

ABSTRACT ITA

L'involucro edilizio è chiamato a garantire prestazioni di resistenza strutturale, efficienza energetica e comfort; di conseguenza è sottoposto a diverse prove di laboratorio al fine di verificare i requisiti richiesti. Parallelamente agli studi sempre più pervasivi relativi agli aspetti architettonici dell'involucro edilizio di ultima generazione, la sua progettazione per modelli e le verifiche prestazionali ad esso associate costituiscono un tema attuale e in rapida evoluzione all'interno del dibattito disciplinare.

In questo scenario lo scopo della ricerca è indagare la possibilità di introdurre e sviluppare nelle fasi di concettualizzazione e di ingegnerizzazione dell'involucro, simulazioni e verifiche prestazionali su base digitale, utilizzando modelli parametrici tridimensionali dell'involucro che possano così anticipare il risultato dei test in laboratorio e quindi facilitare e rendere più snello ed economico il percorso di progettazione, almeno nelle parti iniziali del suo processo.

In linea con il Programma Nazionale per la Ricerca 2021-2027 (PNR) e il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), la presente ricerca mira ad utilizzare un approccio digital twin, in combinazione con il BIM, per la modellazione dell'involucro e la successiva digitalizzazione della prova di laboratorio.

ABSTRACT ENG

The building envelope is required to provide structural strength, energy efficiency and comfort performance; consequently, it is subjected to various laboratory tests in order to verify the required requirements. In parallel with the increasingly pervasive studies related to the architectural aspects of the latest generation of the building envelope, its design by models and associated performance testing is a current and rapidly evolving topic within the disciplinary debate.

In this scenario, the purpose of this research is to investigate the possibility of introducing and developing in the conceptualization and engineering phases of the envelope, digitally based simulations and performance verifications, using three-dimensional parametric models of the envelope that can thus anticipate the result of laboratory tests and thus facilitate and streamline and economize the design path, at least in the initial parts of its process.

In line with the National Research Program 2021-2027 (PNR) and the National Recovery and Resilience Plan (PNRR), the present research aims to use a digital twin approach, in combination with BIM, for envelope modeling and subsequent digitization of laboratory testing.

Antonino Gulletta

SIMULAZIONI E VERIFICHE PRESTAZIONALI PER INVOLUCRI EDILIZI

Approcci digital twin e procedure BIM based per prove su modelli digitali





Dottorato in Architettura
Dottorato in Diritto ed Economia
Dottorato in Ingegneria dell'Informazione
Dottorato in Scienze Agrarie, Alimentari e Forestali

coordinatore
prof. Paolo Fuschi

Collegio dei docenti
Dottorato di Ricerca in Architettura
XXXV ciclo

Fallanca Concetta (coordinatore)

Aragona Stefano

Arena Marinella

Barresi Alessandra

Barrile Vincenzo

Bevilacqua Carmelina

Bonsignore Carmelo Peter

Calabrò Francesco

Cardullo Francesco

Carrà Natalina

Colistra Daniele

De Capua Alberto

Della Spina Lucia

Fallanca Concetta

Fatta Francesca

Fuschi Paolo

Gattuso Domenico

Giglio Francesca

Ginex Gaetano

Gioffrè Vincenzo

Hopkins Andrew James

Impollonia Nicola

Lauria Massimo

Lucarelli Maria Teresa

Manfredi Tommaso

Marcianò Claudio

Marino Domenico

Martinelli Flavia

Martorano Francesca

Massimo Domenico Enrico

Mediati Domenico

Milardi Martino

Mistretta Marina

Molica Bisci Giovanni

Morabito Valerio Alberto

Moraci Francesca

Musolino Mariangela

Nava Consuelo

Neri Gianfranco

Passalacqua Francesca

Pisano Aurora Angela

Prampolini Franco

Pucinotti Raffaele

Pultrone Gabriella

Raffa Venera Paola

Rocca Ettore

Russo Antonello

Santini Adolfo

Sarlo Antonella Blandina Maria

Scamardì Giuseppina

Sofi Alba

Taccone Antonio

Tornatora Rosa Marina

Trombetta Corrado

Villari Alessandro

In copertina
Tre torri - City Life Milano

SCUOLA DI DOTTORATO
Università Mediterranea di Reggio Calabria

DIPARTIMENTO
PAU: Patrimonio, Architettura, Urbanistica
dArTe: Architettura e Territorio

DOTTORATO DI RICERCA
Architettura
Architecture: Theory and Design
S.S.D. ICAR/12
XXXV CICLO

SIMULAZIONI E VERIFICHE PRESTAZIONALI PER INVOLUCRI EDILIZI

Approcci digital twin e procedure BIM based per prove su modelli digitali

Dottorando
Antonino Gulletta

Tutor
prof. Massimo Lauria

Coordinatore del dottorato
prof.ssa Concetta Fallanca

Ringraziamenti

Desidero ringraziare tutti coloro che hanno contribuito al raggiungimento di questo importante traguardo.

Prima di tutto, vorrei ringraziare il mio tutor, il prof. Massimo Lauria, e la prof.ssa Maria Azzalin, che sono sempre stati presenti e disponibili durante tutto il mio percorso di ricerca.

Un ringraziamento particolare va ai colleghi che ho incontrato durante il percorso di studi. Mi avete sostenuto e siete sempre stati pronti ad aiutarmi. In particolare ringrazio Evelyn, Cosimo e Ciccio.

Vorrei ringraziare anche i miei amici, i quali hanno affiancato gioia e divertimento al mio percorso di studi: Raffaele, Alessandro, Daniele, Alfredo, Veronica, Felisia, Claudia, Annalisa, Lea, Michele, Alessio e Domenica.

Un ringraziamento speciale va anche al coordinatore del corso di dottorato, la prof.ssa Francesca Fatta.

Altri ringraziamenti vanno a tutti i colleghi ciclisti, alla mia squadra e al gruppo delle sei.

Infine, vorrei ringraziare i miei genitori, mio fratello, mia zia, i miei nonni e Lucia senza i quali tutto questo non sarebbe stato possibile.

Note biografiche

Gulletta Antonino ha conseguito la laurea triennale in Ingegneria Civile e dei Sistemi Edilizi L-7 nel 2016, all'età di 21 anni, con una tesi sperimentale dal titolo "*Analisi degli effetti di accelerogrammi registrati near source su struttura di grande luce*". Nel 2018 si è laureato con lode in Ingegneria Civile L.M. 23, indirizzo protezione sismica, presso l'Università degli Studi di Messina, discutendo la tesi "*Incremento della capacità di strutture in fase sismica mediante dissipatori*".



Antonino Gulletta

SIMULAZIONI E VERIFICHE PRESTAZIONALI PER INVOLUCRI EDILIZI

Approcci digital twin e procedure BIM based per prove su modelli digitali

Indice

- 11 Abstract
- 13 Introduzione
- 15 Capitolo 1 – Posizione del problema, obiettivi e metodologia
 - 1.1 Simulazioni e verifiche prestazionali per involucri edilizi
 - 1.2 Obiettivi della ricerca
 - 1.3 Articolazione della ricerca e metodologia
- 21 Capitolo 2 - Lo stato dell'arte
 - 2.1 Introduzione
 - 2.2 Involucro edilizio
 - 2.2.1 Evoluzione dell'involucro
 - 2.2.2 Classificazione in funzione della tipologia di funzionamento
 - 2.2.3 Classificazione in funzione dello schema costruttivo
 - 2.2.4 Materiali dell'involucro
 - 2.2.5 Requisiti e prestazioni
 - 2.3 Simulazioni e verifiche prestazionali per involucri edilizi
 - 2.3.1 Prove in laboratorio e in situ
 - 2.3.2 Normativa Nazionale ed Europea
 - 2.3.3 Normativa Americana
 - 2.3.4 Confronto tra le varie normative
 - 2.4 Approcci digital twin e procedure BIM based per simulazioni e verifiche prestazionali
 - 2.4.1 Il Digital Twin
 - 2.4.2 Il BIM per simulazioni e verifiche prestazionali

59 Capitolo 3 - Ipotesi di lavoro e definizioni di simulazioni su modelli digitali

- 3.1 Presupposti operativi
- 3.2 Delimitazione del campo di indagine
 - 3.2.1 Prove e verifiche digitali che simulano il laboratorio
 - 3.2.2 Prove e verifiche digitali che simulano l'esistente
 - 3.2.3 Prove e verifiche di laboratorio dell'ITC del CNR
- 3.3 Modellazione BIM
- 3.4 Revit
 - 3.4.1 Famiglie
 - 3.4.2 Facciate continue
- 3.5 Il BIM e l'interoperabilità
 - 3.5.1 Scelta del software di calcolo FEM
- 3.6 Il BIM per prove strutturali
- 3.7 Il BIM per prove ambientali/tecnologiche

87 Capitolo 4 - Verifica e sperimentazione

- 4.1 Simulazioni e verifiche prestazionali digitali che emulano il laboratorio
 - 4.1.1 Realizzazione modello BIM
 - 4.1.2 Realizzazione modello FEM
 - 4.1.3 Applicazione prova sismica AAMA 501.6
- 4.2 Simulazioni e verifiche prestazionali digitali dell'esistente
 - 4.2.1 Nuvola di punti
 - 4.2.2 Realizzazione modello BIM
 - 4.2.3 Realizzazione modello FEM
 - 4.2.4 Applicazione prova sismica AAMA 501.6
- 4.3 Simulazioni e verifiche prestazionali di laboratorio
 - 4.3.1 Test AAMA 501.6 realizzato presso il laboratorio ITC del CNR

119	Capitolo 5 - Conclusioni
	5.1 Risultati
	5.2 Considerazioni conclusive
137	Riferimenti bibliografici
141	Riferimenti sitografici

Abstract

The building envelope is the architectural element that delimits the building organism perimeter and consists of technical enclosing, vertical, horizontal and inclined elements (Brock, L., 2005). Recently, due to the growing interest in environmental issues, this definition has been modified. Today the building envelope is a dynamic interface element in continuous and active interaction with external climatic factors. Specifically, "curtain wall means a part of the building envelope made of a structure usually consisting of horizontal and vertical profiles, connected together and anchored to the supporting structure of the building and containing fixed and/or openable infills, which provides all the required functions of an interior or exterior wall or part of it, but does not contribute to the load-bearing capacity or stability of the building structure" (UNI EN 13830:2020). The building envelope is required to provide structural strength, energy efficiency and comfort performance; consequently, it is subjected to various laboratory tests in order to verify the required requirements. Thus, in parallel with the increasingly pervasive studies related to the architectural aspects of the latest generation of the building envelope, its design by models and associated performance testing is a current and rapidly evolving topic within the disciplinary debate.

In this scenario, the purpose of this research is to investigate the possibility of introducing and developing in the conceptualization and engineering phases of the envelope, digitally based simulations and performance verifications, using three-dimensional parametric models of the envelope that can thus anticipate the result of laboratory tests and thus facilitate and streamline and economize the design path, at least in the initial parts of its process.

In line with the National Research Program 2021-2027 (PNR) and the National Recovery and Resilience Plan (PNRR), the present research aims to use a digital twin approach, in combination with BIM, for envelope modeling and subsequent digitization of laboratory testing.

Keywords: building envelope; digital twin; Building Information Modeling; performance testing; interoperability.

Introduzione

Il presente lavoro di ricerca intende studiare processi innovativi di simulazione e verifiche prestazionali degli involucri edilizi, in particolar modo delle facciate continue. Le finalità individuate dalla ricerca sono quelle di ridurre tempi e costi delle prove in laboratorio anticipando tali risultati mediante digitalizzazione dei test, garantendo un alto livello di affidabilità del risultato.

Il **Capitolo 1** propone l'analisi del problema sulle simulazioni e sulle verifiche prestazionali per involucri edilizi; inquadra gli obiettivi della ricerca e la metodologia utilizzata.

Il **Capitolo 2** presenta l'analisi dello stato dell'arte sull'involucro, sulle simulazioni e le verifiche prestazionali, e sull'approccio Digital Twin.

Il **Capitolo 3** presenta le ipotesi di lavoro e i presupposti operativi. Viene delimitato il campo di indagine scegliendo il caso studio e la prova che verrà digitalizzata ed applicata su modelli di involucro edilizio. Propone la descrizione della modellazione BIM e di come potere applicare tale tecnologia al fine di simulare le prove sugli involucri edilizi. Inoltre, tale fase è dedicata all'interoperabilità tra BIM e software di analisi strutturale. In questo contesto viene descritto il formato di scambio di informazioni IFC, i vantaggi e gli svantaggi che esso genera e i motivi che hanno portato alla scelta di uno specifico software di analisi strutturale.

Il **Capitolo 4** propone la parte applicativa e sperimentale della ricerca. Tale sezione restituisce: (i) la modellazione BIM su Autodesk Revit dell'involucro edilizio, (ii) il trasferimento al software di analisi strutturale Sap2000 e la relativa modellazione FEM, (iii) l'applicazione della prova sismica dinamica secondo normativa americana AAMA 501.6-09.

Il **Capitolo 5** restituisce la sezione conclusiva della tesi comprendente i risultati e riflessioni su eventuali sviluppi futuri.

Posizione del problema, obiettivi e metodologia

Chapter 1 returns the problem analysis on simulations and performance tests for building envelopes. The curtain wall is subjected to certain tests in order to evaluate its performance: (i) structural, when subjected to external actions, e.g., earthquake and wind; (ii) energetic and environmental, e.g., thermal insulation, acoustic and water penetration, air.

The objective of the research is the digital simulation of the AAMA 501.6-09 dynamic seismic test, applied on different scenarios, having in common the same type of curtain wall (Poliedra Sky 50), by Digital Twin approach, with the aim of predicting the result of such test on the envelope and consequently reducing costs and time in the design and testing phase.

In addition, this section presents the methodology used for the realization of the research. The work is mainly divided into four phases: the first one dedicated to the analysis of the state of the art; the second one related to the delimitation of the field of investigation and the choice of the case study, as well as the classification and declination of the different laboratory tests required by national and international standards; the third one focused on the applicative and experimental part of the research, namely the BIM modeling of the envelope, the transfer of the BIM model to the structural analysis software, and the simulation and digitization of the seismic test applied on different scenarios; and the last part, on the other hand, dedicated to the concluding section of the thesis.



Fig. 1.1 Winter Garden, World Trade Center (Reconstructed). Courtesy of Thornton Tomasetti. Fonte: McFarquhar, D., 2012.

