. The research addresses the issues related to the concept of adaptivity of the building envelope as a virtuous strategy for designing systems that can react to changing external conditions, decreasing the impacts and vulnerabilities resulting from seismic events. The objective of the research, conducted by the authors with the support of a curtain wall system company, concerns the evaluation and improvement of the dynamic behavior of such systems subject to seismic loads. The contribution concerns some results obtained in the research's experimental phase related to the material innovation fielded for the improvement of seismic mitigation technologies related to frame-facade connection systems and primary support structures through the application of intelligent materials, such as shape memory alloys.

Keywords: *adaptive envelope, seismic mitigation strategies, flexible connection, shape memory alloy, testing on curtain wall, simulation of seismic load.*

1. INTRODUCTION

L'avanzamento del progresso tecnologico risulta in continuo mutamento, grazie alle innovazioni di processo che scaturiscono dalla collaborazione tra ambito progettuale e produttivo ai differenti livelli (Giglio, 2011) e che influiscono notevolmente sulle tecniche di lavorazione e prototipazione, quali elementi chiave della quarta rivoluzione industriale. L'ambito in cui le suddette tecnologie trovano terreno più fertile è senz'altro quello dell'involucro edilizio, considerato da più versanti (Wigginton & Harris, 2002; Altomonte, 2005; Tucci, 2014; Rossetti, 2019) come elemento di

“frontiera” che da un lato separa fisicamente l'ambiente esterno ed interno degli edifici, dall'altro ne consente un dialogo.

L'involucro viene dunque definito come un elemento ambientale, che delimita e identifica gli spazi esterni circostanti (Milardi, 2017), concludendo, dal punto di vista formale, l'organismo costruttivo e strutturale.

Ciò si traduce attraverso la progettazione di nuovi requisiti che non riguardano soltanto la sfera di quelli canonici ma anche altri, come la forma aereodinamica, la geometria e giacitura delle superfici e, soprattutto, la revisione e accrescimento del ventaglio prestazionale degli involucri (Lucarelli et al., 2020).

Di fatti, la trasformazione nel tempo dei bisogni antropici, così come la variabilità delle condizioni al contorno, determinata da un ambiente costruito in mutamento, a causa anche del frequente susseguirsi di fenomeni a carattere emergenziale, ha portato le prestazioni di base garantite dall'involucro ad evolversi in funzione di esigenze sempre più articolate (Conato & Frighi, 2018).

A seconda della scala di considerazione, le prestazioni possono riferirsi alle proprietà dei materiali, ai componenti, agli elementi o all'involucro nel suo complesso (Hartkopf & Loftness 1999). Da questo assunto, ne deriva come le sfide legate ai processi di innovazione si concentrino sui componenti ed elementi dell'involucro edilizio, non solo in funzione delle tecniche di progettazione/produzione che compongono le fasi del processo, ma anche grazie alla contaminazione dell'evoluzione materica che costituisce lo stesso organismo (Addington & Schodek, 2012).

Dal dialogo sinergico delle parti, che concorrono alla funzionalizzazione evoluta dell'involucro edilizio, ne deriva la sperimentazione di una vasta gamma di soluzioni tecnologiche trasversali e altamente performanti. In questo processo di innovazione, si assiste al passaggio etimologico e prestazionale dei sistemi di chiusura, da passivi/massivi ad adattivi/responsivi. Il carattere di adattività risulta essere sempre più strategico per le dinamiche che investono l'architettura e, in particolare, la tecnologia. La componente tecnologica contribuisce, infatti, significativamente alla definizione di un nuovo linguaggio architettonico, in cui l'attitudine a generare

Author α: Architect and PhD Student, at the Department of Architecture and Territory of the Mediterranean University of Reggio Calabria (Italy). She conducts research in the field of building envelopes for the verification of seismic performance through the simulation and monitoring of the real behavior of technological systems. e-mail: sara.sansotta@unirc.it

Author ο: Architect and PhD, she is a Researcher at the Department of Architecture and Territory, dArTe, Mediterranean University of Reggio Calabria (Italy). She carries out research activities mainly in the field of Architectural Technology, with reference to innovation in reversible construction processes and experimentation with advanced and emerging materials. e-mail: Francesca.giglio@unirc.it

architetture dotate di capacità adattive per fronteggiare le moderne esigenze di cambiamento, comporta inevitabilmente una transizione dei paradigmi formali (Conato & Frighi 2018), il cui obiettivo è rivolto verso una resa prestazionale maggiore rispetto le diverse funzioni dell'involucro, in termini di sicurezza, comfort e sostenibilità (Mazzucchelli, 2018).

In questo scenario, gli aspetti prestazionali, indagati dalla ricerca, riguardano la funzione dell'involucro edilizio di trasferire i vari carichi di progetto allo scheletro dell'edificio come l'auto-peso e di assecondare i movimenti dovuti dalle stesse azioni (Bedon et al, 2018) in caso di carichi sismici. L'involucro, dunque, si svincola dalla struttura portante dell'edificio e diviene elemento di chiusura chiamato a gestire gli effetti della risposta dinamica del contesto in cui si innesta il sistema (Bedon et al., 2017).

È proprio in questo contesto che si colloca la tematica della ricerca, in cui l'indagine prestazionale dal punto di vista tecnologico è, in primo luogo, rivolta all'evoluzione dell'involucro edilizio come elemento che sia in grado di mitigare le sollecitazioni sismiche non sovraccaricando la struttura primaria di supporto. Seppur vero che i codici normativi, in modo univoco, definiscono i sistemi di facciata come elementi "non-strutturali", i terremoti del passato hanno evidenziato come gli involucri siano altamente vulnerabili e falliscono più frequentemente degli edifici stessi.

Come lascito degli eventi sismici, inoltre, si è arrivati alla consapevolezza che tali sistemi abbiano un contributo strutturale per la stabilità degli edifici. Di fatti, l'involucro in condizioni di carico estremo viene definito, da diversi versanti, "strutturalmente reattivo", poiché – a causa degli spostamenti imposti – sovraccarica la struttura primaria di supporto, dando origine a effetti devastanti in termini di sicurezza e salute delle persone, non solo per chi occupa l'edificio ma anche per chi si trova in adiacenza.

Gli elementi più critici risultano essere i componenti vetrati, per cui molti studi (Sucuoglu & Vallabhan 1997; Memari et al. 2003, 2006; Behr, 2009) si sono concentrati su strategie che possano migliorare il comportamento rigido di questi elementi in seguito al contatto tra vetro-telaio, come ad esempio aumento dello spazio tra di essi o attraverso soluzioni che migliorino le prestazioni materiche del vetro evitando che si verifichino fenomeni di fessurazione e conseguente rottura del vetro. Da un altro versante di ricerca, invece, deriva la proposta di progettare i sistemi di facciata come potenziali assorbitori delle vibrazioni indotte dal terremoto. Queste strategie di mitigazione sismica sono basate sulla proposta di dispositivi di connessione flessibile, che sfruttano la compatibilità meccanica tra la struttura dell'edificio e il suo involucro evitando di sollecitare il sistema di facciata e in particolare i sistemi vetrati.

Alla luce di ciò, lo studio e l'analisi del comportamento dinamico di un sistema di facciata continua a montanti e traversi sottoposta all'azione sismica costituisce il focus della ricerca di tipo industriale, il cui obiettivo generale è finalizzato all'avanzamento delle conoscenze e della sperimentazione nel campo delle connessioni flessibili attraverso l'indagine dei materiali cosiddetti intelligenti. Nell'ambito della borsa di dottorato aggiuntiva del Programma Operativo Complementare Ricerca e Innovazione 2014-2020, Asse I "Capitale Umano", Azione I.1 "Dottorati Innovativi con caratterizzazione Industriale", la ricerca si sta svolgendo con il supporto dell'azienda Ponzio s.r.l. (specializzata nella progettazione e produzione di sistemi per facciate continue) e l'azienda Altair Software and Services SL (fornitrice di software di progettazione e simulazione), ed infine ci si avvale del contributo della sezione TCLab del Building Future Lab (laboratorio specializzato nelle procedure di prova normative e testing su involucri edilizi). La sfida della ricerca è, dunque, incentrata sull'avanzamento delle conoscenze nel campo di materiali che siano in grado di reagire alle mutevoli condizioni esterne rispondendo in modo adattivo ai carichi sismici. L'adattabilità strutturale può portare a una risposta statica e dinamica più efficiente in condizioni di carico variabili, cioè aumentare la resistenza in caso di eventi estremi e/o fornire meccanismi di collasso a prova di *fail-safe* (Bedon & Amadio, 2018), migliorando così la robustezza strutturale. In questo lavoro, gli autori presentano alcune parti dei risultati delle loro ricerche e indagini, in cui, uno step fondamentale ha riguardato la ricognizione ragionata dei materiali cosiddetti emergenti ed avanzati per applicazioni estreme, ovvero dei materiali che sono in grado di rispondere attivamente alle possibili sollecitazioni esterne.