1.1 Simulazioni e verifiche prestazionali per involucri edilizi

Gli edifici, nei loro elementi non strutturali, devono essere sottoposti ad alcuni test, come previsto dalle normative vigenti, al fine di verificarne l'attitudine a soddisfare determinati requisiti, sia che si tratti di specifiche strutturali, sia energetiche o di comfort.

Negli ultimi anni, processi e strategie come Digitalizzazione e Industria 4.0 hanno acquisito sempre più valore nel settore delle costruzioni. La progettazione in ambito civile e le relative prassi operative sono soggette ad una rivoluzione di metodologie di gestione che fa riferimento ad un emergente protagonista tecnologico, il BIM o Building Information Modeling. In particolare, come si vedrà nei paragrafi successivi, il digital twin, definito attraverso l'uso degli strumenti di interoperabilità BIM, servirà per la modellazione della facciata continua Poliedra Sky 50, e la successiva digitalizzazione e simulazione della prova sismica di laboratorio sugli involucri edilizi, seguendo gli standard forniti dalla normativa americana.

1.2 Obiettivi della ricerca

In linea con il Programma Nazionale per la Ricerca 2021-2027 (PNR) e il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR), la presente ricerca si colloca dentro l'Area Tematica della digitalizzazione, in particolar modo del "Digital Twin". L'innovazione tecnologica degli ultimi decenni in questo ambito si affaccia oggi in modo predominante nel mondo delle costruzioni e consente, grazie alla digitalizzazione, un'analisi degli edifici e dei suoi componenti più accurata, semplificata e sicura.

Come riportato nel PNR "i digital twin consentono una gestione ottimale di edifici ed infrastrutture intelligenti, attraverso il monitoraggio permanente dell'integrità strutturale e della funzionalità operativa di fabbricati, strade, ferrovie, porti, aeroporti, ponti, dighe e altre installazioni, nonché della qualità di aria e acque, dell'ambiente, del ciclo dei rifiuti e dei sistemi di mobilità e logistica per la salute pubblica e i servizi sanitari e di emergenza, per la vivibilità e l'accessibilità delle città, e per la valorizzazione del patrimonio culturale e la fruibilità turistica".

Lo scopo della ricerca è quello di simulare una serie di prove e test prestazionali su base digitale sull'involucro edilizio che possano verificare la fattibilità operativa e l'efficacia dell'utilizzo dei test in laboratorio, al fine di:

1. Ridurre i tempi del processo di progettazione;
2. Ridurre i costi delle prove sperimentali.

La presente ricerca ha portato:

1. Alla messa a punto di un modello tridimensionale e parametrico digitalizzato in grado di riprodurre e simulare la prova sismica dinamica secondo normativa Americana AAMA 501.6-09;
2. Al confronto tra: (i) il test realizzato al vero, in scala 1:1, presso il laboratorio del CNR sulla facciata fuori opera; (ii) la prova digitalizzata su un involucro riproducendo le stesse caratteristiche del laboratorio; (iii) e la simulazione dello stesso test digitalizzato su una facciata esistente. Replicare il caso studio su più situazioni ha permesso di confrontare e di analizzare i risultati ottenuti in una visione più ampia, offrendo di conseguenza maggiori vantaggi rispetto ad una singola analisi. I dati così raccolti sono maggiormente attendibili e danno maggior rigore allo studio del fenomeno.

In sintesi le tre esperienze sviluppate e analizzate hanno consentito una lettura critica incrociata tra il nuovo, l'esistente e gli esiti del test condotto in laboratorio.

1.3 Articolazione della ricerca e metodologia

Sul piano metodologico la tesi è articolata in quattro fasi.

La **prima fase** è stata dedicata allo studio dello stato dell'arte sull'involucro, sulle simulazioni e le verifiche prestazionali e sull'approccio Digital Twin: (i) l'involucro edilizio, l'evoluzione storica e la diversa classificazione; (ii) le simulazioni e le verifiche prestazionali, con specifici approfondimenti sulle prove da effettuare in laboratorio od in situ per raggiungere i requisiti richiesti dalle normative; (iii) gli approcci digital twin e le procedure BIM based per simulazioni e verifiche prestazionali.

Esiste una vasta gamma di test già codificati dalle norme, che vengono utilizzati, in funzione della tipologia di edificio, dei materiali, etc, al fine di garantire determinati requisiti di funzionalità strutturale, ambientale e tecnologica. In particolare, sono state studiate e approfondite le prove, e di conseguenza i requisiti, richiesti dalla Normativa Italiana, da quella Europea ed infine da quella Americana. È importante sottolineare che la Normativa Italiana non è altro che la versione ufficiale in lingua italiana della Normativa Europea, in cui vengono riportati i requisiti prestazionali, le prove da effettuare in laboratorio e in sito e il metodo per la realizzazione dei test. Inoltre, esiste una sostanziale differenza, dal punto di vista sismico, tra la Normativa Europea sulle facciate continue EN 13830, la quale realizza esclusivamente una prova sismica statica, e la normativa statunitense AAMA che prevede, invece, oltre alla prova statica quella di tipo "dinamica", il cosiddetto "crescendo test".

Vengono qui di seguito riportati i principali test secondo normativa Americana, presi come riferimento nello sviluppo della ricerca:

- Prova sismica statica (AAMA 501.4-09): questo test prevede di calcolare le prestazioni dell'involucro quando sottoposto a degli spostamenti in direzione orizzontale, con caratteristiche tali da simulare un evento sismico.
- Prova sismica dinamica (AAMA 501.6-09): si differenzia da quella statica in quanto viene condotto un "crescendo test", ovvero l'involucro viene sottoposto a spostamenti via via maggiori.
- Resistenza a carico da vento (ASTM E330-02): l'involucro viene sollecitato con una determinata pressione in funzione del carico di progettazione; calcola gli spostamenti in determinati punti di riferimento.
- Permeabilità all'aria (ASTM E283-04): tale prova prevede una procedura standard al fine di determinare il tasso di perdita d'aria dell'involucro, di finestre esterne e porte sottoposte a una differenza di pressione.
- Prova statica di penetrazione dell'acqua (ASTM E331-00): il test ha il compito di registrare eventuali penetrazioni del liquido, e viene eseguito spruzzando una quantità costante e uniforme di acqua sulla superficie esterna dell'involucro.
- Prova dinamica di penetrazione dell'acqua (AAMA 501.1-05): rispetto alla prova statica, in questo caso il test prevede l'utilizzo di un macchinario che oltre allo spruzzo d'acqua simuli anche la presenza di forte vento (per esempio mediante un generatore eolico).

Prove involucri edilizi	Normativa	
	Italiana/Europea	Americana
Prova sismica	UNI EN 13830	AAMA 501.4-09 AAMA 501.6-09
Prova di resistenza al vento	UNI EN 13116 UNI EN 12179	ASTM E330-02
Prova di permeabilità all'aria	UNI EN 12152 UNI EN 12153	ASTM E283-04
Prova di tenuta all'acqua	UNI EN 12154 UNI EN 12155 UNI EN 13050 UNI EN 13051	ASTM E331-00 AAMA 501.1-05

Tab. 1 Elenco delle prove strutturali e tecnologiche sugli involucri edilizi con relativa normativa di riferimento.

La **seconda fase** ha previsto l'individuazione del caso studio e la delimitazione del campo di indagine. La vasta gamma di involucri a montanti e traversi utilizzati negli edifici, la documentazione ricavata dalla letteratura e le informazioni reperite dall'azienda Metra Building, hanno portato alla scelta della facciata Poliedra Sky-50 come caso studio di questa ricerca.

Tra i vari test strutturali e tecnologici (Tab. 1) a cui vengono sottoposti gli involucri al fine di soddisfare determinati requisiti, è stato scelto di riprodurre digitalmente e sottoporre in via sperimentale alla facciata Poliedra Sky-50 la prova sismica dinamica AAMA 501.6-09. La motivazione di tale scelta deriva dalla volontà di confrontarsi con una delle principali sfide attuali nell'ambito degli involucri edilizi, ovvero lo sviluppo di concetti di progettazione innovativi, al fine di incrementare la resistenza strutturale degli elementi componenti la facciata quando sottoposta alle forze ambientali, quali per esempio il sisma. Inoltre, si è deciso di operare seguendo la normativa Americana piuttosto che quella Europea, in quanto prevede, rispetto a quest'ultima, una prova sismica più completa, spingendo l'analisi verso lo stato limite ultimo, mediante l'applicazione del crescendo test (Fig. 1.2).

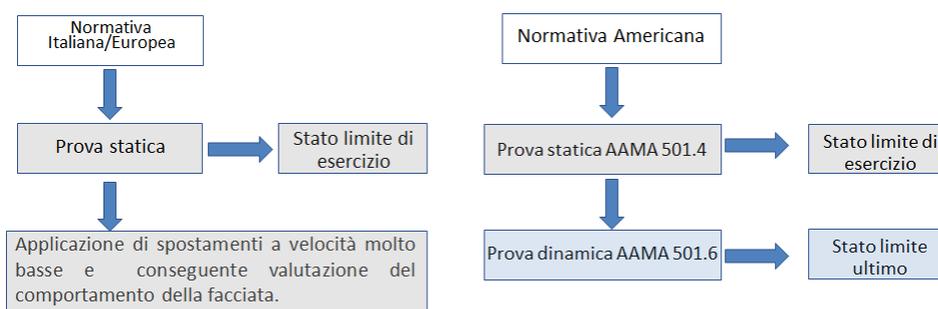


Fig. 1.2 Schema prova sismica secondo la normativa Italiana/Europea e Americana.

La **terza fase** è stata dedicata alla parte applicativa e "sperimentale" della ricerca. Vengono realizzati mediante Autodesk Revit due modelli: il primo che riguarda l'involucro edilizio per mezzo del quale verrà simulata la prova di laboratorio; (ii) il secondo invece riferito al modello tridimensionale dello scenario esistente, il quale sarà sottoposto alla verifica digitale del test.

L'attenzione si focalizza altresì sull'interoperabilità tra il software di modellazione BIM, Autodesk Revit, e quello di analisi strutturale, Sap2000. In questo contesto viene descritto il formato di scambio di informazioni IFC, i vantaggi e gli svantaggi che esso genera e i motivi per i quali è stato scelto Sap2000 come software di analisi strutturale.

In tale fase i modelli realizzati in BIM vengono trasferiti a Sap2000 al fine di simulare la prova sismica dinamica secondo normativa Americana. Tale trasferimento, per quanto intuitivo, presenta alcune criticità applicative. Sap2000, come qualunque altro software strutturale, acquisisce esclusivamente il modello analitico, trascurando le componenti architettoniche. La facciata continua realizzata su Revit è considerata quale elemento architettonico, per cui non viene trasferita su Sap2000, e di conseguenza viene trascurata la presenza dei montanti e dei traversi. Si può ovviare a questo problema modellando quest'ultimi come delle travi strutturali "beam", mentre i pannelli come elementi "shell".

Il modello digitalizzato è stato sottoposto alla prova sismica dinamica secondo normativa Americana: AAMA 501.6-09, Recommended Dynamic Test Method for Determining the Seismic Drift Causing Glass Fallout from a Wall System Panel. È un test dinamico focalizzato sulla resistenza al sisma di componenti architettoniche in vetro all'interno di sistemi di facciate continue.

La simulazione di questo test sull'involucro Poliedra Sky 50, emulando le caratteristiche del laboratorio, verrà messa a confronto con quella della medesima prova digitalizzata su un involucro esistente, realizzato sempre con la facciata continua Poliedra Sky 50. Un ulteriore confronto tra i due scenari appena descritti verrà effettuato con il test realizzato al vero presso il laboratorio del CNR sulla facciata fuori opera.

La **quarta fase** è stata dedicata alla sezione conclusiva della tesi. I risultati ottenuti consentono di evidenziare i vantaggi nella simulazione delle prove prestazionali, in ambiente digital twin, su modelli digitali di involucri edilizi, da effettuare prima dei test in laboratorio. In chiave futura, questo metodo, potrebbe portare alla definizione di un vero e proprio approccio digital twin che associa realtà fisica a realtà virtuale, consentendo di attivare un'analisi dei dati e un monitoraggio dei sistemi tale per cui è possibile ragionare in modalità predittiva. Utilizzando simulazioni appropriate si possono infatti prevedere anomalie, tempi di inattività e inefficienze.

Riferimenti bibliografici

American Architectural Manufacturers Association, *AAMA 501.4-00 Recommended Static Test Method For Evaluating Curtain Wall and Storefront Systems Subjected to Seismic And Wind Induced Interstory Drifts*, *AAMA 501.6-01 Recommended Dynamic Test Method For Determining The Seismic Drift Causing Glass Fallout From A Wall System*, (2001), 20 pages.

Bonham, M.B., *Bioclimatic Double-Skin Façades*, Routledge (2020) (350 pages).

Bouchard, J., *Digital Twins: Identical, But Different Partner*, Oliver Wyman, Report (2016).

De Gaetani, C. I., Mert, M., Migliaccio, F., *Interoperability Analyses of BIM Platforms for Construction Management*, applied sciences, 27 June 2020, (15 pages).

Elder, K.E., *Building Envelope*. In: Turner, W.C., Doy, S., Energy management handbook, 5th ed., pp. xviii, 856, Lilburn, GA., Fairmont Press; Marcel Dekker, New York (2007) 221-46.

Gerbino, S., Cieri, L., Rainieri, C., Fabbrocino, G., *On BIM Interoperability via the IFC Standard: An Assessment from the Structural Engineering and Design Viewpoint*, Applied Sciences, 2021, 11, 11430 (25 pages).

Giedion, S., *Spazio, tempo, architettura*, Seconda edizione Hoepli, (1979) 770 pages.

Haag, S., Anderl, R., *Digital twin – Proof of concept*, Manufacturing Letters, 15 (2018) 64-66.

Ilter, E., Tavi, A., Celik, O. C., *Full-scale performance testing and evaluation of unitized curtain walls*, Journal of Facade Design and Engineering 3 (2015) 39-47.

Lang, H.K., *Atlante delle Facciate*, Grande Atlante di Architettura (2005).

Malik, P. K., Sharma, R., et al. "*Industrial Internet of Things and its Applications in Industry 4.0: State of The Art*", Computer Communications 166, (2021) 125-139.

McFarquhar, D., *The Role of the Building Facade - Curtain Walls*, Building Enclosure Technology & Environment Council (National Institute of Building Sciences), (2012), 11 pages.

Ministero dell'Università e della Ricerca, *Programma Nazionale per la ricerca 2021-2027*, Delibera n.74/2020 182 pages.

Warner, S. A., *Test methods for performance of glazing systems and exterior walls during earthquakes and extreme climatic events*, Civil and Structural Engineering, (2009) pages 232-251.

William, F., *The Importance of BIM in Structural in Structural Engineering, The Greatest Change in Over a Century*, Structure magazine, (2008).

William, J. R. Curtis, *L'architettura moderna dal 1900*, terza edizione Phaidon, (2006) 736 pages.

Lo stato dell'arte

Chapter 2 presents a state-of-the-art analysis related to: (i) the building envelope, its historical evolution and different classification; (ii) simulations and performance verifications, with specific insights on the tests to be performed in the laboratory or in situ to achieve the requirements of the standards; and (iii) digital twin approaches and BIM based procedures for simulations and performance verifications.

Nowadays, the building envelope is considered as an active element that exchanges information daily between the external and internal environment, and no longer as a simple closure that delimits the spaces of a building.

Most of the existing studies in the literature on the building envelope are devoted to the factors that influence its performance, its energy efficiency, the transmission of heat from the outside to the inside, as well as thus its ability to return both summer and winter pleasant indoor temperatures while limiting energy consumption. The building envelope must also be durable, provide strength and stiffness.

In this regard, the design of building envelopes and associated performance testing is a current and rapidly evolving topic within the disciplinary debate.



Fig. 2.1 Thomas Herzog, Casa unifamiliare, Regensburg, Germania, 1977-1979. Fonte: Catalogo Thomas Herzog.

2.1 Introduzione

A caratterizzare un'opera non è esclusivamente la forma, ma anche e soprattutto l'involucro edilizio. Tale termine è piuttosto recente e nasce come evoluzione del concetto di chiusura, che identificava, come unità distinte tra loro, i tamponamenti esterni.

Il crescente interesse alle problematiche ambientali ha fatto sì che l'involucro edilizio non venga considerato più solo come un elemento separatore tra l'esterno e l'interno, ma come un'interfaccia dinamica in continua ed attiva interazione con i fattori climatici esterni.

2.2 Involucro edilizio

L'involucro edilizio è l'elemento architettonico che delimita perimetralmente l'organismo costruttivo ed è costituito da elementi tecnici di chiusura, verticali, orizzontali ed inclinati (Brock, L., 2005). La sua funzione primaria è quella di fornire sicurezza e riparo, di separare e connettere l'ambiente interno con quello esterno, e di trasferire l'energia termica da un luogo all'altro (Elder, KE., 2007). L'involucro edilizio ha il compito di garantire il comfort negli spazi dell'ambiente costruito assicurando una corretta luce diurna, l'isolamento termico ed acustico, e qualità dell'aria interna (Wael Salah, M. A. R., 2020). Inoltre, deve rispondere a esigenze di carattere estetico, e da questo punto di vista i nuovi materiali e la creatività di architetti e ingegneri hanno portato alla realizzazione di edifici sempre più accattivanti.

La sua prestazione termica è considerata uno dei fattori più importanti che influenza il consumo di energia dell'edificio; dipende principalmente dalla differenza di temperatura tra l'ambiente interno e quello esterno. Un'accurata progettazione dell'involucro prevede di minimizzare le dispersioni termiche nel periodo invernale e limitare l'innalzamento della temperatura in quello estivo, al fine di migliorare il comfort abitativo e la qualità ambientale, senza usufruire di fonti energetiche non rinnovabili.

I componenti dell'involucro edilizio possono essere suddivisi in due diverse tipologie: opachi e trasparenti. I primi includono pareti, tetti, solai, porte opache; mentre i secondi comprendono finestre, lucernari, porte con buona parte vetrata e pareti in blocchi di vetro (Kumar, G., Raheja, G., 2016).

2.2.1 Evoluzione dell'involucro edilizio

Forma e funzione degli involucri edilizi sono in continua evoluzione, sfruttano e abbracciano nuove tecnologie e materiali. Inizialmente per involucro si intendeva semplicemente quel muro che sosteneva il tetto o il pavimento e che delimitava lo spazio esterno da quello interno. Con il passare del tempo, però, le esigenze sono cambiate, in particolare sono aumentate le prestazioni richieste e la gamma dei prodotti, che hanno portato a nuove e moderne tecniche costruttive. Inoltre, la scoperta e il conseguente utilizzo di nuovi materiali ha modificato sia la funzione che l'estetica degli involucri edilizi (Di Ruocco, G., 2012).

I romani iniziarono ad utilizzare il vetro per la creazione delle finestre. Dopo la caduta dell'Impero Romano, gli artigiani veneziani mantennero viva la produzione del vetro durante i secoli bui, parallelamente la stessa cosa avvenne in India e in Cina. Le tecniche di realizzazione del vetro continuarono ad evolversi durante il Medioevo dal 1100 al 1200 e questo portò alla realizzazione di ampie vetrate colorate. Tale tendenza influenzò la costruzione di cattedrali, contrafforti e archi rampanti. La tecnologia per la lavorazione del vetro continuò ad evolversi nel corso dei secoli. La massa muraria, tipica degli edifici tradizionali, venne man mano sostituita da superfici vetrate di dimensioni sempre maggiori.

Ma è durante il periodo della rivoluzione industriale che si assiste ad un cambiamento ra-



Fig.2.2 Shanghai Tower.
Fonte: Bonham, M. B.,
2020.

dicale dell'involucro edilizio. Dall'uso di materiali legati alla tradizione locale (pietra, legno e mattone), attraverso i quali veniva affidato all'involucro edilizio la funzione portante e di confine tra l'ambiente esterno e quello interno, si passa all'uso oltre che del vetro anche dell'acciaio, legato principalmente a processi di industrializzazione edilizia (William J. R. Curtis, 2006).

Alla fine del XIX secolo, negli Stati Uniti vengono realizzati i primi grattacieli, con telai in acciaio che ne sostenevano il peso. Tale modalità costruttiva sostituisce quella in muratura. Grazie alle caratteristiche dell'acciaio, si riuscirono a creare aree vetrate ancora più ampie. I mattoni e le pietre non vennero più usati come muri portanti, ma esclusivamente come elementi divisorii. Questa forma di costruzione ha trovato la massima produzione durante il boom dei grattacieli negli Stati Uniti degli anni '30. Inoltre, al tradizionale requisito statico, di portare i carichi provenienti da diversi impalcati, sono state affiancate nuove esigenze di

protezione termica, di illuminazione diurna degli ambienti e parallelamente di protezione solare degli stessi.

Dopo la seconda guerra mondiale, iniziarono a svilupparsi le facciate continue, affiancate da un nuovo tipo di materiale: l'alluminio, il quale divenne sempre più comune nella prima metà del XX secolo. Un vantaggio chiave di tale materiale è la possibilità di essere estruso in forme precise ed esatte ed inoltre temperato per conferirgli una maggiore resistenza, rendendolo ideale per la formazione delle sezioni delle finestre.

Il passo successivo nell'evoluzione delle facciate continue è stata la realizzazione di unità preassemblate in fabbrica, che hanno portato ad un incremento della velocità di costruzione ed a una riduzione dei costi di realizzazione.

Negli anni settanta, invece, l'interesse si sposta ai problemi legati all'isolamento termico, con il conseguente sviluppo di soluzioni di coibentazioni dell'involucro opaco come: vetro camera e serramento di taglio termico con tenuta all'aria (Modin, H., 2014).



Fig.2.3 Bosco verticale, Milano.
Fonte: <https://www.pedestal-eternoivica.com/it/news/bosco-verticale-a-milano>

Al giorno d'oggi esistono involucri edilizi sostenibili, con vere e proprie facciate viventi, pareti verdi ed ecologicamente vantaggiose per le nostre città.

Il settore degli involucri ha visto negli ultimi anni un notevole sviluppo, sia in termini di soluzioni costruttive adottate che in termini di prestazioni offerte. Questa innovazione nell'elemento involucro si orienta verso una ricerca basata principalmente sul risparmio energetico, garantendo al tempo stesso una serie di parametri legati al rispetto del contesto storico-culturale di appartenenza, al corretto inserimento ambientale di un eventuale intervento, alla qualità delle soluzioni architettoniche e costruttive proposte (Najafi, E., Faizi, M, 2017).

In seguito all'evoluzione dei bisogni dell'uomo e soprattutto dell'ambiente, sono stati introdotti ulteriori requisiti prestazionali ai quali l'involucro edilizio deve rispondere, per poter raggiungere obiettivi di efficienza ecologica ed energetica. Gli edifici di ultima generazione, quindi, prevedono anche di immagazzinare il calore, direzionare e regolare la luce naturale, e possono controllare i flussi di aria e generare in qualche caso energia.

2.2.2 Classificazione in funzione della tipologia di funzionamento

L'involucro edilizio, in funzione della tipologia di funzionamento, può contribuire in maniera attiva, passiva o ibrida (Romano, R., 2010):

- **Involucro edilizio passivo:** assolve unicamente alla funzione di migliorare l'efficienza energetica dell'edificio attraverso ampie strutture vetrate in grado di schermare l'irradiazione solare o sistemi a cuscinetto per l'isolamento termico e la protezione dal freddo;
- **Involucro edilizio attivo:** in questo caso l'involucro viene utilizzato anche per l'installazione e il funzionamento di impianti per la raccolta e la trasformazione dell'energia solare oltre che per la ventilazione artificiale attraverso l'aria esterna. I vantaggi offerti da queste soluzioni sono maggiori dal punto di vista energetico; tuttavia ciò limita notevolmente l'espressione architettonica a causa della modularità dimensionale tipica dei componenti impiantistici e crea problemi per il disegno della facciata in funzione della distribuzione interna degli ambienti. Le soluzioni adottate più frequentemente e che hanno riscontrato maggior successo nell'utilizzo sono la parete vetrata ventilata e la facciata integrata con un impianto fotovoltaico. La prima è costituita da due superfici trasparenti separate da un'intercapedine e ventilate artificialmente tramite delle bocchette d'aria; la seconda è composta da una serie di celle fotovoltaiche integrate nelle pareti vetrate.
- **Involucro edilizio ibrido:** sintesi tra passivo e attivo, in grado di svolgere funzioni diverse, e dinamico, in quanto in grado di modificare le proprie proprietà e prestazioni in funzione delle condizioni climatiche e delle esigenze dell'utenza.

I recenti sviluppi sugli edifici hanno portato alla nascita di nuove tecniche innovative che prevedono le modifiche dell'involucro in tempo reale, per rispondere ad un cambiamen-

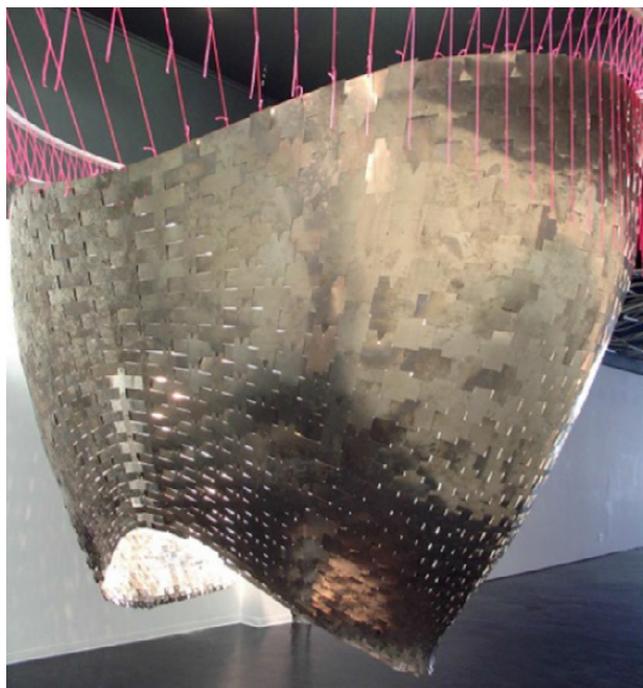


Fig. 2.4 Smart Thermo-bimetal Self-Ventilating Skin.
Fonte: Samir H., Shahin M., 2018.

to delle condizioni climatiche. Tali tecniche consistono nell'utilizzo di particolari materiali, nell'automazione dinamica con microprocessori incorporati, sensori wireless e attuatori. Nel campo degli edifici ad alte prestazioni, l'involucro inizia a essere contesto di ricerca e sviluppo.

Nascono così gli involucri edilizi "adattivi", ovvero rivestimenti che possiedono la capacità di modificare le loro proprietà e controllare in modo flessibile i diversi parametri che influenzano le prestazioni dell'involucro stesso. In poche parole si adatta in maniera automatica alle condizioni di comfort richieste dall'utente, in funzione dei cambiamenti che avvengono nell'ambiente esterno (Modin, H, 2014, Romano, R., et al, 2018- Samir, H., Shahin, M., 2019).

Gli involucri adattivi possono essere classificati in tre diverse categorie:

- **Materiali Smart:** si tratta dell'utilizzo di materiali le cui caratteristiche possono essere alterate mediante stimoli esterni quali campi elettrici, magnetici, variazioni di temperatura. L'utilizzo di materiali che cambiano le loro caratteristiche in reazione all'umidità, al calore, e alla luce, può cambiare il modo in cui viene concepita l'Architettura.

Tali materiali vengono definiti Smart in quanto rispondono in tempo reale alle esigenze richieste dall'utente. Alcuni esempi di tali materiali sono: aerogel, una sostanza traslucida sintetica a bassa densità applicata nei vetri delle finestre; fotovoltaici integrati nella struttura; ecc. (Samir H., Shahin M., 2018);

- **Intelligent building skin:** l'espressione intelligente indica una gamma più ampia di coordinazione e prestazione rispetto a quella "Smart". Edifici intelligenti sono definiti come strutture che conoscono le condizioni ambientali all'esterno e all'interno dell'edificio, di conseguenza decidono come generare un ambiente interno adatto e conveniente, e che risponda prontamente ai bisogni dell'utente (Compagno, A., 1995 - Samir H., Shahin M., 2018 - Böke, J., Knaack, U., Hemmerling, M., 2019);

- **Responsive facade system:** L'espressione "responsive" viene spesso menzionata in sostituzione di "interactive" ed "adaptive", ma è usato principalmente per descrivere come i sistemi naturali e artificiali possono interagire e adattarsi. Un involucro edilizio "responsive" è costituito da funzioni e caratteristiche prestazionali omogenee a quelle dell'intelligent building skin includendo componenti che si adattano al cambiamento climatico, materiali smart, ecc. Tuttavia possiede anche aspetti interattivi come algoritmi computazionali che consentono all'edificio di adattarsi e imparare nel tempo. L'apprendimento avviene in base alle mutevoli condizioni ambientali e al comfort dell'utente. Una pelle dell'involucro responsive, di conseguenza, non solo incorpora meccanismi per il rilevamento e il feedback degli occupanti, ma è



Fig. 2.5 Intelligent double-skin facade system of Terrence Donnelley Centre.
Fonte: Samir H., Shahin M., 2018.

anche dedicata all'educazione sia dell'edificio che dei suoi utenti. Fornisce dei dati agli abitanti in modo che possano acquisire conoscenze nel tempo e adattare le loro azioni in base al clima e all'aspetto energetico (Mariano, R. Q., 2018 - Taveres-Cachat, E., et al., 2019).