II. ADAPTIVE APPROACHES FOR IMPROVING SEISMIC BEHAVIOR

Il cambiamento delle prestazioni di un involucro adattivo può essere ottenuto in svariati modi, utilizzando approcci su macro-scala come l'integrazione di sistemi smart, ma anche con approcci su micro-scala che gestiscono e migliorano le proprietà fisiche di alcuni materiali (Iommi, 2018). Di fatti, sebbene le facciate adattive stiano diventando gradualmente più comuni, la loro progettazione rappresenta ancora un compito difficile. I problemi principali sono legati alla caratterizzazione strutturale, anche in mancanza di norme di progettazione specifiche e di disposizioni a supporto dei progettisti. A differenza dei sistemi di rivestimento tradizionali, i molteplici modi in cui le facciate adattive possono interagire con l'ambiente - e modificare le loro caratteristiche meccaniche e/o

termofisiche intrinseche - devono essere adeguatamente presi in considerazione.

Risulta necessario, però, sottolineare quanto espresso da Loonen et al. (2013), la semplice aggiunta di singole caratteristiche adattive non porta però automaticamente a un aumento dell'operatività e delle prestazioni dell'involucro. Gli autori hanno affermato la necessità di progettare adattamenti inter-coordinati che coinvolgano anche i sottosistemi e i servizi dell'edificio. La negoziazione delle singole funzioni adattive della facciata comporta, quindi, la necessità di un processo decisionale intelligente nel controllo degli adattamenti della facciata. Alla luce di queste considerazioni, le tecniche di adaptive design, applicate all'involucro, assumono oggi un ruolo primario in funzione di risposte prestazionali programmabili, utili a incidere sulla qualità dell'ambiente costruito e, al contempo, modulare gli effetti da questo generati.

In generale riferendosi all'approccio su macro-scala, il comportamento adattivo è dato dalla combinazione di componenti e meccanismi di automazione e movimentazione basati su motore elettrici (Grillo, Sansotta, 2021). Gli involucri sono, dunque, tra le componenti architettoniche che possiedono una maggior interdipendenza con i sistemi meccanici, in cui l'integrazione "edificio-impianti" spinge l'innovazione verso la realizzazione di componenti sempre più "attivi" ed "intelligenti", attraverso elementi che leggono le sollecitazioni e le traducono in risposte prestazionali da offrire. L'evoluzione di tali sistemi nasce, quindi, dalla necessità di progettare elementi e componenti che sono in grado di regolare, da un lato, i flussi energetici-materici interni-esterni, dall'altro, di assicurare la flessibilità del sistema progettato mediante dinamismi che consentono di variare le sue proprietà fisiche in base alle sollecitazioni esterne.

A valle di tale concetto, è necessario fare riferimento ad alcune strategie teoriche-operative che sono state applicate in letteratura per il miglioramento del comportamento sismico degli edifici. Proveniente dalla progettazione antisismica giapponese delle strutture già dagli anni '70, infatti, il miglioramento delle prestazioni dei sistemi di facciata è stato affidato, soprattutto nel caso di facciate a doppia pelle, all'applicazione dei dispositivi di risposta dinamica, cosiddetti smorzatori (Hareer, 2007). Questa teoria fu sviluppata per la prima volta da Moon (2009), in cui l'autore ha dimostrato come l'utilizzo degli smorzatori in questa tipologia di facciata abbia ridotto – quasi del 35% – gli effetti sismici. Tra le varie tipologie presenti sul mercato, l'attenzione è stata posta sui dispositivi di risposta dinamica attivi. Seppur infatti i dispositivi attivi propongono soluzioni altamente reattive, la loro complessità – costituita da elementi informatizzati e digitalizzati – è correlata alla necessità di utilizzo di fonti energetiche per la loro attivazione, perdendo di vista un aspetto fondamentale. Durante gli eventi sismici,

l'interruzione dell'elettricità potrebbe causare il non-funzionamento degli elementi e di conseguenza non essere in grado di assolvere la funzione per i quali sono stati progettati. Un altro aspetto critico dei dispositivi digitalizzati riguarda il requisito della "manutenibilità" di tali elementi. Questi vengono, di fatto, installati tra i componenti strutturali e talvolta sono difficilmente ispezionabili. Per questo motivo utilizzare sistemi tecnologici costituiti da sensori e controller, potrebbe inficiare le attività di sostituzione compromettendo il funzionamento complessivo degli smorzatori. Nei sistemi strutturali, infine, questi dispositivi sono costituiti da diversi elementi le cui dimensioni occupano parte del sistema. Trasferire l'utilizzo di tali sistemi in facciata comporterebbe un aumento dello spazio di connessione tra il sistema di facciata e la struttura primaria di supporto, inficiandone le condizioni di servizio rispetto le prestazioni di permeabilità all'aria e all'acqua.

Attraverso l'analisi critica di sistemi dotati da questi dispositivi, è stata avanzata l'ipotesi di valutare le capacità della facciata di fungere come un dispositivo di assorbimento di energia (Lee et al., 2021), assumendo il valore ottimale delle proprietà degli smorzatori in facciata.

In questo scenario, alcuni versanti di ricerca, si sono concentrati sulla progettazione di sistemi di connessione che siano in grado di trasferire gradualmente i carichi sismici alla struttura primaria di supporto attraverso elementi e materiali che siano in grado di assumere le proprietà funzionali degli smorzatori, sfruttando gli spostamenti dei componenti di facciata per dissipare energia. L'idea di sfruttare gli spostamenti dei sistemi di rivestimento non è recente ed è stata proposta per la prima volta da Pinelli et al., (1995) a seguito di indagini post-sisma. Lo studio era incentrato sul criterio progettuale di utilizzare "*i collegamenti avanzati del rivestimento sfruttando l'interazione tra i pannelli del rivestimento architettonico e la struttura dell'edificio per dissipare l'energia*". In seguito alla ricerca svolta da Pinelli et al. (1995), Goodno et al. (1998) forniscono uno studio dettagliato dei diversi sistemi di connessione dissipanti, dimostrando come questi "*meccanismi di dissipazione*" siano in grado di controllare le forze risultanti dagli spostamenti avendo come potenziale – nel caso dei rivestimenti leggeri – di fornire un livello di isolamento accettabile. Da questo assunto, diversi autori come per esempio Khoraskani (2015), Bedon & Amadio (2017) e Gong et al., (2019a, b) hanno valutato la possibilità di progettare connessioni avanzate e/o flessibili con la capacità rilevante di dissipazione dell'energia.

Il criterio di progettazione di facciate antisismiche dotate di elementi di connessione avanzati/flessibili risiede nella consapevolezza che questi siano in grado da un lato, di fungere come dispositivi di controllo delle azioni indotte dai terremoti – traendo ispirazione dal concetto originale degli

smorzatori a massa accordata, TMD (Bedon & Amadio, 2018a). In questo senso lo smorzamento della connessione deve essere considerato come una variabile di progetto (Di Giovanni & Bernardini, 2020). Khoraskani (2015) ha svolto un'attenta disamina sui sistemi di connessione avanzata, individuando vantaggi e limiti di tali sistemi per l'applicazione sui sistemi di facciata continua, il cui scopo risiede nel miglioramento del comportamento dinamico delle facciate per i carichi sismici.

Dallo studio e analisi di questi sistemi si possono concepire vari tipi di dispositivi di connessione, il cui comportamento può essere migliorato attraverso un approccio basato sulla micro-scala indagando i processi di innovazione materica, al fine di migliorare le performance sismiche dei sistemi di connessione. Nella fattispecie, s'indagano le performance materiche che siano in grado di contribuire alla capacità di smorzamento dell'intero sistema sollecitato, migliorando così la gestione di risposta degli effetti delle vibrazioni sugli edifici indotti dall'azione sismica. Si tratta di materiali *“progettati su misura”* per una specifica esigenza (Langella, 2021) ottimizzando le prestazioni espresse in relazione al *“contenuto”* materico.

III. MATERIAL INNOVATION FOR IMPROVING FLEXIBLE CONNECTIONS

Negli ultimi decenni sono stati introdotti nel mercato componenti altamente performanti grazie allo sviluppo di una maggiore conoscenza operata nel campo della scienza dei materiali (Lucarelli et al., 2012). I materiali avanzati, infatti, che vengono impiegati in ambito edilizio derivano spesso da processi di trasferimento tecnologico da altri settori industriali caratterizzati da forti spinte all'innovazione – quali il settore aeronautico, automobilistico o biomedico –, in cui la ricerca nel campo di materiali con prestazioni sempre più elevate costituisce una condizione imprescindibile per la realizzazione di prodotti e sistemi più efficienti. La proliferazione quindi di materiali *“avanzati”*, *“innovativi”*, o semplicemente *“nuovi”*, non rappresenta solo il frutto di tendenze generali del mercato che spingono verso una continua evoluzione dei prodotti offerti, ma riflette anche una mutata condizione nel rapporto tra l'uomo e le possibilità di trasformazione della materia che ha aperto la strada a una diversa modalità nello sviluppo, e quindi alla *“creazione”*, di nuovi materiali (Mandaglio, 2011).