2.2.3 Classificazione in funzione dello schema costruttivo

Una particolare tipologia di involucro edilizio può essere definita come *curtain wall*, o facciata continua, che nel senso strutturale dell'espressione, si presenta in una grande varietà di materiali e sistemi, sfuggendo ai vari tentativi di classificazione.

La facciata continua a singola pelle è un involucro a montanti e traversi caratterizzato da un unico elemento tecnico di separazione (vetrata) fra interno ed esterno. Si tratta di un sistema vetrato isolante con vetro-camera singolo, doppio, triplo ecc. Le schermature mobili possono essere integrate in questo sistema di facciata così come negli infissi (Kumar, G., Raheja, G., 2016).

La facciata continua presenta un'elevata complessità funzionale perché è chiamata ad assolvere i compiti che tradizionalmente sono svolti sia dalla parete perimetrale che dagli infissi esterni. Per svolgere tali funzioni essa è costituita da due strati funzionali: uno di protezione e uno resistente. Lo strato resistente viene realizzato, solitamente, mediante estrusi di alluminio vincolati alla struttura portante dell'edificio attraverso elementi di acciaio. Esso ha il compito di resistere al peso proprio dei componenti della facciata e alle sollecitazioni ad essa applicate, nonché di collegare lo strato di protezione agli elementi portanti dell'edificio. Lo strato di protezione si compone generalmente dei seguenti elementi: i tamponamenti, che possono essere trasparenti od opachi, ai quali è affidato il compito di separare lo spazio interno da quello esterno, regolare il flusso di calore, aria, rumore, e consentire la visuale e il passaggio; le guarnizioni e i sigillanti, generalmente in silicone, che hanno la funzione di resistere all'azione degli agenti atmosferici, ridurre la trasmissione termica tra interno ed esterno e assorbire le deformazioni della facciata e le dilatazioni termiche degli elementi costituenti; gli eventuali schermi per la regolazione della radiazione solare (Lang, H.K., 2005).

Tuttavia, il nome "facciata continua" è diventato commercialmente associato a un sistema di intelaiatura rigida coperta da un rivestimento leggero (Kazmierczak, K., 2010). La classificazione di questo gruppo ristretto di facciate continue segue diverse caratteristiche:

- Per funzione: antincendio, acustica, resistente alle esplosioni, ecc.
- Secondo i materiali dei montanti: legno, acciaio, alluminio, composito, vetro, ecc.
- Per tipo di montante: tubolare, a traliccio, a cavo, ecc.
- Per tipo di vetro: riflettente, antiriflesso, ecc.
- Per accesso al vetro (per la sostituzione): interno, esterno.
- Per configurazione: singola, doppia pelle, a forma libera.
- Per il trasferimento di calore: caldo, freddo, migliorato termicamente.

In particolare, dal punto di vista della configurazione, può essere suddivisa in:

- Facciata a montanti e traversi;
- Facciata a cellule;
- Facciata strutturale e semi-strutturale;
- Facciata a fissaggio puntuale;
- Facciata a doppia pelle.

Una **facciata a montanti e traversi** (Fig. 2.6 - 2.7), denominata anche "stick system", 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 (Tatano, V., Rossetti, M., 2007). Queste tipologie di facciate si utilizzano solitamente laddove siano richieste grandi altezze di ingombro o debbano essere realizzate strutture di tetti. Grazie alle dimensioni variabili dei profili, soprattutto la profondità, e all'uso di materiali diversi, come per esempio l'acciaio o l'alluminio, gli involucri a montanti e traversi possono essere adattate a quasi tutte le situazioni di montaggio.

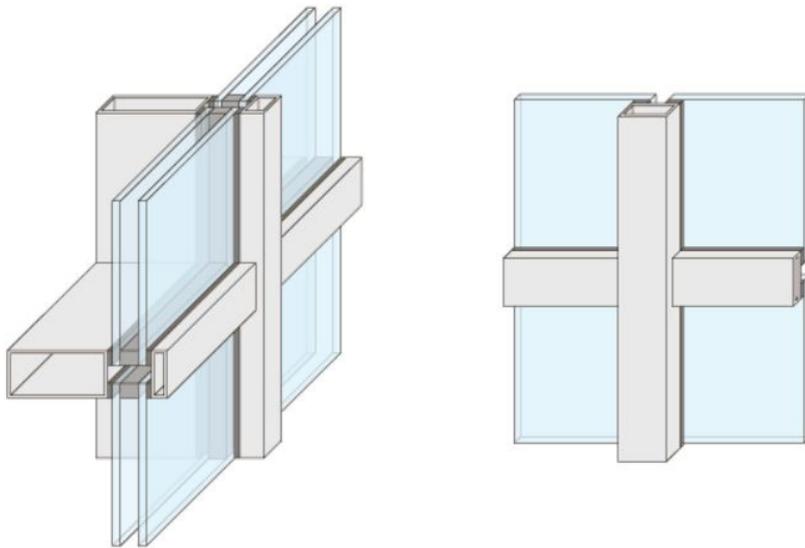


Fig. 2.6 Facciata a montanti e traversi.
Fonte: <https://www.buehlmann-ag.ch/it/facciate/sistema/facciata-a-montanti-e-traversi/>



Fig. 2.7 Facciata a montanti e traversi.
Fonte: Tatano, V., Rossetti, M., 2007

Una **facciata a cellule** (Fig. 2.8), denominata anche "unitised" o "panel system", è costituita da cellule prefabbricate contenenti sia il profilo in alluminio sia la parte di tamponamento, cieca od opaca. Le cellule vengono assemblate in fabbrica e quindi trasportati in cantiere dove vengono montate sull'edificio (Tatano, V., Rossetti, M., 2007).

La cellula è realizzata completamente in officina per poi essere spedita in cantiere pronta per l'installazione. Tale sistema assicura alte prestazioni con il vantaggio di un sistema a secco e prefabbricato. Con questa tecnologia si possono realizzare anche soluzioni molto complesse, con i vantaggi di un prodotto la cui altissima qualità è garantita durante tutto il ciclo produttivo. In cantiere tutte le operazioni di posa avvengono dall'interno dell'edificio, senza la necessità di un ponteggio esterno. Le staffe di fissaggio alla struttura principale permettono una regolazione in tutte le direzioni consentendo di posizionare la facciata con la massima precisione. La velocità di montaggio del sistema, unita alla capacità di assecondare i movimenti dell'edificio rende la cellula particolarmente adatta per edifici alti. La tenuta agli agenti atmosferici è garantita da guarnizioni (watertight gasket) posizionate in corrispondenza dei giunti verticali e orizzontali.

La tecnica a cellula prefabbricata consente l'assemblaggio dei componenti in officina e i relativi controlli di qualità, di conseguenza una riduzione dei costi e dei tempi di installazione e l'eliminazione delle lavorazioni eseguite dall'esterno dell'edificio (Cascone, S., 2016).



Fig. 2.8 Facciata a cellule.
Fonte: <https://www.archiexpo.it/prod/focchi/product-149696-1712551.html>

Una **facciata strutturale** (Fig. 2.9) è caratterizzata da un'orditura metallica di supporti e da pannelli di tamponamento a essa incollati mediante adesivi siliconici che li nascondono completamente o in parte. La fuga tra pannello e pannello viene ridotta; nello stesso tempo, poiché le parti metalliche sono completamente nascoste, la trasmissione di calore e vibrazioni viene fortemente ridotta (Tatano, V., Rossetti, M., 2007). Tale tipologia di facciata è caratterizzata dalla totale assenza di parti metalliche a vista, lasciando completo spazio al vetro e alla sua trasparenza.



Fig. 2.9 Facciata continua strutturale.
Fonte: <https://www.falar.it/facciate-continue/facciata-continua-strutturale/>

Una **facciata a fissaggi puntuali** (Fig. 2.10 - 2.11) si ottiene ancorando le lastre di vetro mediante vincoli strutturali denominati "rotules", che hanno il compito di trasferire le spinte dinamiche delle lastre (i carichi) alla struttura secondaria, solitamente costituita da componenti metallici denominati "ragni" (Tatano, V., Rossetti, M., 2007).

Questa tipologia di facciata garantisce la massima trasparenza della struttura e viene utilizzata soprattutto in contesti che si sviluppano in orizzontale, coprendo altezze massime di 20 metri. I moduli vetrati di tamponamento della facciata vengono solitamente sigillati con materiali siliconici strutturali.

Fig. 2.10 Facciata continua a fissaggio puntuale.
Fonte: Tatano, V., Rossetti, M., 2007



Fig. 2.11 Facciata continua a fissaggio puntuale.
Fonte: <https://www.canevasrl.it/sito/wp-content/uploads/2018/06/Facciata-puntuale-con-vetro-e-ragnetti-di-sostegno-Morbegno-Sondrio-Valtellina-Lombardia-Italia.jpg>



Una **facciata a doppia pelle** consiste essenzialmente in una pelle esterna e una interna in vetro, separate da un'intercapedine d'aria che funge da isolamento termico ed acustico. L'utilizzo delle facciate a doppia pelle incoraggia la progettazione di edifici sostenibili e comporta, di conseguenza, un notevole risparmio energetico, rendendo le strutture termicamente confortevoli. Tale tipologia di involucro può essere classificata in base a tre criteri: modalità di suddivisione della facciata, tipo di ventilazione e modalità di ventilazione della cavità.

Nel primo caso distinguiamo altri quattro tipi di facciate a doppia pelle (Fig. 2.12):

- **Box Windows:** in questa versione, i moduli delle facciate limitano l'intercapedine, sia verticalmente tra i piani che orizzontalmente tra le campate o i moduli. Questa soluzione non permette il flusso d'aria lungo tutta la facciata ma lo limita alla singola cella. Tale tipo di facciata offre vantaggi sia da un punto di vista economico, grazie all'utilizzo di involucri prefabbricati e unificati, sia per il controllo localizzato dei flussi termici e acustici. La pelle esterna vetrata contiene delle aperture per permettere l'ingresso di aria fresca e l'uscita di aria viziata; così le finestre sullo strato interno possono essere aperte per permettere la ventilazione naturale. Questo tipo di facciata è comunemente usato in presenza di un alto livello di rumore esterno (Barbosa, S., Ip, K., 2014);
- **Shaft-Box:** in questo caso, la partizione dell'intercapedine è realizzata con elementi di separazione verticale che favoriscono la funzione di ventilazione della parete. Questa soluzione migliora l'effetto camino e protegge dal rumore esterno. La temperatura dell'aria all'interno del condotto aumenta grazie ai guadagni di energia solare mediante il vetro. Questa configurazione è tipicamente usata negli edifici bassi (Barbosa, S., Ip, K., 2014);
- **Corridoio:** a differenza del tipo Shaft-Box, in questa versione le facciate a doppia pelle si sviluppano orizzontalmente lungo il piano. Questo genera un meccanismo di ventilazione limitato al singolo piano, in cui il flusso d'aria non corre lungo tutta la facciata. Tale tipologia di involucro è spesso ventilata esternamente con prese d'aria e uscite posizionate in modo da creare un elevato flusso d'aria. Queste facciate possono anche essere dotate di aperture nel rivestimento interno per la ventilazione naturale degli spazi interni sia in modalità di alimentazione che di scarico dell'aria. Occorre prestare particolare attenzione per evitare la trasmissione del suono da una stanza all'altra. Questa configurazione è tipicamente usata nei grattacieli (Barbosa, S., Ip, K., 2014);
- **Multipiano:** Da un punto di vista costruttivo questo è il tipo più complesso di facciata a doppia pelle, in questo caso la cavità non è divisa né orizzontalmente né verticalmente. Il singolo elemento della finestra rappresenta un'unità indipendente, che dal punto di vista della ventilazione non comunica con gli elementi adiacenti. Ciascuna di queste celle ha aperture di entrata e uscita dell'aria indipendenti. La ventilazione dell'intercapedine d'aria è realizzata tramite grandi aperture vicino al pavimento e al tetto dell'edificio. L'intercapedine è abbastanza grande da consentire l'accesso individuale per la pulizia o la manutenzione. I principali vantaggi risiedono nell'assenza di problemi in termini di isolamento acustico e protezione antincendio (Barbosa, S., Ip, K., 2014).

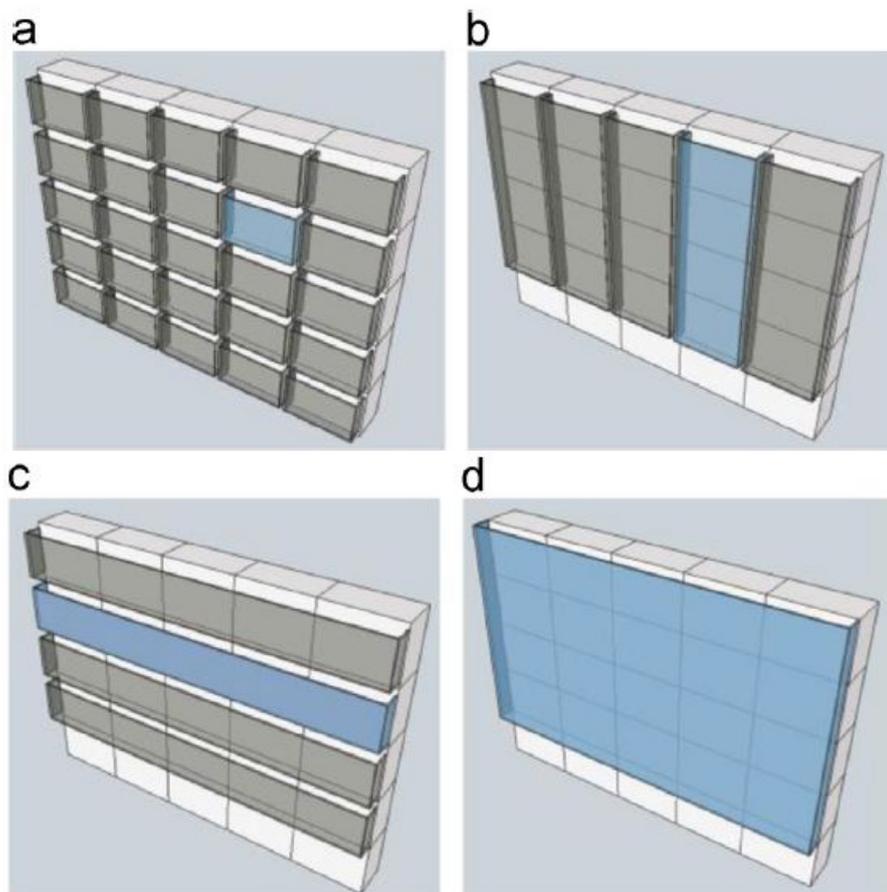


Fig. 2.12 Classificazione delle facciate a doppia pelle (a) Box Window, (b) Shaft-Box, (c) Corridor e (d) Multi-Piano. Fonte: Barbosa, S., Ip, K., 2014.