Tra i materiali avanzati, applicati e applicabili nel settore edilizio, si annoverano i materiali a memoria di forma SMA (Hietanen, 2003). Si riferisce a una *“nuova”* classe di materiali la cui capacità è quella di recuperare la propria forma predefinita dopo aver subito una grande deformazione, anche fino al 14%, della lunghezza iniziale (Andrawes & DesRoches, 2005). L'introduzione nel mercato produttivo di questi materiali,

però, non è recente e risale agli anni '30, tuttavia l'interesse da parte dei ricercatori per l'applicazione di questo materiale è stata ripresa negli ultimi decenni (Zareie, et al., 2020). Le ragioni del ritardo nell'introduzione degli SMA sono dovute principalmente alla mancanza di conoscenze sul comportamento termomeccanico, all'elevato costo di produzione e alla scarsa affidabilità degli SMA disponibili (Gresser & Cozzarelli, 1991).

I recenti sviluppi degli SMA hanno portato a una conoscenza approfondita delle fasi di cambiamento del materiale, austenite-martensite e martensite-austenite, riducendo i costi di produzione, incrementando un gran numero di lavori di ricerca e quindi aumentando l'affidabilità di questi materiali. Queste fasi sono possibili grazie alle loro proprietà fisiche uniche note come effetto memoria di forma (SME) ed effetto superelastico (SE). Il primo si ottiene grazie alla capacità del materiale di riacquistare la sua forma originale se sottoposto a riscaldamento. L'applicazione di calore all'interno o all'esterno aumenta la temperatura al di sopra della sua trasformazione di fase e fa sì che lo SMA recuperi la sua forma iniziale (Zareie et al., 2020). Per effetto superelastico SE, invece, si considera la capacità del materiale di recuperare la sua configurazione originale da una grande deformazione subito dopo la rimozione del carico applicato (Sun et al., 2019).

La modifica della microstruttura cristallina dello SMA è la principale responsabile dello SME e della SE. Per cui applicando un carico meccanico e/o un gradiente di temperatura avviene la modifica della struttura cristallina. Grazie alle proprietà meccaniche degli SMA, i fenomeni SE e SME, sono in grado di assorbire l'energia indotta dal carico esterno durante la procedura di carico-scarico.

Nelle tipologie dei materiali a memoria di forma rientrano le leghe, i polimeri o le fibre le cui capacità risiedono nell'allungarsi, piegarsi o piegare, a seconda dello stimolo ambientale e le cui composizioni molecolari controllano e producono performance a livello di forma del materiale per interagire e deformarsi (Elettar, 2013). Gli SMA superelastici, grazie alle loro proprietà ideali, sono esempi particolarmente virtuosi di materiali intelligenti promettenti nel campo dell'architettura e ingegneria (Song, et al., 2006). L'integrazione di questa classe di materiali è applicata nei dispositivi passivi di controllo delle vibrazioni, grazie alle loro proprietà in termini di capacità di autoriparazione. I sistemi di risposta dinamica dotati di leghe a memoria di forma con effetti superelastici, infatti beneficiano della capacità di smorzamento supplementare attribuito alla dissipazione di energia. Inoltre, questi materiali presentano un'eccellente resistenza alla corrosione e alla fatica (Chan & Albermani, 2008).

Il punto focale riguarda, quindi, la capacità del materiale di generare un movimento reversibile o addirittura di adattarsi cinematicamente in tempo reale, costituendo in un unico elemento in ciò che spesso viene attuato attraverso l'inserimento di attuatori e sensori sempre più complessi e informatizzati (Drossel et al., 2015). La dissipazione di energia e la capacità di smorzamento, ovvero la SE e la SME dei materiali SMA, sono le chiavi per sviluppare componenti flessibili.

Per questo motivo, in questo studio si propone che il miglioramento delle prestazioni di un dispositivo di connessione flessibile possa avvenire implementando questi sistemi con i materiali a memoria di forma superelastici. Dagli studi condotti in altri settori è stato dimostrato che l'utilizzo di questo materiale intelligente, per quanto riguarda la dissipazione dell'energia, le tensioni residue, la resistenza post-sneramento e la deformazione permanente, hanno performance superiori rispetto agli smorzatori convenzionali.

In questo senso l'innovazione materica in atto sui materiali a memoria di forma permette di identificarli come materiali reattivi che combinati con altre entità, in un sistema più complesso e intelligente, possono migliorare capacità dell'intero sistema (Casagrande et al., 2019, 2021). Ciò significa che questi materiali, applicati alla progettazione di componenti che hanno la funzione di assorbire e dissipare energia derivante da carichi eccezionali, come quelli sismici, sono in grado di conferire grande capacità di deformazione all'intero sistema.

IV. METHODOLOGICAL STEPS FOR THE CONSTRUCTION OF THE EXPERIMENTAL CASE

Dallo scenario sopra descritto, l'attenzione si focalizza sulla progettazione di una soluzione tecnologica atta a migliorare la risposta dinamica di un dato sistema di facciata continua a montanti e traversi che – rispetto ai tradizionali metodi e materiali di progettazione – può essere rappresentata da connessioni flessibili (Huang et al., 2017), traducendosi come una valida strategia di mitigazione sismica. Ciò è reso possibile attraverso la compatibilità meccanica tra la struttura dell'edificio e i sistemi di facciata continua, in contrasto con la pratica comune di affidare la resistenza sismica ai giunti presenti tra gli elementi che costituiscono la facciata. Prima di presentare alcuni dei risultati ottenuti nella ricerca relativi all'innovazione materica per gli elementi di connessione flessibile, risulta necessario riportare la fase di verifica e valutazione del comportamento sismico dei sistemi di facciata convenzionali, ovvero, dei sistemi privi di elementi a-sismici. In questo senso, vengono presentate le azioni di sperimentazione e comparazione, al fine di definire le performance che devono essere implementate e/o migliorate per il dato sistema prodotto dall'azienda partner e correntemente in uso nel mercato.

Al fine di espletare in modo esaustivo la metodologia di ricerca, si specifica che il caso sperimentale è costituito dalla tipologia di facciata stick system WS50, prodotta dall'azienda Ponzio s.r.l., e i sistemi di connessione, impiegati per il dato sistema, rispetto al quale verranno effettuate, attraverso accurati metodi di analisi, verifiche che riguardano il comportamento dinamico dovuto alle sollecitazioni dell'azione del sisma.

Nello specifico, la facciata continua stick system o montanti e traversi si basa su elementi verticali e orizzontali, generalmente in alluminio, che formano un reticolo strutturale al quale vengono poi applicati i tamponamenti, trasparenti od opachi. In sintesi, la fase di sperimentazione mira a verificare le prestazioni sismiche di una facciata continua, stick system, sottoposta a spostamenti "statici" e "dinamici", attraverso due "strumenti" di valutazione differenti, riprendendo l'approccio metodologico di confronto proposto da diversi versanti della ricerca, Memari & Schwartz (2009) Aiello et al. (2019) e Lee et al. (2021).

Per cui, le valutazioni sulle prestazioni della facciata sono state condotte tramite due step, date due porzioni di facciata stick system progettate con il supporto dell'azienda fornitrice; il primo step riguarda la modellazione e l'analisi agli elementi finiti attraverso software di simulazione SimSolid, fornito dall'azienda partner Altair Software and Service SL; il secondo riguarda la verifica dei sistemi di facciata tramite procedure di prova normale grazie al contributo del laboratorio specializzato di testing, la sezione TCLab del Building Future Lab di Reggio Calabria. Infine, le strategie di mitigazione sismica, discusse precedentemente, saranno riprese in chiave critica per valutarne la fattibilità – prestazionale, economica e di reperibilità delle risorse – della proposta del componente di connessione flessibile.

Si riportano le azioni condotte per la fase di progettazione del Mock-Up intendendolo come modello sperimentale sia fisico, *Physical Mock-Up*, che digitale, *Digital Mock-Up* (Ogata et al., 1998). Da questi assunti, la configurazione scelta per il sistema di facciata continua sottoposto ad analisi e verifica per le fasi di simulazione e testing risulta essere identica, costituendo in modo univoco il modello di progetto, *Project Mock-Up (PMU)*.

Nello specifico, sono stati progettati due provini per la tipologia stick system con configurazione di campate variabili, uguali nelle caratteristiche dimensionali ma diversi nell'assetto tecnologico del montante. Infatti, nel primo provino i montanti si presenteranno ad asse spezzato, nel secondo caso, invece, il montante si presenterà ad asse unico. Come descritto nella tabella 1, i Mock-Up da analizzare tramite software SimSolid e testare nella camera di prova della sezione TCLab sono progettati con montanti da 125 mm ad asse unico e spezzato e traversi da 129,5 mm, le cui

dimensioni nel complesso sono 6.860 mm (altezza) x 6.570 mm (larghezza).

Per la messa in atto di diverse variabili all'interno di un unico Mock-Up, montanti e traversi sono stati disposti in modo asimmetrico configurando campate ad altezza e lunghezza variabile, e di conseguenza 6 serie di specchiature fisse e due tipologie di apribili per Mock-Up, anta a ribalta e apribile a sporgere (Fig. 1).

a) Simulation Phase

La prima fase di verifica del caso sperimentale è incentrata sulla discussione delle attività condotte e dei risultati ottenuti dalla fase di modellazione e analisi agli elementi finiti, FEA (Behr, 2008; Memari et al., 2011; Bedon & Amadio, 2018b), tramite il software di simulazione SimSolid, fornito dall'azienda partner Altair Software and Services SL. Utilizzando un modello ad elementi finiti FEM, è possibile calcolare le sollecitazioni in qualsiasi punto, non solo della superficie vetrata ma di tutto il Digital Mock-Up. In questa funzione risiede uno dei principali vantaggi degli strumenti di simulazione. Sottoponendo i modelli a spostamenti crescenti, infatti, una volta "processata" l'analisi si possono ottenere, da un lato, i valori nominali dello stato finale di "stress" dei singoli elementi, dall'altro, identificare il valore dello spostamento in cui gli elementi entrano nella "fase critica" di rottura.

Prima di avviare l'analisi tramite software, i Digital Mock-Up sono stati modellati sul software 3D parametrico Inventor, andando a identificare gli step di semplificazione utili alla lettura dei modelli sul software SimSolid. Nella fase di modellazione, gli elementi costitutivi del sistema di facciata sono stati estrusi e "lavorati" in linea con i processi di produzione, prevedendo cioè i fori per l'innesto dei giunti meccanici o per i sistemi di drenaggio e tutte le lavorazioni previste per la posa in opera del sistema, configurando così l'assetto reale dei singoli elementi. In un'ottica che mira alla restituzione della condizione reale, che si creerà all'interno della sezione del TCLab, questa fase ha previsto anche la modellazione delle travi della camera di prova, riconfigurando l'assetto tipotecnologico sul quale verranno installati i due Mock-Up (Fig. 2).

Nello step di modellazione, grande attenzione è stata posta sulla configurazione geometrica di alcuni elementi, quali le guarnizioni in EPDM, intese come elementi critici sia per la creazione delle connessioni su software SimSolid che per le dimensioni ridotte. Rispetto le connessioni, è risultato necessario "semplificare geometricamente" gli elementi in EPDM andando a "modellarli" sul software parametrico rispetto l'assetto finale che le guarnizioni presentano una volta installate sul sistema. Verificato l'approccio di semplificazione per gli elementi di guarnizione, la modellazione si è rivolta verso la presenza di apribili all'interno dei provini.

I serramenti sono stati considerati come ulteriori elementi critici poiché costituiti da componenti meccanici, "accessori", che operano per l'apertura di tali sistemi. In modo analogo alla metodologia applicata per gli elementi in EPDM, il sistema di apribili è stato scomposto, semplificando, per il sistema specifico, non solo la geometria dei singoli elementi che lo costituiscono ma anche il numero degli elementi costitutivi del sistema. Si evince come le prime fasi di sviluppo si siano incentrate su:

- la classificazione delle condizioni al contorno – che identificano e simulano l'ambiente reale;
- la semplificazione geometrica degli elementi del primo Mock-Up;
- i vincoli imposti tra i vari elementi.

Per l'ultimo aspetto, si è proceduto verso due tipologie di connessioni:

- "bonded", intese come connessioni solidali tra i vari elementi in alluminio, che conferiscono al sistema un'ulteriore rigidità tra i vari elementi;
- "sliding without friction", intese come connessioni che permettono un grado di libertà nella traslazione verticale o orizzontale.

Definiti, quindi, i vincoli del modello, la fase sperimentale si è rivolta verso l'assegnazione materica degli elementi che costituiscono il sistema di facciata. Lo strumento di simulazione dispone di un database in cui ai materiali presenti sono assegnate numericamente le proprietà meccaniche, termiche e di fatica dei vari materiali. Inoltre, è possibile non solo modificare i parametri predisposti ma anche inserire manualmente nuovi materiali – implementando il database – e importare il diagramma stress-deformazione attraverso lo studio della caratterizzazione materica dei singoli elementi, in cui sono riportati i valori delle proprietà sopracitate e riportate all'interno della tabella 2.

Successivamente, sono state sviluppate le prime analisi, tra cui l'analisi modale per verificare lo stato delle connessioni effettuate sul software e le prime analisi strutturali lineari per classificare il comportamento del provino simulato soggetto alle azioni sismiche. Rispetto l'analisi lineare, questa è stata condotta settando le travi fisse della camera di prova come corpo rigido e impostando di conseguenza il valore nominale della densità del materiale (kg/m^3). Diversamente su una delle facce – trasversali rispetto il sistema di facciata – è stato impostato il valore dello spostamento pari a 75 mm. La Tabella 3 mostra le principali vulnerabilità della facciata continua convenzionale ottenute dopo aver eseguito l'analisi strutturale lineare, la lettura dei risultati è avvenuta attraverso l'approccio basato sul principio di Von Mises. Dalle analisi condotte sinora, è emerso come i limiti legati a software, utilizzati soprattutto per lo svolgimento di analisi agli elementi finiti di sistemi strutturali, non siano in grado di simulare il comportamento reale del sistema sollecitato. Nel caso

specifico il comportamento torsionale del montante non risulta congruo rispetto alle verifiche statiche sviluppate in fase di progettazione (Fig 3). In questo senso risulta fondamentale che gli elementi di guarnizione vengano studiati ulteriormente nella tipologia delle connessioni e nelle loro caratteristiche materiche. La semplificazione degli elementi e il feedback continuo con gli sviluppatori del software ha come fine ultimo l'implementazione delle performance dello stesso affinché sia in grado di analizzare i sistemi di facciata.

b) Testing Phase

Per la seconda fase sperimentale è stata avviata la fase di progettazione dei Mock-Up da testare grazie al supporto della sezione TCLab, seguendo protocolli normati. Durante le attività di studio e analisi per la progettazione del Mock-Up da testare sono state valutate le dimensioni dello stato di fatto della camera di prova. I risultati attesi riguardano la lettura del comportamento dinamico della facciata commerciale della Ponzio S.r.l., in modo tale da poterla migliorare sotto l'aspetto sismico. Sono stati elaborati i disegni tecnici e le distinte di lavorazione dei materiali/elementi da realizzare, ponendo l'attenzione sulla progettazione degli elementi di connessioni utili per collocare il provino all'interno della camera di prova, restituendo una condizione reale del sistema facciata. La configurazione dell'assetto tipologico del Mock-Up ha avuto seguito con il disegno del posizionamento dello stesso all'interno della camera di prova TCLab, in modo tale da valutare le distanze relative alle travi mobili della camera e alla staffa di ancoraggio a solaio per montanti (150 mm) del Mock-Up e progettare di conseguenza un sistema di ancoraggio alle travi mobile e sismica della camera di prova. Se nella fase di simulazioni le analisi sono state condotte per le condizioni di sicurezza, simulando gli spostamenti che vengono imposti per le procedure normative degli stress sismici, nel caso dei test di laboratorio i provini verranno sollecitati rispettivamente per le condizioni di servizio rispetto alla normativa europea sulla permeabilità all'aria, acqua e vento, ma anche nelle condizioni di sicurezza, seguendo la normativa americana 501.6-09 "*Recommended Dynamic Test Method for Determining the Seismic Drift Causing Glass Fallout from a Wall System*".

Questi test vengono condotti al fine di verificare che il sistema di facciata sia in grado di supportare, nel suo ciclo di vita, azioni che possono indurre a danni permanenti, interrompendo la funzionalità del sistema involucro e di conseguenza dell'intero edificio (McFarquhar, 2011). La scelta di rifarsi alla normativa americana è giustificata dal fatto che, come emerso, in ambito europeo non ci sono di fatto protocolli di testing che postulano il comportamento sismico dinamico, in "crescendo". Per questo motivo e grazie alla flessibilità della sezione TCLab – le cui attrezzature consentono di riprodurre le normative internazionali – il test distruttivo

sarà eseguito adottando le indicazioni riportate all'interno della normativa AAMA 501.6-09. Per maggiore chiarezza, la Tabella 4, riporta in modo puntuale le procedure dei test che s'intendono adottare per le attività di testing.

Definito il Method Statement per le procedure di prova, la fase di verifica si orienta verso le attività di testing. Tali attività vengono intese come uno degli step successivi della ricerca delineandosi come "*sviluppi futuri*", meglio esplicitati nella parte conclusiva della tesi dottorale.

Tuttavia, l'esperienza condotta all'interno della sezione TCLab del BFL ha riguardato la partecipazione attiva rispetto al ruolo di assistente tecnico per la conduzione di alcuni test svolti su diverse tipologie di sistemi di facciate continue per prove sperimentali e in ambito di certificazione. Le esperienze condotte hanno portato al conseguimento delle conoscenze tecniche di base per procedure di prova normative – secondo i protocolli europei e americani – e alla costruzione del background scientifico, rispetto ai processi di testing per la valutazione prestazionale dei sistemi di involucro edilizio in ambiente simulato.

Le competenze acquisite hanno, quindi, consentito di perseguire la ricerca verso la redazione del *report tecnico di prova* ipotizzando il comportamento reale dei Mock-Up assoggettati a stress.