Il secondo criterio di classificazione, in base al tipo di ventilazione, può a sua volta essere diviso in tre diversi casi (Bonham, M. B., 2020):

- **Ventilazione naturale:** basata sulle differenze di pressione generate dall'effetto camino, senza l'aiuto di alcun componente meccanico che favorisca il movimento dell'aria;
- **Ventilazione meccanica:** fornita da componenti meccanici in movimento;
- **Ventilazione ibrida:** combina la ventilazione naturale con quella meccanica.

L'ultimo criterio di classificazione riguarda il tipo di ventilazione dell'intercapedine, suddiviso in base alla direzione dei flussi d'aria e alle modalità di ventilazione (Fig. 2.13) (Bonham, M. B., 2020):

- **Outdoor Air Curtain:** l'aria introdotta nell'intercapedine proviene dall'esterno e viene espulsa verso l'esterno, formando così una cortina d'aria che avvolge la facciata;
- **Indoor Air Curtain:** l'aria proviene dall'interno della stanza e tramite un sistema di ventilazione ritorna all'interno dell'edificio;
- **Air Supply:** l'aria arriva dall'esterno all'intercapedine e poi viene condotta all'interno della stanza;

- **Indoor Air Curtain:** l'aria proviene dall'interno della stanza e tramite un sistema di ventilazione ritorna all'interno dell'edificio;
- **Buffer:** in questo caso non c'è ventilazione tra l'ambiente esterno e quello interno. Si forma una zona chiamata "buffer" che riduce lo stress termico nell'ambiente interno.

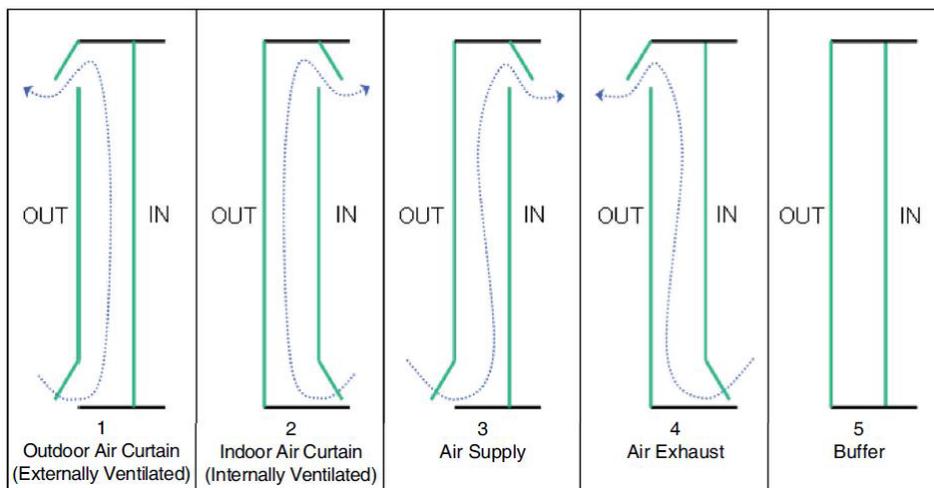


Fig. 2.13 Modi di ventilazione.
Fonte: Bonham, M.B., 2020.

2.2.4 Materiali dell'involucro

I materiali utilizzati oggi per la realizzazione dell'involucro edilizio sono moltissimi, tutti con caratteristiche particolari che li rendono adatti a seconda della funzione dell'edificio, della sua forma e della sua localizzazione geografica.

In particolare, il sistema di facciata continua è composto da elementi verticali (montanti) e elementi orizzontali (traversi) che circondano un pannello vetrato e/o opaco. Ogni modulo ha un telaio indipendente e utilizza "mezze" sezioni dei montanti e dei traversi in corrispondenza delle unioni tra due moduli adiacenti alla facciata.

I montanti e i traversi sono realizzati in acciaio o alluminio; mentre i pannelli componenti la facciata in vetro.

- **Vetro:**

Inizialmente, nell'età della pietra, il vetro era utilizzato principalmente per la creazione di armi, vasi, tessere di mosaico, oggetti decorativi ecc. Solo successivamente venne impiegato nell'ambito dell'edilizia per permettere l'ingresso della luce all'interno della struttura. L'ulteriore progresso della tecnologia portò il vetro ad essere adottato anche come elemento decorativo in molte case e in edifici a più piani. Considerando le prospettive e la necessità di edifici ad alta efficienza energetica, sono state condotte delle ricerche su tale materiale per sviluppare proprietà come l'indice di rifrazione, la perdita di riflessione, la trasmittanza termica, la trasmittanza della luce visibile, infrarossa e ultravioletta, la resistenza chimica.

In definitiva, la ragione dietro la sperimentazione con il vetro era quella di estrarre il meglio da esso e svilupparlo come materiale da costruzione moderno.

"La trasparenza e la traslucenza del vetro assicura la bellezza estetica a qualsiasi edificio.

Aiuta a creare spazi eleganti in qualsiasi parte dell'edificio. Il modo in cui la luce trasmette attraverso un vetro in un edificio è così sorprendente che si è evoluto in un potente strumento per un architetto. Al giorno d'oggi, il vetro è una parte essenziale di molte facciate e tetti" (Jelena Savic et al., 2013). Nessun altro materiale può replicare la qualità estetica del vetro. Si presenta come una nuova opportunità per designer e architetti di delineare i disegni in modo creativo. Costituisce una parte essenziale dei progetti di edifici che spingono i progettisti a usarlo ampiamente.

Il vetro è uno dei materiali versatili e più antichi dell'industria edilizia. Un viaggio iniziato come pannello di una finestra fino a diventare un sofisticato materiale nell'età moderna. Essendo una sostanza dura, creata dando calore alla sabbia o al quarzo, il vetro forma un materiale inorganico, trasparente o traslucido che può essere modellato in qualsiasi forma. È una miscela di materie prime come la silice, il carbonato di sodio e di potassio, la calce o l'ossido di piombo, l'ossido di manganese che vengono macinati, setacciati e mescolati ed infine fusi nel forno. Proprio come qualsiasi altro materiale da costruzione, il vetro fornisce sia vantaggi che svantaggi.

Vantaggi:

- **Trasparenza:** è un materiale trasparente, unico, che permette alla luce di passare attraverso di esso in modo che gli oggetti alle spalle del vetro siano chiaramente visibili. Permette di connettersi visivamente con il mondo esterno, e alla luce di entrare, anche quando la porta o le finestre sono chiuse, risparmiando da un punto di vista energetico. Illumina la stanza e migliora la visione stessa della casa.
- **Antipolvere e impermeabile:** Il vetro ha una superficie liscia e lucida, quindi è resistente alla polvere e può essere pulito agevolmente. A differenza di altri materiali, è facile da mantenere. Inoltre è impermeabile, l'uso del vetro rende facile la pulizia e la manutenzione con un minor consumo di tempo ed energia.
- **Disponibilità di colori:** dispone di una vasta gamma di colori, e quando si combina una lastra di vetro in unità laminate o isolate, cambia colore e aspetto. Il vetro laminato fornisce effetti luminosi eccezionali.
- **Esteticamente accattivante:** può rendere la struttura più sorprendente, sofisticata e aggiunge bellezza all'edificio. Oltre ai benefici tradizionali dell'uso di grandi superfici vetrate, il vetro è anche usato dagli architetti per ovvie ragioni estetiche.
- **Riciclabile:** è riciclabile al 100% e non si degrada durante tale processo. Di conseguenza può essere riciclato ripetutamente senza compromettere la qualità o la purezza. Questa caratteristica porta ad interessanti vantaggi: risparmio di energia, riduzione dell'inquinamento dell'aria; ecc.
- **Resistente al tempo e alla ruggine:** a differenza della maggior parte dei materiali, il vetro è resistente alla corrosione, e solo in certe condizioni, viene attaccato chimicamente. È completamente resistente alle intemperie. Può sopportare gli effetti del vento, della pioggia o del sole e può mantenere il suo aspetto e la sua integrità nella maggior parte delle normali condizioni ambientali.
- **Facilmente modellabile:** è un materiale trasparente e duro che può essere facilmente modellato nelle forme desiderate, ed utilizzato nella vetratura di edifici, facciate di negozi, porte, finestre e laboratori.

- **Isolante elettrico:** il vetro è un eccellente isolante. Non conduce facilmente l'elettricità. In assenza di elettroni liberi, garantisce la sicurezza da qualsiasi pericolo elettrico. Grazie a queste proprietà, il vetro può essere utilizzato per la formazione di plafoniere, per la decorazione di lampade da parete e per vari altri apparecchi elettrici.
- **Materiale sostenibile:** il vetro è un materiale sostenibile, completamente riciclabile, che fornisce grandi benefici ambientali come contribuire a mitigare il cambiamento climatico e risparmiare preziose risorse naturali. È anche molto apprezzato per la sua natura inerte e il suo contributo alla salvaguardia della salute e del benessere degli occupanti.
- **Trasmittanza visibile:** è una proprietà ottica che indica la quantità di luce nella parte visibile dello spettro che passa attraverso un materiale. Questa proprietà distingue il vetro dagli altri materiali ed è la stessa ragione per cui esso ha guadagnato popolarità negli ultimi tempi. Il vetro assorbe, rifrange o trasmette la luce. Può essere reso trasparente o traslucido. Trasmette fino all'80% della luce naturale disponibile in entrambe le direzioni senza alcun ingiallimento, offuscamento o invecchiamento.

Svantaggi:

- **Costo:** è un materiale costoso rispetto ad altri usati nell'industria delle costruzioni; richiede l'utilizzo di molta energia a causa della lavorazione ad alte temperature delle materie prime. Di conseguenza, il costo totale dell'edificio può aumentare.
- **Fragilità:** è un materiale molto fragile, che può rompersi in pezzi e frammenti o che può essere facilmente ridotto in polvere. Quando è sottoposto a stress, si rompe anche con uno sforzo non troppo elevato. I pezzi di vetro rotti possono essere taglienti e le possibilità di ferirsi sono molto alte.
- **Resistenza agli urti:** il vetro è meno resistente agli urti, quindi la sua capacità di sopportare un carico più o meno importante è molto scarsa; si romperà immediatamente dopo l'impatto.
- **Insicuro per le zone sismiche:** gli edifici nelle aree soggette a terremoti devono essere appositamente progettati per sopportare carichi e movimenti orizzontali. Tuttavia, il vetro è fragile e quindi tende a rompersi o a crollare rapidamente. L'uso del vetro è molto pericoloso per le zone sismiche. Sfortunatamente, non c'è un tale progresso nella tecnologia che possa rendere il vetro un materiale resistente ai terremoti. Tuttavia, con qualche trattamento costoso, può essere modificato in una certa misura in modo che possa resistere ai terremoti di piccola scala.
- **Assorbe calore:** il vetro intrappola il calore che alla fine riscalda gli interni e agisce come una serra. Pertanto, potrebbe non essere adatto alla costruzione di edifici, tipicamente esistenti nelle regioni calde. Il consumo di energia sarà molto alto per permettere il funzionamento dell'aria condizionata al fine di garantire le condizioni ideali di comfort.
- **Manutenzione:** nelle zone umide, le particelle di polvere si attaccheranno alla superficie del vetro e quindi non solo sembrerà sporco e malandato, ma l'illuminazione interna e la trasparenza saranno scarse.

- **Abbagliamento:** la facciata è una componente elegante che aiuta a definire l'estetica architettonica unica di qualsiasi edificio. Ha anche il ruolo critico legato al rendimento energetico e alla funzione interna di un edificio. Tuttavia, l'abbagliamento è un problema significativo nell'edificio con facciata in vetro.

Il vetro ha progressivamente acquisito uno status speciale come importante materiale da costruzione. Ha numerosi usi in varie forme nell'edificio per migliorare la qualità e l'aspetto generale. Al giorno d'oggi è usato in mobili, apparecchi elettrici e oggetti decorativi. Numerose innovazioni tecnologiche lo hanno reso una scelta preferita da architetti e designer per promuovere la sostenibilità nell'ambiente costruito.

In poche parole, "il vetro colma il divario tra gli spazi, migliora la qualità dello spazio, trasmette sufficiente luce e contribuisce anche al risparmio energetico. La scelta appropriata del vetro può persino migliorare l'efficienza energetica dell'edificio" (Jelena Savic et al., 2013). Il vetro ha dimostrato di essere un materiale da costruzione che spinge i progettisti a mobilitarlo durante la creazione di varie forme di design e spazi.

Anche il prof. Federico M. Butera nonostante i pregi dell'utilizzo del vetro evidenzia alcuni svantaggi. Fino a che punto gli edifici interamente di vetro sono veramente sostenibili? "Non ci sono dubbi che l'architettura in vetro sia luminosa e trasparente in senso architettonico. Il fatto è che effettivamente è luminosa e trasparente anche in senso fisico e influenza sia le perdite e gli acquisti termici, sia l'inerzia termica" (Butera, F., 2006). Ma non è questo l'unico problema. L'utilizzo del vetro colorato comporta: durante il periodo estivo un suo riscaldamento e anche della zona circostante fino a 40°C e quindi, al fine di risolvere questo problema, si getta acqua fredda sulla superficie; invece, durante il periodo invernale si ha un raffreddamento del vetro e della zona circostante e di conseguenza si getta aria calda sulla superficie. Da un punto di vista di bilancio energetico questa soluzione comporta uno spreco di energia necessario per migliorare il comfort e rendere le temperature in queste zone più simili a quella dei locali. Come risponde invece il vetro trasparente? In inverno ha lo stesso comportamento del vetro colorato, quindi è spesso necessario un soffio di aria calda sulla sua superficie al fine di migliorarne il comfort; durante l'estate il riscaldamento del vetro risulta però meno critico rispetto ai vetri colorati. Il problema reale di una parete in vetro trasparente è l'abbagliamento. Il comfort visivo degli occupanti viene ripristinato esclusivamente oscurando la superficie del vetro con tende, veneziane o qualsiasi altro articolo disponibile. L'utilizzo di questi schermi oscuranti determina la necessità di utilizzare la luce artificiale in momenti della giornata in cui non sarebbe necessario.