Prima di avviare la trattazione, risulta necessario porre l'attenzione sulla metodologia adottata, al fine di espletare il processo che ha condotto la ricerca verso la costruzione del report di prova. In questo processo, sono stati individuati due casi studio di riferimento identificandosi come *benchmarking*, ovvero come indicatori chiave *interni* ed *esterni* – rispetto la sezione del TCLab – il cui scopo riguarda l'ipotesi del possibile comportamento del caso sperimentale – sollecitato nelle condizioni di servizio e sicurezza. Tali benchmarking concernono:

- il primo caso studio, che costituisce il riferimento per gli *indicatori esterni* relativo ai risultati ottenuti dalle procedure di prova condotte e certificate, per le condizioni di servizio in ambito normativo europeo, sulla tipologia di facciata "*WS50 PG Curtain Wall*" all'interno del banco di prova dell'azienda Ponzio s.r.l.;
- il secondo caso studio, che costituisce il riferimento per gli *indicatori interni* relativo ai risultati ottenuti dalle procedure di prova condotte e certificate, per le condizioni di servizio e sicurezza in ambito normativo americano, su una tipologia di facciata continua di tipo Stick System – equiparabile ai Mock-Up sperimentali – testata all'interno della sezione TCLab del BFL.

Come si evince dalla Tabella 5, i due casi studio e di conseguenza gli indicatori derivanti fanno riferimento a due procedure di prova differenti,

identificate dai protocolli europei – per il caso studio 1 – e americani – per il caso studio 2. Ciò ha consentito, quindi, non solo di ipotizzare il comportamento dei Mock-Up, progettati per la fase sperimentale della ricerca, ma anche di individuare le principali differenze tra le procedure di prova condotte secondo i protocolli normativi europei e americani e di conseguenza delineare il processo metodologico che viene attuato per la conduzione dei test sugli involucri edilizi, attenzionando gli aspetti sismici legati ai sistemi di facciata convenzionali prodotti nel mercato italiano. Da questi assunti, il *report tecnico* si è strutturato seguendo la sequenza delle prove, precedentemente definite all'interno della tabella 4. L'attenzione viene posta sui possibili risultati per la prova in crescendo test secondo la normativa americana AAMA 501.6. Per il caso sperimentale, il test in crescendo verrà condotto applicando ai Mock-Up – rispettivamente con asse montate unico e spezzato – uno spostamento dinamico pari a ± 75 mm con una frequenza di $0,8 \pm 0,1/-0,0$ Hz per spostamenti fino a ± 75 mm.

La scelta di installare entrambi i provini sulla stessa campata del Test Lab infatti risiede nell'intenzione di testare in modo simultaneo i due provini, in modo tale da registrare le principali differenze nel comportamento dinamico dei sistemi di facciata sollecitati. Prima di trattare l'ipotesi dei possibili risultati, risulta necessario riportare le variabili che sono state messe in campo per il miglioramento del comportamento sismico dei sistemi di facciata, ovvero:

- l'utilizzo di due tipologie di cavallotti, quali elementi di connessione trasverso-montante;
- diminuzione dell'ingresso vetro nella parte di testa di entrambi i Mock-Up pari a 10 mm, al fine di evitare il contatto critico tra vetro-telaio;
- la scelta della tipologia di vetro stratificato che consente il miglioramento della risposta del sistema vetrato sottoposto a spostamenti di interpiano.

A fronte di ciò, si ipotizza infatti che per il caso del Mock-Up con montante ad asse unico si potrebbero registrare le seguenti condizioni:

- maggiori deformazioni nell'elemento montante a causa del comportamento rigido sottoposto a spostamenti che può causare ad alcune fessurazioni nella parte inferiore del Mock-Up dovuto al valore dell'ingresso vetro pari a 13 mm e all'utilizzo del cavallotto a pulsante per la connessione montante-trasverso inferiore. Tali deformazioni potrebbero causare la fuoriuscita dalla sede delle guarnizioni;
- piccole fessurazioni degli elementi vetrati nella parte centrale del Mock-Up, causate dal maggiore spostamento in corrispondenza della trave sismica, il cui comportamento viene però migliorato grazie alla presenza dei cavallotti tondi. Gli apribili potrebbero subire alcuni danni. Nello specifico, si

prevede che per il caso dell'apribile anta a ribalta, il sistema si comporti in modo migliore rispetto all'apribile a sporgere grazie alle sue dimensioni, tuttavia è possibile che si presentino alcune deformazioni che inficino il sistema di apertura. Diversamente per il secondo apribile, le dimensioni del vetro potrebbero comportare il contatto critico vetro-telaio portando ad alcune fessurazioni negli angoli che hanno subito il contatto;

- nella parte di testa del Mock-Up grazie alla posizione rispetto alla trave sismica e diminuzione dell'ingresso vetro è ipotizzabile che non si registri alcun tipo di fessurazione;
- gli elementi di connessione staffa al muro potrebbero subire alcune piccole deformazioni elastiche nella parte centrale del Mock-Up in corrispondenza della trave sismica.

Per il secondo Mock-Up invece, ad asse spezzato, il comportamento dinamico del sistema sollecitato riguarda le seguenti ipotesi:

- deformazioni minori nell'elemento montante, grazie all'utilizzo del canotto asolato che consente all'elemento verticale di compiere piccoli spostamenti registrando un comportamento più flessibile;
- piccole fessurazioni nella parte inferiore del Mock-Up dovute alle soluzioni tecnologiche di connessione montante e trasverso, costituite dall'utilizzo del cavallotto a pulsante, causando, come nel Mock-Up con montante ad asse unico, la fuoriuscita dalla sede delle guarnizioni;
- piccole fessurazioni degli elementi vetrati nella parte centrale del Mock-Up, causate dal maggiore spostamento in corrispondenza della trave sismica, il cui comportamento viene però migliorato grazie alla presenza dei cavallotti tondi. Gli apribili potrebbero subire alcuni danni. Nello specifico, si prevede che per il caso dell'apribile anta a ribalta, il sistema si comporti in modo migliore rispetto all'apribile a sporgere grazie alle sue dimensioni, tuttavia è possibile che si presentino alcune deformazioni che inficino il sistema di apertura. Diversamente per il secondo apribile, le dimensioni del vetro potrebbero comportare il contatto critico vetro-telaio portando ad alcune fessurazioni negli angoli che hanno subito il contatto;
- nella parte di testa del Mock-Up grazie alla posizione rispetto alla trave sismica e diminuzione dell'ingresso vetro è ipotizzabile che non si registri alcun tipo di fessurazione;
- gli elementi di connessione staffa al muro potrebbero subire alcune piccole deformazioni elastiche, minori rispetto al primo Mock-Up, in corrispondenza della trave sismica.

A fronte di tali considerazioni ipotizzate per i test sismici che saranno condotti in conformità delle

prescrizioni postulate all'interno della normativa AAMA 501.6-09, i risultati dovrebbero rispettare i seguenti limiti:

- non si sia verificata la caduta dei vetri;
- la deriva non abbia superato il 10% dell'altezza del vetro;
- il test in crescendo sia stato condotto fino allo spostamento stabilito.

Ciò consegue al superamento del test e conclusione del ciclo di prova stabilite per il caso sperimentale della presente ricerca.

V. DISCUSSION OF RESULTS AND CONCLUSIONS

I risultati ottenuti dalla fase di simulazione e testing vengono analizzati e sovrapposti al fine di individuare da un lato le possibili criticità che insorgono sui sistemi di facciata continua di tipo stick system ma anche di individuare i possibili processi di innovazione che comportano la progettazione di sistemi d'involucro contemporanei antisismici. Infine, viene proposta l'implementazione dei sistemi di connessione avanzata attraverso le innovazioni materiche provenienti da altri settori, rispetto le leghe a memoria di forma.

Nella prima fase di simulazione sono emersi alcuni limiti critici che risiedono nell'inadeguatezza degli stessi di "leggere" tutti gli elementi/materiali che costituiscono i sistemi di facciata e di conseguenza essere in grado di analizzarli in modo coerente rispetto le valutazioni che risultano dalle "antagoniste" attività di testing. Di fatti, i valori di picco superano le fasi di snervamento degli elementi in alluminio dei sistemi di facciata progettati entrando in forte contrasto con i valori nominali che sono risultati dalle analisi sviluppate per i singoli elementi del sistema.

Diversamente per la fase di testing, il riferimento con i benchmarking interni hanno consentito di ipotizzare il possibile comportamento dei Mock-Up sottoposti alle azioni sismiche in crescendo. Seppur vero che si suppone che durante i test non si verifichi la caduta dei vetri e non si subiscano danni permanenti all'elementi in alluminio, il sistema facciata potrebbe presentare alcune fessurazioni nelle regioni angolari del vetro inficiando le condizioni di servizio e non permettendo un'occupazione continua e immediata dopo un evento sismico.

La ricerca infatti, mira al miglioramento del comportamento dinamico dei sistemi di facciata continua in cui i danni delle componenti architettonici vengano previsti nella fase di progettazione non diminuendo il livello di prestazioni e la funzionalità dell'intero sistema edilizio. In questo senso, l'attenzione posta all'evoluzione di materiali intelligenti con effetti a memoria di forma SME e effetti superelastici SE ha riguarda la capacità del materiale di generare un movimento reversibile e trasferire all'intero sistema le capacità adattive, costituendo in un unico elemento in ciò che spesso viene attuato attraverso l'inserimento di

attuatori e sensori sempre più complessi ed informatizzati.

Da questi assunti, la ricerca configura la proposta di innalzare la qualità delle prestazioni sismiche dei dispositivi di connessione applicando – alle *connessioni con smorzamento per attrito* – una piastra di strato sottile con la lega a memoria di forma superelastica, la lega *NiTi*. L'implementazione del sistema di connessione avviene, quindi, applicando sulle "ali" delle staffe in acciaio una configurazione di tipo composito costituito da acciaio e lega a memoria di forma. La produzione della piastra con lega a memoria di forma può, altresì, avvenire servendosi delle recenti innovazioni provenienti dalla quarta rivoluzione industriale attraverso l'Additive Manufacturing dal campo biomedico, favorendo i processi del trasferimento tecnologico da altri settori di scienza e tecnica.

A fronte della discussione dei risultati ottenuti, la tesi si è proposta di rispondere all'esigenza di fornire una panoramica generale sulle indagini condotte nel settore accademico per l'implementazione delle performance delle facciate continue sollecitate alle azioni sismiche, attraverso metodi e verifiche sperimentali, in diversi domini di interesse. Da questo proposito, però, si può ritenere che il contributo si sia costituito in due sezioni principali. La prima sezione "teorica", legata alle indagini condotte nell'ambito scientifico di riferimento, non scevra dalla contaminazione delle diverse discipline di scienza e tecnica. La seconda sezione "sperimentale", invece, è legata alla messa in atto di alcune variabili emerse dalla prima sezione teorica per la valutazione del comportamento dinamico della tipologia Stick System, attualmente prodotta nel mercato, sottoposta alle azioni sismiche. Ciò in un'ottica che mira a rafforzare la ricerca di base e applicata e la promozione del trasferimento tecnologico dalla ricerca accademica al settore ricerca e sviluppo delle imprese. In conclusione, la ricerca mira a incrementare alcune funzionalità del software di simulazione "non convenzionale", SimSolid, aprendo la strada a diversi scenari al fine di intenderlo come valido strumento che sia in grado di valutare le performance sismiche del sistema di facciata, oggetto della sperimentazione, conducendo verso la diffusione dell'utilizzo del software. In questo senso, l'utilizzo del software risponde all'esigenza di adottare strumenti predittivi durante i processi di progettazione. La sperimentazione diventa campo fertile d'innovazione di prodotto, come tecnologia migliorata per la valutazione delle prestazioni sismiche nei sistemi di facciata, e d'innovazione di processo come metodologia atta a snellire procedure di progettazione delle facciate continue per garantire prodotti con prestazioni migliorate.

REFERENCES RÉFÉRENCES REFERENCIAS

1. Giglio, F. (Ed.). (2011). *Tecniche materiali progetto: Declinazioni di innovazione*. Gangemi Editore spa.
2. Wigginton, M., & Harris, J. (2013). *Intelligent skins*. Routledge.
3. Altomonte, S. (2005). *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica*. Alinea Editrice, Firenze.
4. Tucci, F. (2014). *Involucro, Clima, Energia, Qualità bioclimatica ed efficienza energetica in architettura nel progetto tecnologico ambientale della pelle degli edifici*, Altralinea Edizioni, Florence.
5. Milardi, M. (2017). Adaptive models for the energy efficiency of building envelopes. *Journal of Technology Innovations in Renewable Energy*, 6(4), 108-117.
6. Rossetti, M. (2019). *L'involucro architettonico contemporaneo*. Rimini: Maggioli Editore.
7. Conato, F., & Frighi, V. (2018). Il ruolo dell'innovazione nella definizione di nuovi paradigmi formali in Architettura. *TECHNE: Journal of Technology for Architecture & Environment*, 16.
8. Lucarelli, M. T., Milardi, M., Mandaglio, M., & Musarella, C. C. (2020). Macro phenomena vs micro responses. Multiscale approaches in the dynamic relationship between envelope and context. *AGATHÓN| International Journal of Architecture, Art and Design*, 7, 26-33.
9. Hartkopf, V., & Loftness, V. (1999). Global relevance of total building performance. *Automation in construction*, 8(4), 377-393.
10. Addington, D. M., & Schodek, D. L. (2012). *Smart materials and new technologies: for the architecture and design professions*. Routledge.
11. Mazzucchelli, E. S. (2018). L'involucro di edifici complessi: aspetti progettuali e costruttivi. *Modulo, Voi*, 415, 78-83.
12. Bedon, C., Honfi, D., Kozłowski, M., Vokáč Machalická, K., Santos, F., Wüest, T., ... & Vokáč, M. (2018). Key structural aspects for adaptive facades-Activity progress from the EU-COST Action TU1403 'Structural' Task Group.
13. Bedon, C., Marcin, K., Daniel, H., Klara, M., Martina, E., Filipe, S., ... & Christian, L. (2017). Evaluating the structural performance of adaptive facades: general rules and guidelines for classification, experimental testing and numerical modeling. In *ne-xt facades-COST Action TU1403 Adaptive Facades Network Mid Term Conference* (pp. 98-99). Philipp Lionel Molter, Moritz Mungenast, Matej Banozic, Oliver Enghardt, Tillmann Klein.
14. Sucuoğlu, H., & Vallabhan, C. G. (1997). Behaviour of window glass panels during earthquakes. *Engineering structures*, 19(8), 685-694.
15. Memari, A. M., Behr, R. A., & Kremer, P. A. (2003). Seismic behavior of curtain walls containing insulating glass units. *Journal of architectural engineering*, 9(2), 70-85.
16. Memari, A. M., Kremer, P. A., & Behr, R. A. (2006). Architectural glass panels with rounded corners to mitigate earthquake damage. *Earthquake Spectra*, 22(1), 129-150.
17. Behr, R. A. (Ed.). (2009). *Architectural glass to resist seismic and extreme climatic events*. Elsevier.
18. Bedon, C., & Amadio, C. (2018a). Glass facades under seismic events and explosions: a novel distributed-TMD design concept for building protection. *Glass Structures & Engineering*, 3(2), 257-274.
19. Iommi, M. (2018). The mediterranean smart adaptive wall. An experimental design of a smart and adaptive facade module for the mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 158, 1450-1460.
20. Loonen, R. C., Trčka, M., Cóstola, D., & Hensen, J. L. (2013). Climate adaptive building shells: State-of-the-art and future challenges. *Renewable and sustainable energy reviews*, 25, 483-493.
21. Grillo, E., & Sansotta, S. (2021). Experimentation of a new adaptive model for Envelope Systems. *Possible and Preferable Scenarios of a Sustainable Future*, 166.
22. Hareer, R. W. (2007). *Seismic response of building façade system with energy absorbing connections* (Doctoral dissertation, Queensland University of Technology).
23. Moon, K. S. (2009). Tall building motion control using double skin façades. *Journal of architectural engineering*, 15(3), 84-90.
24. Lee, H., Oh, M., Seo, J., & Kim, W. (2021). Seismic and energy performance evaluation of large-scale curtain walls subjected to displacement control fasteners. *Applied Sciences*, 11(15), 6725.
25. Pinelli, J. P., Craig, J. I., & Goodno, B. J. (1995). Energy-based seismic design of ductile cladding systems. *Journal of Structural Engineering*, 121(3), 567-578.
26. Goodno, B. J., Craig, J. I., Dogan, T., & Towashiraporn, P. (1998). *Ductile Cladding Connection Systems for Seismic Design*. Gaithersberg, MD: Building and Fire Research Laboratory, NIST.
27. Khoraskani, R. A. (2015). *Advanced connection systems for architectural glazing*. Springer International Publishing.
28. Bedon, C., & Amadio, C. (2017). Enhancement of the seismic performance of multi-storey buildings by means of dissipative glazing curtain walls. *Engineering Structures*, 152, 320-334.
29. Gong, Y., Cao, L., Laflamme, S., Ricles, J., Quiel, S., & Taylor, D. (2019a). Motion-based design approach for a novel variable friction cladding connection used in wind hazard mitigation. *Engineering Structures*, 181, 397-412.