- **Alluminio:**

L'alluminio in natura non si trova allo stato libero, ma sotto forma di composti che costituiscono l'8% della crosta terrestre. Utilizzato nell'industria edile non ha infatti impatti negativi né sulla qualità dell'aria all'interno degli edifici né su terreno o acque. In particolare, nell'impiego per le facciate è un materiale di ottima scelta per montanti e traversi in quanto ha eccellenti caratteristiche fisiche e peso relativamente leggero.

Sono stati riportati qui di seguito alcuni dei vantaggi derivanti dal suo utilizzo:

Vantaggi:

- **Risparmio energetico nel riciclo:** la qualità dell'alluminio non cambia con il riciclaggio. Gli scarti di produzione primario vengono riciclati direttamente e rimpiegati.

- **Ecologico:** Nell'industria dell'alluminio, la produzione di gas che contribuiscono all'effetto serra è dovuta all'utilizzo di combustibili fossili e al processo di elettrolisi. Le quantità emesse di questi gas sono peraltro minime e la loro incidenza sul totale dei gas prodotti dall'uomo non è che l'1% circa. D'altro canto però, il crescente impiego dell'alluminio in settori come quello dei trasporti consente di ridurre di peso gli autoveicoli, limitando l'emissione di gas nell'atmosfera, e l'utilizzo di serramenti in alluminio a taglio termico consentono un notevole risparmio energetico.
- **Riciclabilità:** la rifusione dell'alluminio richiede una modesta quantità di energia. Nel processo di riciclaggio è sufficiente il 5% dell'energia utilizzata originariamente per la produzione del metallo primario con perdite di materiale inferiori al 3%.
- **Leggerezza:** l'alluminio è un metallo estremamente leggero; il suo peso specifico è circa un terzo rispetto a quello dell'acciaio.
- **Resistenza:** la resistenza dell'alluminio può essere ottimizzata con l'aggiunta di piccole quantità di altri metalli. Particolari tipi di leghe possono rendere la resistenza dell'alluminio simile all'acciaio.
- **Resistenza alla corrosione:** la formazione spontanea di uno strato di ossido, protegge l'alluminio rendendolo particolarmente resistente alla corrosione. Mediante specifici trattamenti superficiali questa caratteristica può essere ulteriormente accentuata.
- **Lavorabilità:** la possibilità di usufruire di leghe che ne esaltano e completano le caratteristiche meccaniche fa utilizzare ampiamente l'alluminio nelle più svariate applicazioni.
- **Infiammabilità e resistenza al fuoco:** per le sue caratteristiche di refrattarietà l'alluminio può essere usato in edilizia, nelle costruzioni e nei trasporti.

2.2.5 Requisiti e prestazioni

Gli involucri edilizi devono possedere determinati requisiti relativi alla resistenza strutturale, al comfort e all'efficienza energetica. Le prestazioni di tale tipologia di facciata devono essere previste in fase di progettazione ed essere controllate durante e dopo la costruzione. Al fine di garantire tali requisiti gli involucri vengono sottoposti a determinate prove in laboratorio su nuovi involucri e su edifici esistenti in sito.

Un involucro edilizio deve garantire, secondo normativa nazionale ed europea (vedere cap. 2.3.2), diversi requisiti funzionali (Modin, H., 2014):

- Di controllo:
 1. Flusso di calore;
 2. Flusso d'aria;
 3. Flusso di vapore acqueo;
 4. Impermeabilità all'acqua;
 5. Radiazioni solari e di altro tipo;
 6. Rumore;
 7. Fuoco.
- Fornire resistenza e rigidità;

- Essere durevole;
- Essere economico.

2.3 Simulazioni e verifiche prestazionali per involucro edilizio

2.3.1 Prove in laboratorio e in situ

Le opere di costruzione, oltre al soddisfacimento di requisiti di altra natura, devono essere concepite e realizzate in modo da garantire la sicurezza delle persone, degli animali e dei beni. Più nello specifico devono essere concepite e realizzate in modo che i carichi cui possono essere sottoposti durante la realizzazione e l'uso non provochino:

- il crollo, totale o parziale, della costruzione;
- gravi ed inammissibili deformazioni;
- danni ad altre parti delle opere di costruzione, o a impianti principali o accessori, in seguito a una grave deformazione degli elementi portanti;
- danni accidentali sproporzionati alla causa che li ha provocati.

Ogni opera strutturale, e singolo componente facente parte di essa, viene progettata in funzione della durata prevista, ovvero della sua vita nominale. Infatti le normative, ad esempio l'NTC 2018 (Norme Tecniche per le Costruzioni), forniscono dei parametri di progettazione che variano in funzione della vita nominale. Inoltre con la ristrutturazione dell'involucro edilizio, o dei singoli componenti di esso, è possibile prolungare la vita progettuale dell'edificio.

Al fine di garantire l'integrità dell'opera, controllare lo stato di conservazione dei materiali, stabilire la vita nominale dell'edificio, vengono effettuate delle prove su costruzioni esistenti o su nuove strutture. Esiste una vasta gamma di test da potere effettuare, in funzione della tipologia di edificio, dei materiali, etc.

Le prove possono essere effettuate in laboratorio o direttamente in situ. Nel primo caso: (i) su edifici esistenti possono essere prelevati dei campioni, sui quali verranno poi realizzate le prove in laboratorio; oppure (ii) nel caso di nuovi edifici verranno effettuati dei test su modelli in scala. Nel secondo caso, invece, esistono delle prove che possono essere effettuate direttamente in situ, evitando così anche i costi di trasporto di eventuali provini in laboratorio.

Quanto detto per l'intero edificio vale anche per il singolo componente, in questo contesto per l'involucro edilizio. I test necessari sono regolamentati dalle normative, di seguito vengono descritte quella nazionale, europea ed americana.

2.3.2 Normativa nazionale ed Europea

Al fine di comprendere il comportamento dei componenti dell'involucro edilizio, in relazione all'ubicazione dell'edificio e al clima, è necessario una loro classificazione (secondo quanto riportato dalla normativa descritta in tale capitolo).

Tra gli involucri edilizi più utilizzati rientrano le facciate continue. La normativa EN 18380 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. Deve garantire le funzioni di una parete interna o esterna e può contenere parti fisse e/o apribili. È progettata come una costruzione autoportante con il compito di trasmettere i carichi esterni, tra cui

vento e neve, l'azione sismica e il peso proprio alla struttura portante dell'edificio, mediante i collegamenti al solaio o agli elementi strutturali dell'edificio. Tale tipologia di facciata deve anche resistere alle infiltrazioni dell'aria e dell'acqua, al fuoco e ad eventuali esplosioni.

Nello scenario normativo attuale le facciate vengono classificate sia dagli Eurocodici (EN 13830) che dalla Normativa Nazionale (NTC 2018) come elementi secondari non strutturali. La Normativa Italiana definisce i criteri di progettazione di elementi strutturali secondari ed elementi non strutturali, senza però un particolare riferimento all'involucro edilizio. Tale elemento viene progettato per resistere ai soli carichi verticali; tuttavia viene sottolineato che deve anche essere in grado di assorbire le deformazioni della struttura soggetta all'azione sismica di progetto, mantenendo la capacità portante nei confronti dei carichi verticali. Oltre ad avere una certa resistenza strutturale degli elementi principali (montanti e traversi), una facciata deve garantire una elevata resistenza anche dei pannelli in vetro. Tale materiale mostra un comportamento meccanico sostanzialmente diverso da quello di altre tipologie da costruzione. Rispetto ai materiali metallici più comuni, quali l'acciaio e l'alluminio, il suo comportamento non presenta una fase plastica e, rispetto ai materiali cosiddetti quasi fragili come il calcestruzzo, non è in grado di sviluppare quelle micro fessurazioni diffuse che consentono ridistribuzioni anelastiche delle tensioni. Il vetro è dunque il materiale fragile per antonomasia e la sua rottura è di tipo stocastico. Per la mancanza di capacità di adattamento plastico non è lecito trascurare gli effetti locali, come ad esempio le concentrazioni di tensione in prossimità di fratture, fori o zone di contatto con altri materiali. Il progetto degli elementi di vetro e delle loro connessioni presenta pertanto notevoli specificità che richiedono grande attenzione nella concezione dei dettagli e delle tolleranze costruttive (Consiglio Nazionale delle Ricerche, 2013).

La Normativa Italiana definisce criteri e requisiti da rispettare. Qui di seguito viene riportato un elenco sulle normative da seguire, riferite agli involucri edilizi e agli elementi che lo compongono (porte e finestre) con alcuni dettagli:

- **UNI EN 13830 Facciate continue** - Norma di prodotto. La norma specifica i requisiti delle facciate continue utilizzate come involucro edilizio al fine di fornire resistenza agli agenti atmosferici, sicurezza d'esercizio e risparmio energetico e ritenzione nel calore. La norma fornisce metodi di prova/valutazione/calcolo e criteri di prestazione ad assicurare la conformità.
- **UNI EN 12152 Facciate continue** - Permeabilità all'aria - Requisiti prestazionali e classificazione. La presente norma è la versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 12152. La norma specifica i requisiti e la classificazione in base alla permeabilità all'aria di parti fisse e apribili di facciate continue sotto pressione statica dell'aria positiva e negativa.
- **UNI EN 12153 Facciate continue** - Permeabilità all'aria - Metodo di prova. La presente norma è la versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 12153. La norma descrive il metodo da usare per determinare la permeabilità all'aria di facciate continue, sia nelle sue parti apribili che in quelle fisse. Essa descrive come i campioni debbano essere sottoposti a prova sotto pressione positiva e negativa.
- **UNI EN 12154 Facciate continue** - Tenuta all'acqua - Requisiti prestazionali e classificazione. La presente norma è la versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 12154. La norma definisce i requisiti e la classificazione delle prestazioni di tenuta all'acqua, sotto pressione statica positiva dell'aria, sia delle parti apribili che di quelle fisse di facciate continue.

- **UNI EN 13050 Facciate continue** - Tenuta all'acqua - Metodo di prova in laboratorio sotto condizioni dinamiche di pressione dell'aria e di protezione d'acqua. La presente norma è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 13050. La norma definisce un metodo di prova addizionale che può essere utilizzato per valutare la tenuta all'acqua di facciate continue, sia nelle parti fisse che in quelle apribili. La norma si applica alle facciate continue come definite nella UNI EN 13830.
- **UNI EN 13051 Facciate continue** - Tenuta all'acqua - Prova in sito. La presente norma è la versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 13051. La norma definisce il metodo da utilizzare per individuare, in qualsiasi punto, le infiltrazioni d'acqua che possono verificarsi in facciate continue quando queste sono state installate negli edifici. È una prova supplementare, non richiesta per scopi di classificazione.
- **UNI EN 13116 Facciate continue** - Resistenza al vento - Requisiti prestazionali e classificazione. La presente norma è la versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 13116. La norma specifica i requisiti relativi alle prestazioni strutturali di facciate continue sottoposte a carico di vento, sia nelle loro parti fisse che in quelle apribili, sotto pressione statica positiva e negativa dell'aria.
- **UNI EN 12179 Facciate continue** - Resistenza al vento - Metodo di prova. La presente norma è la versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 12179. La norma definisce il metodo per determinare la resistenza al carico del vento di facciate continue, sia nelle loro parti apribili che in quelle fisse, sotto pressione statica negativa e positiva dell'aria.
- **UNI EN 13947 Prestazione termica delle facciate continue** - Calcolo della trasmittanza termica. La presente norma è la versione ufficiale in lingua inglese della norma europea EN 13947. La norma descrive un metodo per il calcolo della trasmittanza termica delle facciate continue costituite da vetrate o pannelli opachi inseriti o collegati a telai. Essa si applica a diversi tipi di vetrate (vetri o plastiche, vetrate singole o multiple, con o senza rivestimenti bassa emissività, con intercapedini riempite di aria o altri gas) diversi tipi di telai (qualsiasi combinazione di materiale) con o senza taglio termico, diversi tipi di pannelli opachi rivestiti con metallo, vetro, ceramiche o qualsiasi altra combinazione di materiale.
- **UNI EN 14351-1 Finestre e porte** - Norma di prodotto, caratteristiche prestazionali - Parte 1: Finestre e porte esterne pedonali senza caratteristiche di resistenza al fuoco e/o di tenuta al fumo. La norma specifica le caratteristiche prestazionali delle finestre, delle porte esterne pedonali, dei serramenti doppi e serramenti accoppiati, eccetto le caratteristiche di resistenza al fuoco e di controllo fumo. Le caratteristiche di resistenza al fuoco e di controllo fumo per porte pedonali e finestre sono trattate dalla EN 16034.
- **UNI EN 1026 Finestre e porte** - Permeabilità all'aria - Metodo di prova. La norma definisce il metodo di prova che deve essere utilizzato per determinare la permeabilità all'aria di porte e finestre, realizzate in qualsiasi materiale e completamente assemblate, quando sottoposte a prova sotto pressione positiva o negativa. Il presente metodo di prova considera le condizioni di utilizzo, quando la finestra o la porta è installata in conformità alle specifiche del fabbricante e ai requisiti delle norme europee pertinenti e dei codici di pratica.

- **UNI EN 12207 Finestre e porte** - Permeabilità all'aria - Classificazione. La norma definisce la classificazione dei risultati di prova di finestre completamente assemblate e porte pedonali, interne ed esterne, di qualsiasi materiale, sottoposte alla prova in conformità alla EN 1026.
- **UNI EN 1027 Finestre e porte** - Tenuta all'acqua - Metodo di prova. La norma definisce il metodo di prova che deve essere utilizzato per determinare la tenuta all'acqua di porte e finestre, realizzate in qualsiasi materiale e completamente assemblate, quando sottoposte a prova sotto pressione positiva o negativa. Il presente metodo di prova considera le condizioni di utilizzo, quando la finestra o la porta è installata in conformità alle specifiche del fabbricante e ai requisiti delle norme europee pertinenti e dei codici di pratica.
- **UNI EN 12208 Finestre e porte** - Tenuta all'acqua - Classificazione. La presente norma è la versione ufficiale in lingua italiana della norma europea EN 12208. La norma definisce la classificazione dei risultati di prova di finestre e porte, di qualsiasi materiale, sottoposte alla prova di tenuta all'acqua.
- **UNI EN 12211 Finestre e porte** - Resistenza al carico di vento - Metodo di prova. La norma definisce il metodo di prova che deve essere utilizzato per determinare la resistenza al carico del vento di porte e finestre, realizzate in qualsiasi materiale e completamente assemblate, quando sottoposte a prova sotto pressione positiva o negativa. Il presente metodo di prova considera le condizioni di utilizzo, quando la finestra o la porta è installata in conformità alle specifiche del fabbricante e ai requisiti delle norme europee pertinenti e dei codici di pratica.
- **UNI EN 12210 Finestre e porte** - Resistenza al carico del vento - Classificazione. La norma definisce la classificazione dei risultati di prova per porte e finestre, realizzate in qualsiasi materiale e completamente assemblate, dopo averle sottoposte a prova in conformità alla EN 12211.
- **UNI EN ISO 10077-1** Trasmittanza termica di finestre, porte e schermi - Calcolo della trasmittanza termica - Parte 1: Metodo semplificato. La norma specifica i metodi di calcolo della trasmittanza termica di finestre e porte pedonali costituite da vetrate e/o pannelli opachi inseriti in telai con o senza chiusure oscuranti.
- **UNI EN ISO 11018** Rivestimenti e sistemi di ancoraggio per facciate ventilate a montaggio meccanico - Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione e la manutenzione - Rivestimenti lapidei e ceramici. La norma indica i procedimenti per una corretta progettazione, esecuzione e manutenzione dei sistemi di collegamento a supporto dei rivestimenti di facciata a montaggio meccanico. Esse si basano sulle soluzioni tecniche che l'esperienza decennale ha oramai consolidato.
- **UNI EN 1279-5 Vetro per edilizia** - Vetrate isolanti - Parte 5: Valutazione della conformità. La norma specifica i requisiti, la valutazione della conformità, il controllo di produzione in fabbrica delle vetrate isolanti per impiego negli edifici.
- **UNI EN 572-9 Vetro per edilizia** - Prodotti di base di vetro di silicato sodocalcico - Parte 9: Valutazione della conformità/Norma di prodotto. La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN 572-9 (edizione ottobre 2004). La norma tratta la valutazione della conformità e il controllo della produzione in fabbrica di prodotti di base di vetro di silicato sodocalcico per edilizia.

- **UNI EN 1096-4 Vetri per edilizia** - Vetri rivestiti - Parte 4: Vetri borosilicati: Valutazione della conformità/Norma di prodotto. La norma tratta la valutazione di conformità e il controllo di produzione in fabbrica del vetro rivestito da impiegare negli edifici.
- **UNI EN 1748-1-2 Vetri per edilizia** - Prodotti di base speciali - Parte 1-2: Vetri borosilicati: Valutazione della conformità/Norma di prodotto. La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN 1748-1-2. La norma stabilisce i criteri per la valutazione di conformità e il controllo della produzione in fabbrica di prodotti di vetro borosilicato per impiego in edilizia.
- **UNI EN 1748-2-2 Vetri per edilizia** - Prodotti di base speciali - Parte 2-2: Vetro ceramica - Valutazione della conformità/Norma di prodotto. La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN 1748-2-2. La norma stabilisce i criteri per la valutazione di conformità e il controllo della produzione in fabbrica di vetro ceramica per impiego in edilizia.
- **UNI EN 1863-2 Vetri per edilizia** - Vetro di silicato sodocalcico indurito termicamente - Parte 2 - Valutazione della conformità/Norma di prodotto.
- **UNI EN 12150-2 Vetri per edilizia** - Vetro di silicato sodocalcico di sicurezza temprato termicamente - Parte 2 - Valutazione della conformità/Norma di prodotto. La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN 12150-2. La norma tratta la valutazione della conformità e il controllo della produzione in fabbrica di vetro piano di silicato sodocalcico di sicurezza temprato termicamente per edilizi.
- **UNI EN 12337-2 Vetri per edilizia** - Vetro di silicato sodocalcico di sicurezza indurito chimicamente - Parte 2 - Valutazione della conformità/Norma di prodotto. La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN 12337-2. La norma fornisce i criteri per la valutazione di conformità e il controllo di produzione in fabbrica del vetro piano di silicato sodocalcico indurito chimicamente per impiego in edifici.
- **UNI EN 14178-2 Vetri per edilizia** - Prodotti di base di vetro a matrice alcalina - Parte 2 - Valutazione della conformità/Norma di prodotto. La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN 14178-2. La norma tratta la valutazione della conformità e il controllo della produzione in fabbrica di vetro di prodotti di base di vetro a matrice alcalina per edilizia.
- **UNI EN 13024-2 Vetri per edilizia** - Vetro di borosilicato di sicurezza temprato termicamente - Parte 2: Valutazione della conformità/Norma di prodotto. La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN 13024-2. La norma fornisce i criteri per la valutazione di conformità e il controllo della produzione in fabbrica di vetro borosilicato di sicurezza temprato termicamente per impiego negli edifici.
- **UNI EN 14179-2 Vetri per edilizia** - Vetro di sicurezza di silicato sodocalcico temprato termicamente e sottoposto a "heat soak test" - Parte 2: Valutazione della conformità/Norma di prodotto. La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN 14179-2. La norma specifica i requisiti, la valutazione di conformità e il controllo di produzione in fabbrica del vetro piano di silicato sodocalcico di sicurezza temprato termicamente e sottoposto ad heat soak test per impiego negli edifici.

- **UNI EN 14321-2 Vetro per edilizia** - Vetro di sicurezza a matrice alcalina temprato termicamente - Parte 2: Valutazione della conformità/Norma di prodotto. La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN 14321-2. La norma specifica i criteri per la valutazione della conformità e del controllo di produzione in fabbrica del vetro di sicurezza a matrice alcalina temprato termicamente per l'impiego negli edifici.
- **UNI EN 14449 Vetro per edilizia** - Vetro stratificato e vetro stratificato di sicurezza - Valutazione della conformità/Norma di prodotto. La presente norma è la versione ufficiale della norma europea EN 14449. La norma tratta la valutazione della conformità e il controllo di produzione in fabbrica del vetro stratificato e del vetro stratificato di sicurezza per impiego negli edifici.

La Normativa Italiana appena riportata non è altro che la traduzione di quella Europea. Le seguenti prove possono ritenersi valide ai fini della marcatura CE del prodotto:

- Prova di permeabilità all'aria (EN 12153);
- Prova di tenuta all'acqua sotto pressione statica (EN 12155);
- Prova di resistenza ai carichi del vento (EN 12179);
- Prove di resistenza all'urto (EN 14019);
- Prova sismica statica (EN 13830:2015): prevede una prova sismica statica con applicazione di spostamenti a velocità molto basse e la conseguente valutazione del comportamento della facciata.

Come sottolineato precedentemente la normativa Europea, così come quella italiana, considera le facciate continue come elementi non strutturali e dedica un intero capitolo a questa tipologia di elementi. In particolare gli elementi non strutturali degli edifici (ad esempio: parapetti, ringhiere, tramezzi, facciate continue) che potrebbero, in caso di crollo, produrre rischi per le persone o influenzare il comportamento strutturale principale dell'edificio o la sua funzionalità, devono, insieme ai loro supporti, essere verificati nei confronti dell'azione sismica di progetto.

2.3.3 Normativa Americana

La Normativa Statunitense FEMA, da un punto di vista strutturale, prevede la progettazione sismica delle componenti architettoniche con particolare riferimento agli involucri edilizi, nonché alle facciate continue. Tale normativa impone delle verifiche nei confronti dell'azione sismica da applicare al centro di masse dell'elemento non strutturale, ed inoltre definisce un massimo spostamento di interpiano che la facciata può subire senza danneggiare gli elementi principali o causare la caduta di pannelli divetro. Le principali prove vengono qui di seguito elencate:

- **Prova sismica statica** (AAMA 501.4-09): questo test prevede di calcolare le prestazioni dell'involucro quando sottoposto a degli spostamenti in direzione orizzontale, con caratteristiche tali da simulare un evento sismico;
- **Prova sismica dinamica** (AAMA 501.6-09): si differenzia da quella statica in quanto viene condotto un "crescendo test", ovvero l'involucro viene sottoposto a spostamenti a velocità crescente e in funzione del tempo; e permette la determinazione del va-

lore minimo di sollecitazione che causa la rottura e la fuoriuscita del vetro dal telaio. La finalità del test è determinare il drift di piano (spostamento relativo tra i due livelli dell'edificio a cui è vincolata la facciata) per cui si verifica la caduta di frammenti di facciata. Per ottenere tale spostamento critico, viene applicata alla porzione di facciata, tramite le travi sismiche, una storia temporale di spostamenti. È il crescendo test che è caratterizzato da una serie concatenata di cicli sinusoidali ad ampiezza gradualmente crescente fino a 150 mm, con frequenza variabile da 0,8 Hz (per spostamenti fino a 75 mm) a 0,4 Hz (per spostamenti superiori a 75 mm). Esso deve essere condotto senza interruzione fino a che non si verifica una delle condizioni critiche indicate nella norma AAMA, la più importante delle quali è la caduta di frammenti di vetro;

- **Resistenza a carico da vento** (ASTM E330-02): l'involucro viene sollecitato con una determinata pressione in funzione del carico di progettazione; calcola gli spostamenti in determinati punti di riferimento,;
- **Permeabilità all'aria** (ASTM E283-04): tale prova prevede una procedura standard al fine di determinare il tasso di perdita d'aria dell'involucro, di finestre esterne e porte sottoposte a una differenza di pressione;
- **Prova statica di penetrazione dell'acqua** (ASTM E331-00): il test ha il compito di registrare eventuali penetrazioni del liquido, e viene eseguito spruzzando una quantità costante e uniforme di acqua sulla superficie esterna dell'involucro;
- **Prova dinamica di penetrazione dell'acqua** (AAMA 501.1-05): rispetto alla prova statica, in questo caso il test prevede l'utilizzo di un macchinario che oltre allo spruzzo d'acqua simuli anche la presenza di forte vento (per esempio mediante un generatore eolico).

Una sostanziale differenza tra la normativa europea sulle facciate continue EN 13830:2015 e quella statunitense risiede nel test sismico. In generale, 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 nel primo caso (SLE) si valuta la capacità del curtain wall di garantire il suo funzionamento in termini di resistenza all'acqua, all'aria e a piccole sollecitazioni dovute al sisma, lo stato limite ultimo prevede che nessun componente della facciata debba separarsi o cadere a seguito di azioni di forte intensità dovute ad azioni ambientali, ad esempio al sisma.

In particolare, mentre la normativa europea effettua esclusivamente una prova sismica statica, la normativa americana (tra l'altro la più eseguita al mondo) prevede un ulteriore test di tipo dinamico, il crescendo test. Il vantaggio nel caso di prove in conformità a standard americani consiste nel verificare l'elemento anche in caso di terremoti di alta intensità, in quanto spinge la facciata verso lo stato limite ultimo.

2.4 Approcci digital twin e procedure BIM based per simulazioni e verifiche prestazionali

L'era digitale fonda le sue radici negli anni '70 con l'introduzione dei computer e l'avvio della terza rivoluzione industriale. Negli anni 2000 si passa dall'utilizzo dei computer come strumento di calcolo ad un vero e proprio mezzo di comunicazione. L'utilizzo di nuovi strumenti identifica in questo periodo la nascita della quarta rivoluzione industriale. La digitalizzazione cambia radicalmente il modo in cui gli edifici vengono progettati, costruiti, utilizzati e, in ultima analisi, gestiti. Questa trasformazione porta le strutture a nuovi livelli di efficienza, sicurezza e comfort. Gli edifici rispondono in modo intelligente ai loro ambienti grazie a dei

sensori installati in tutto il complesso e all'analisi completa dei dati raccolti. Questi sensori producono dati su diversi aspetti delle prestazioni dell'oggetto fisico, dalla temperatura, all'energia utilizzata/prodotta, alle condizioni metereologiche e così via. L'analisi di questi dati, combinata con altre fonti di informazione, permette di capire non solo il comportamento del prodotto, ma anche di predire come esso si comporterà in futuro. Questo flusso continuo di informazioni permette al gemello digitale di eseguire simulazioni, rilevare e analizzare eventuali problemi di prestazione del prodotto e studiare possibili miglioramenti.

L'industria 4.0 deriva da un'iniziativa politica tedesca iniziata nel 2011, con l'intento di cambiare il metodo di lavoro negli impianti industriali grazie all'applicazione di nuove tecnologie, in maniera tale da ottenere migliori prestazioni. Le trasformazioni che vengono apportate sono legate principalmente alla digitalizzazione e alle connessioni degli attori in gioco. Grazie alla digitalizzazione è possibile ottimizzare e monitorare tutti i passaggi, dall'inizio fino al risultato finale; mentre la connessione fornisce una conoscenza globale del lavoro. L'unione tra esse permette di ottenere un sistema autogestito e ottimizzato, indirizzato ad un'analisi ed un apprendimento automatico. In poche parole l'Industria 4.0 è il completo controllo del ciclo produttivo industriale. Tutti i dispositivi in gioco sono collegati e i loro comportamenti sono costantemente immagazzinati e monitorati, ciò porta ad una gestione che risulterebbe impossibile per un semplice lavoratore umano.

Per capire le motivazione e cause che hanno portato all'industria 4.0 bisogna ricapitolare le ragioni delle precedenti rivoluzioni industriali:

1. **Industria 1.0:** avvenne nel 1784 e corrisponde ad una rivoluzione della manifattura rispetto all'uso dell'energia; nacque la macchina a vapore e una conseguente meccanizzazione della produzione all'insegna di una maggiore velocità e potenza;
2. **Industria 2.0:** ebbe luogo nell'Europa occidentale nel 1870 e rappresenta la seconda generazione energetica; venne introdotta l'elettricità e l'utilizzo del petrolio, i quali permisero di incrementare ulteriormente i livelli di meccanizzazione di produzione; si affermò l'era della produzione di massa;
3. **Industria 3.0:** si sviluppò intorno al 1970 con l'arrivo dell'informatica e dell'elettronica, i quali incrementarono ulteriormente i livelli di automazione non solo nell'ambito produttivo ma anche organizzativo. Per Stati Uniti e Unione Sovietica partì la corsa allo spazio aprendo conoscenze su un campo ancora poco conosciuto. Le invenzioni che più hanno determinato la rivoluzione sono state quelle in campo informatico, elettronico, e telematico: Internet, radio, Web, transistor, radio e microprocessori;
4. **Industria 4.0:** nasce nel 2011 ed è l'utilizzo di una combinazione di tecnologie atte a favorire una produzione industriale del tutto automatizzata ed interconnessa.