29. Gong, Y., Cao, L., Laflamme, S., Ricles, J., Quiel, S., & Taylor, D. (2019b). Variable friction cladding connection for seismic mitigation. *Engineering Structures*, 189, 243-259.
30. Bedon, C., & Amadio, C. (2018). Glass facades under seismic events and explosions: a novel distributed-TMD design concept for building protection. *Glass Structures & Engineering*, 3(2), 257-274.
31. Di Giovanni, G., & Bernardini, D. (2020). Vibration damping performances of buildings with moving facades under harmonic excitation. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 1-10.
32. Langella, C. (2021). *Hybrid design: progettare tra tecnologia e natura*. FrancoAngeli.
33. Lucarelli, M. T., Mandaglio, M., & Pennestrì, D. (2012). The building envelope between process and product innovation. FrancoAngeli.
34. Mandaglio, M. (2011). L'innovazione dell'involucro edilizio tra tecniche di ibridazione e qualità dei materiali (Doctoral dissertation, Università Mediterranea di Reggio Calabria).
35. Hietanen, S. (2003). ER fluids and MR materials-Basic properties and some application developments. In *vtt symposium* (Vol. 225, pp. 33-50). VTT; 1999.
36. Andrawes, B., & DesRoches, R. (2005). Unseating prevention for multiple frame bridges using superelastic devices. *Smart materials and structures*, 14(3), S60.
37. Zareie, S., Issa, A. S., Seethaler, R. J., & Zabihollah, A. (2020, October). Recent advances in the applications of shape memory alloys in civil infrastructures: A review. In *Structures* (Vol. 27, pp. 1535-1550). Elsevier.
38. Graesser, E. J., & Cozzarelli, F. A. (1991). Shape-memory alloys as new materials for aseismic isolation. *Journal of engineering mechanics*, 117(11), 2590-2608.
39. Sun, L., Wang, T. X., Chen, H. M., Salvekar, A. V., Naveen, B. S., Xu, Q., ... & Huang, W. M. (2019). A brief review of the shape memory phenomena in polymers and their typical sensor applications. *Polymers*, 11(6), 1049.
40. Elattar, S. M. S. (2013). Smart structures and material technologies in architecture applications. *Scientific Research and Essays*, 8(31), 1512-1521.
41. Song, G., Ma, N., & Li, H. N. (2006). Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering structures*, 28(9), 1266-1274.
42. Chan, R. W., & Albermani, F. (2008). Experimental study of steel slit damper for passive energy dissipation. *Engineering Structures*, 30(4), 1058-1066.
43. Drossel, W. G., Kunze, H., Bucht, A., Weisheit, L., & Pagel, K. (2015). Smart3-smart materials for smart applications. *Procedia Cirp*, 36, 211-216.
44. Casagrande, L., Sisinni, J., Bonati, A., Occhiuzzi, A., & Auricchio, F. (2019). Integrated shape memory alloy devices toward a high-performance glazed curtain wall seismic retrofit. *Engineering Structures*, 179, 540-555.
45. Casagrande, L., Menna, C., Asprone, D., & Auricchio, F. (2021). Civil infrastructures. In *Shape Memory Alloy Engineering* (pp. 731-755). Butterworth-Heinemann.
46. Huang, B., Chen, S., Lu, W., & Mosalam, K. M. (2017). Seismic demand and experimental evaluation of the nonstructural building curtain wall: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 100, 16-33.
47. Memari, A. M., & Schwartz, T. A. (2009). Glazing and curtain wall systems to resist earthquakes. *Architectural glass to resist seismic and extreme climatic events*, 28-63.
48. Aiello, C., Caterino, N., Maddaloni, G., Bonati, A., Franco, A., & Occhiuzzi, A. (2018). Experimental and numerical investigation of cyclic response of a glass curtain wall for seismic performance assessment. *Construction and Building Materials*, 187, 596-609.
49. Ogata, S., Kobayashi, I., & Fukuchi, Y. (1998). Consensus Making with Virtual Model for Construction Project. In *the Eighth International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence* (pp. 1217-1226).
50. Behr, M. (2008). Simplex space-time meshes in finite element simulations. *International journal for numerical methods in fluids*, 57(9), 1421-1434.
51. Memari, A. M., Shirazi, A., Kremer, P. A., & Behr, R. A. (2011). Development of finite-element modeling approach for lateral load analysis of dry-glazed curtain walls. *Journal of architectural engineering*, 17(1), 24-33.
52. McFarquhar, D. G. (2013). Testing Mockups and Field Inspection. In: Committee on Curtain Wall Systems. (2013). *Curtain wall systems: a primer*. American Society of Civil Engineers.
53. Bedon, C., & Amadio, C. (2018b). Numerical assessment of vibration control systems for multi-hazard design and mitigation of glass curtain walls. *Journal of Building Engineering*, 15, 1-13.

Table 1: Technical Characteristics Mock-Up

Profili		Curtain Wall WS50 Ponzio
Dimensioni		2 Mock-Up x 3050 mm (W) x 6860 mm (H)
Frame facciata	Montanti	125 mm x 50 mm (barre estruse)
	Traversi	129,5 mm x 50 mm (barre estruse)
	Tagliotermico	Distanziale in Polyammide
Vetro		Vetrocamera 55,2 + 16 + 55,2
Guarnizionivetro		Interna ed esterna in EPDM
Dimensioniapribile a sporgere		1800 x 1700 mm
Dimensioni apribile anta a ribalta		1250 x 1700 mm
Ingresso vetro		13 mm
		10 mm
Elementi di connessione trasverso-montante		Cavallotto a pulsante in alluminio
		Cavallotto tondo in alluminio
Sistemi di ancoraggio		Tubolare quadrato in acciaio 200 x 200 mm
		Staffa a muro in acciaio

Table 2: Material properties of Mock-Up elements

Materiale	Modulo di Elasticità [Gpa]	Rapport di Poisson	Densità [kg/m ³]	Carico di rottura [Gpa]
Acciaio	210	0,3	7850	0,35
Alluminio	69	0,33	2700	0,19
EPDM	0,1	0,3	2000	0,25
Polyammide	32	0,40	1140	0,8
PVC	34	0,41	1400	4,65
Vetro	72	0,22	2520	0,7

Table 3: Types of vulnerabilities arising through linear analysis on Mock-Up using Sim Solid

Componente	Tipologia di vulnerabilità
Apribile a sporgere	- Snervamento del telaio del vetro, con valori di stress pari a 440 MPa.
Anta ribalta	- Snervamento del telaio e conseguente espulsione del vetro, con valori di stress pari a 297 MPa.
Giunti meccanici	- Distorsione dei giunti meccanici installati sull'intera altezza dei montanti con valori di stress pari a 300 MPa; - Distorsione dei giunti meccanici installati sui traversi nelle regioni esterne, con valori di stress pari a 529 MPa.
Guarnizioni in EPDM	- Deformazione dell'elemento con conseguente perdita di funzione della pressione di attrito tra gli elementi in alluminio e le superfici vetrate.
Montanti	- Distorsione del montante in direzione dello spostamento imposto con valori di snervamento pari a 400 MPa; - Distacco tra montante e trasverso e conseguente espulsione del vetro dal telaio.
Traversi	- sforzo di compressione nelle regioni esterne del trasverso a causa del contatto rigido tra montanti e traversi che porta ad un distacco degli stessi.
Vetri	- Valori di stress che identificano la fase di fessurazione e conseguente rottura della superficie vetrata, i cui valori di stress sono pari a 155 MPa.

Table 4: Method Statement Project Mock-Up

Permeabilità all'aria	UNI EN 12153:2002
Tenuta all'acqua sotto pressione statica	UNI EN 12155:2002
Prova di Resistenza al carico del vento – funzionalità 100%	UNI EN 12179:2002
Test sismico statico	UNI EN 13830:2015
Ripetizioni – permeabilità all'aria – tenuta all'acqua statica	UNI EN 12153:2002 UNI EN 12155:2002
Prova di Resistenza al carico del vento – sicurezza 150%	UNI EN 12179:2002
Crescendo Test	AAMA 501.6-01

Table 5: Method Statement Case studies

Tipologia di test	Normativa di riferimento		
	Caso studio 1	Caso studio 2	Caso sperimentale
Permeabilità all'aria	UNI EN 12153: 2002	ASTM 283-04 (2012)	UNI EN 12153:2002
Tenuta all'acqua in regime statico	UNI EN 12155: 2002	ASTM E 331-00 (2009)	UNI EN 12155:2002
Resistenza al carico del vento	UNI EN 12179: 2002	ASTM E 330-02 (2010)	UNI EN 12179:2002
Racking test	–	AAMA 501.4.00	UNI EN 13830:2015
Ripetizioni: – permeabilità all'aria – tenuta all'acqua statica	UNI EN 12153: 2002 UNI EN 12155: 2002	ASTM 283-04 (2012) ASTM E 331-00 (2009)	UNI EN 12153:2002 UNI EN 12155:2002
Prova di Resistenza al carico del vento – sicurezza 150%	UNI EN 12179:2002	ASTM E 330-02 (2010)	UNI EN 12179:2002
Crescendo Test	–	AAMA 501.6-01	AAMA 501.6-01



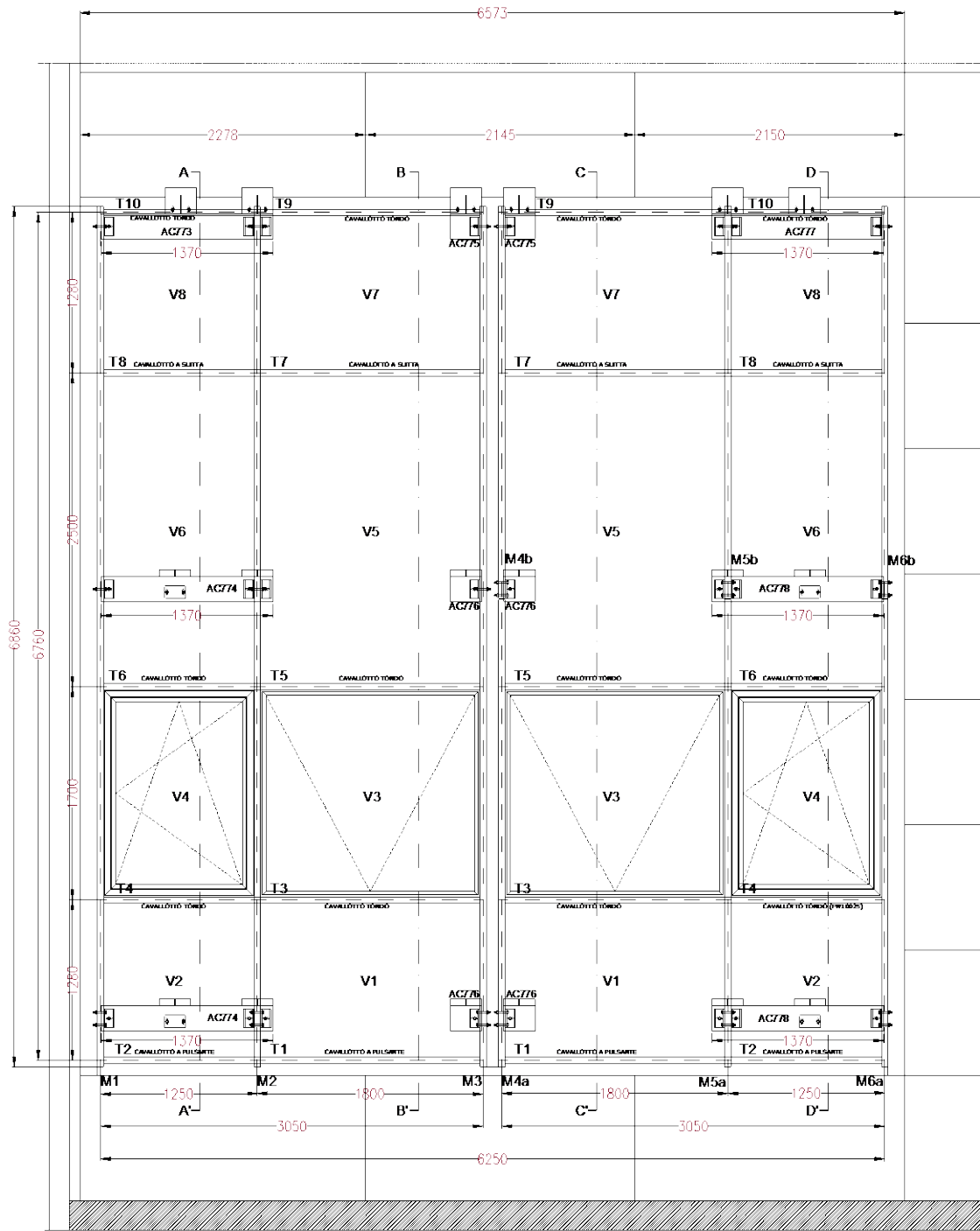


Fig.1: Elevation Project Mock-Up

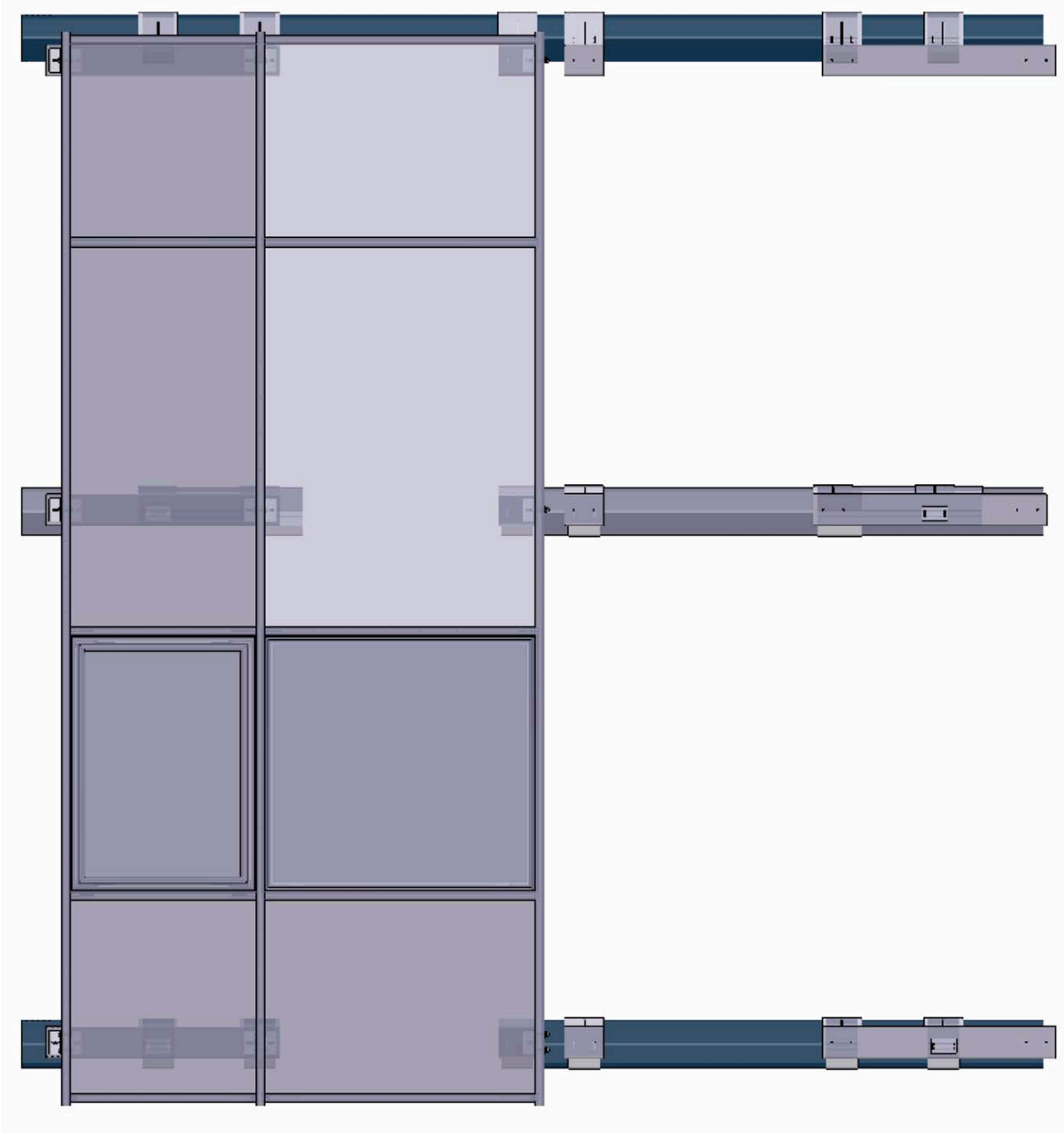


Fig. 2: Mock-Up modelling with single-axis strut and structural system of the test chamber of the TCLab section of the Building Future Lab



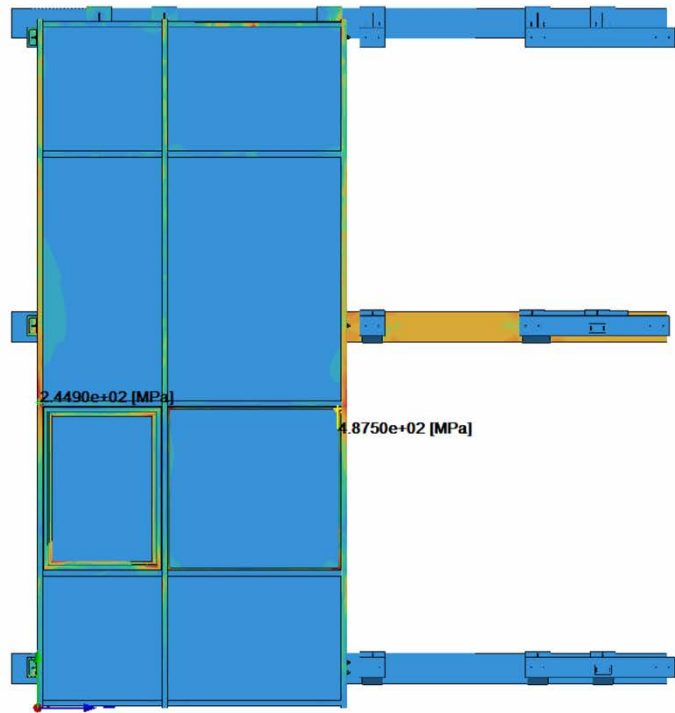
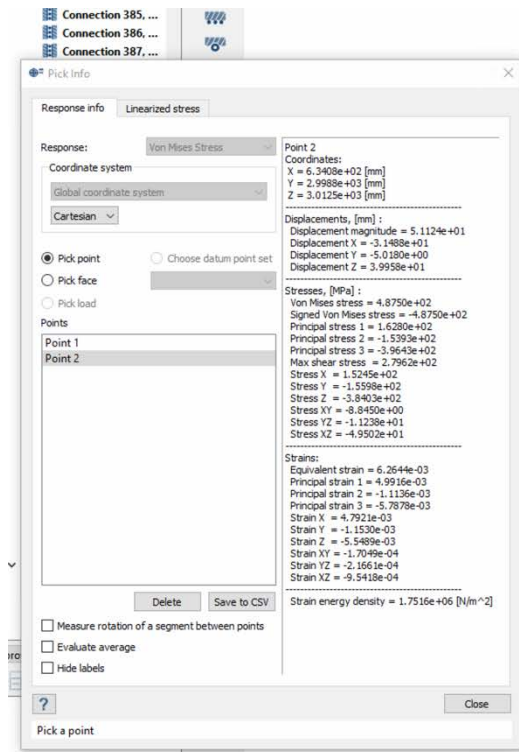


Fig. 3: Results of linear analysis conducted on Sim Solid software