Uno dei protagonisti principali dell'attuazione dell'Industria 4.0, ormai **industria 5.0** (EU, 2021), è l'Internet delle cose (IoT), che permette la collaborazione all'interno di un'unica grande struttura da parte di mezzi come macchine industriali, smartphone, tablet, database, sensori e attuatori che sfruttano concetti come big data, rete internet, intelligenza artificiale e analisi dati (Malik, P. K., Sharma, R., et al, 2021).

Per Industrial Internet of Things (Internet delle cose) si intende quel percorso evolutivo della rete attraverso la quale ogni oggetto fisico acquisisce una sua contropartita nel mondo digitale. Alla base dell'IoT vi sono oggetti intelligenti (capaci cioè di identificazione, localizzazione, diagnosi di stato, acquisizione di dati, elaborazione, attuazione e comunicazione) e reti intelligenti (aperte, standard e multifunzionali). IoT deriva inizialmente dal concetto

di reti della tecnologia a radiofrequenze indenticata nell'Istituto di Tecnologia nel Massachusetts nel 1999, e la funzione primaria del sistema identificato include l'acquisizione di dati, processo, trasmissione e applicazione delle informazioni. IoT è anche l'inizio della nuova era dell'Internet.

Anche nel Programma nazionale per la ricerca 2021-2027 si fa riferimento all'Industria 4.0. "L'area di intervento Transizione digitale – i4.0 rappresenta un settore nel quale, insieme all'esigenza di promuovere tecnologie e metodologie relative allo sviluppo e all'integrazione della ricerca in informatica, elettronica e telecomunicazioni, diventa sempre più presente l'esigenza di mettere a sistema e valorizzare pienamente il potenziale dell'innovazione digitale a vantaggio delle diverse esigenze e prospettive che possono emergere a livello individuale, di comunità e del sistema Paese". Le ricerche sulla transizione digitale e sull'i4.0 si configurano come alcuni dei principali volani per il raggiungimento dei Sustainable Development Goals dell'Agenda 2030. All'interno del Programma nazionale per la ricerca è presente una sezione "Articolazione 4" relativa all'architettura ed ingegneria, la quale è dedicata, tra le tante cose, a ricerche sull'integrazione di tools di intelligenza artificiale per l'analisi dei dati, per sistemi e servizi cloud (Mistero dell'Università e della Ricerca). Al giorno d'oggi sono tanti i mezzi utilizzati per la digitalizzazione, tra questi gli approcci digital twin. In passato, la progettazione è sempre stata affrontata in modo separato da ogni membro del team di progetto. La progettazione collaborativa era molto limitata, e la mancanza di coordinamento si traduceva spesso in gravi problemi durante la fase di costruzione. Per superare questo problema nasce la tecnologia BIM, che consente di costruire digitalmente accurati modelli virtuali di un edificio (nel campo dell'Architettura e dell'Ingegneria) a supporto di tutte le fasi del processo edilizio permettendo un'analisi e un controllo più efficienti rispetto ai processi tradizionali. I modelli così realizzati contengono in modo preciso la geometria e i dati necessari alle fasi di progettazione, di realizzazione e successivamente di gestione durante la vita utile dell'edificio.

IL National Building Information Modeling Standard (NBIMS) definisce come obiettivo del BIM quello di realizzare "un processo più efficiente di pianificazione, progettazione, costruzione, gestione e manutenzione che utilizzi un modello standardizzato di informazioni in formato digitale per ogni edificio, nuovo o esistente, contenente tutte le informazioni create o raccolte su tale edificio in un formato utilizzabile da tutti i soggetti interessati nell'intero ciclo di vita".

La metodologia BIM è in grado di supportare e migliorare molti processi operativi, di ridurre i tempi e i costi di progettazione e costruzione, migliorare la performance dell'edificio, progettare in maniera sostenibile e quindi ridurre i costi per il consumo di energia, aumentare la complessità dei progetti. Le procedure tradizionali non sono in grado di rispondere a tutte queste esigenze contemporaneamente (Yaik - Wah, L., et al., 2018 - Nataphra, W., Yabuki, N., Fukuda, T., 2018 - Tuhus-Dubrow, D., Krarti, M., 2010).

Un software predisposto per la progettazione BIM è **Autodesk Revit**. Tale programma possiede delle specifiche funzionalità e competenze che lo rendono altamente funzionale nell'ambito della progettazione. Rende possibile l'attuazione di tutte le fasi che precedono, accompagnano e seguono tutto il percorso di costruzione e la conseguente gestione di un edificio.

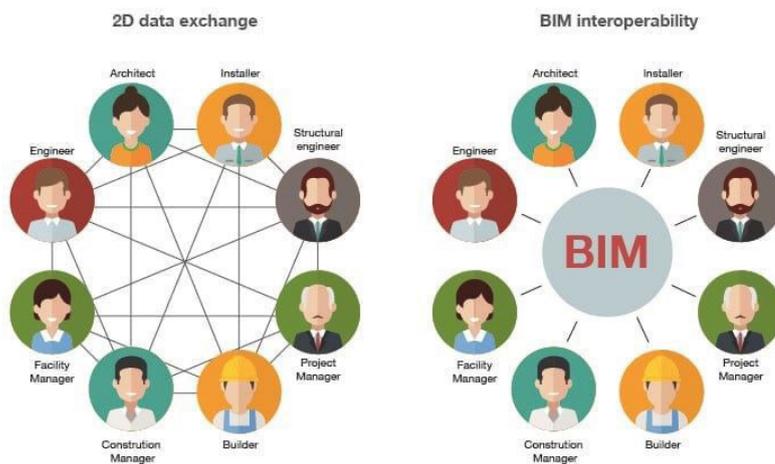


Fig. 2.14 Interoperabilità tra i diversi attori del processo edilizio
Fonte: [www. https://bim.acca.it/legame-bim-ifc/](https://bim.acca.it/legame-bim-ifc/)

Tale software permette di realizzare progetti decidendo il template di partenza, in modo tale da poter avere un'interfaccia personalizzata in base ai bisogni di ogni progettista. I template selezionabili sono 3:

1. Architettonico;
2. Strutturale;
3. Impiantistico.

La possibilità di poter differenziare il template fin dall'inizio della realizzazione del modello BIM su Revit, permette a chi si occupa di un determinato campo di poter operare insieme con gli altri progettisti. Infatti per chi ha il compito di costruire il modello impiantistico (MEP), è prioritario poter operare insieme con architetti e strutturisti, e soprattutto poter collaborare con le altre discipline contemporaneamente. Inoltre una predisposizione funzionale dell'ambiente di lavoro in relazione alle modalità e/o abitudini operativi del progettista risulta un'operazione prioritaria per ridurre i tempi legati alla progettazione e avere un controllo completo del progetto.

La strutturazione interna dell'applicativo lo differenzia totalmente dai CAD e permette, inoltre, di importare ed esportare file IFC i quali consentono il passaggio, quasi totale, di informazioni riguardanti il modello, tra un programma e l'altro. Il punto di forza di tale programma è quello di possedere una grande quantità di "famiglie", ovvero di elementi già modellati e utilizzabili, che velocizzano l'iter progettuale e ne forniscono le informazioni necessarie per realizzare un modello parametrico. Vi è anche la possibilità di creare noi stessi delle famiglie, modellandole da zero e fornendo loro le informazioni necessarie.

Autodesk Revit è soltanto uno dei tanti software di progettazione BIM presenti sul mercato. Il BIM viene incrociato anche alla progettazione algoritmica con altri programmi parametrici. Per esempio Grasshopper è uno dei più potenti software di modellazione algoritmica per la generazione ed il controllo di forme semplici e complesse nel campo dell'Ingegneria, dell'Architettura e del design. Tale software permette di generare forme 3D semplici e complesse mediante la definizione di un diagramma a nodi (algoritmo) in grado di risolvere

le relazioni matematiche e geometriche di un modello. Grasshoper ha il vantaggio di poter modificare in tempo reale sistemi dinamici mediante la variazione dei parametri definiti durante la costruzione del modello, con vantaggi immediati nel controllo e nella realizzazione della forma.

In questa sezione, vengono riportati alcuni lavori che hanno combinato il BIM e la progettazione parametrica per valutare l'efficienza energetica degli edifici.

Kim et al. (Kim, H., Asl, M. R., Yan, W., 2015) hanno analizzato una nuova metodologia per l'analisi delle prestazioni energetiche negli edifici con facciate dinamiche integrando BIM, progettazione parametrica e simulazioni. I risultati indicano che le facciate dinamiche possono consumare meno energia rispetto alle equivalenti facciate statiche. Dalla stessa prospettiva, Chen e Huang (Chen, J., Huang, S., 2016) hanno sviluppato uno studio simile, ma utilizzando anche modelli fisici e sensori, così come Shen e Lu (Shen, Y. T, Lu, P. W., 2016), che hanno creato un modello fisico di un sistema chiamato Parametric Adaptive Skin System (PASS) per interagire con i modelli virtuali, mirando ad aumentare l'uso della luce solare naturale negli edifici. Sia il BIM che lo strumento del linguaggio di programmazione visuale (Dynamo) utilizzato si sono presentati come potenti strumenti per progetti di facciate dinamiche con un'enfasi sulle prestazioni.

Asl et al. (Asl, M. R., et al., 2014) hanno sviluppato un sistema fondato sul BIM per l'analisi energetica basata sul cloud computing, consentendo una rapida valutazione di centinaia di alternative di progettazione e la connessione con ambienti visivi parametrici per adattamenti agili e accurati. Gli autori sottolineano che l'integrazione della modellazione parametrica con il BIM fornisce un processo più efficiente per una progettazione ottimizzata in termini di prestazioni. Per quanto riguarda l'ottimizzazione, Asl et al. (Asl, M. R., et al., 2015) hanno rilevato una lacuna relativa agli strumenti di ottimizzazione multidisciplinare basati sul BIM. Pertanto, gli autori hanno sviluppato lo strumento Optimo per Dynamo e hanno presentato una prima validazione della sua funzione di ottimizzazione. Optimo può essere considerato equivalente al plug-in di ottimizzazione Galapagos di Grasshopper.

In termini di risultati prestazionali, Gerrish et al. (Gerrish, T., et al., 2017) hanno utilizzato il linguaggio di programmazione visuale per stabilire il potenziale dell'uso del BIM come strumento per la visualizzazione e la gestione delle prestazioni di un edificio nelle fasi di progettazione e gestione, risultando in una metodologia basata su dati di simulazione, sensori e interviste con progettisti e utenti. Tuttavia, gli autori sottolineano che, affinché il BIM sia efficacemente utilizzato come strumento di gestione delle prestazioni, si devono cercare modelli di utilizzo per strutturare le informazioni, e i professionisti e gli utenti devono adattarsi agli impatti di queste nuove tecnologie sui loro ruoli.

2.4.1 Il digital twin

"Rappresentazione digitale realistica di assets, processi o sistemi sia nel contesto dell'ambiente costruito, che nell'industria e nella produzione. Ciò che distingue un gemello digitale da qualsiasi altro modello digitale è la sua connessione al gemello fisico" (Gemini Principles, 2018).

Il digital twin (gemello digitale) permette di rappresentare un omologo digitale di qualunque manufatto e fornisce un metodo senza rischi per simulare le sequenze di costruzioni, logistica, modellazione e fabbricazione (Haag, S., Anderl, R., 2018).

Il digital twin non è un modello statico, bensì, un sistema dinamico e "responsive" che connette tra loro il sistema fisico con quello digitale. È la rappresentazione virtuale di un oggetto o di un sistema fisico durante il suo ciclo di vita, ed utilizza dati in tempo reale per consentire la comprensione, l'apprendimento e il ragionamento.

Il gemello digitale è un insieme di costrutti di informazioni virtuali che descrivono comple-

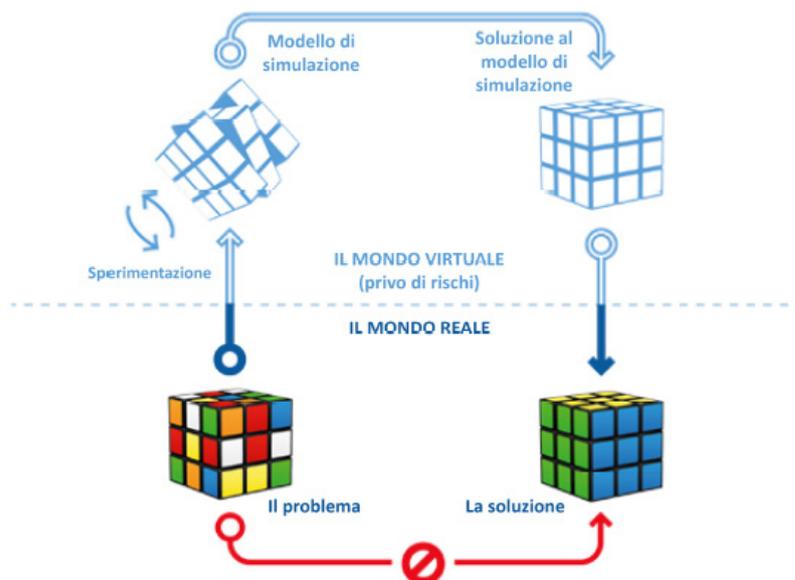


Fig. 2.15 Una copia digitale della realtà che permette di simulare e ottenere risposte in un ambiente sicuro e privo di rischi.

tamente un prodotto fisico, potenziale o reale, dal micro (livello atomico) al macro (livello geometrico). Qualsiasi informazione che potrebbe essere ottenuta dall'ispezione di un prodotto fisico può essere ottenuta dal suo gemello digitale.

Il Digital Twin è rappresentabile da tre elementi principali:

- Il mondo reale;
- Il mondo digitale;
- Le informazioni trasmesse dal mondo reale a quello digitale e viceversa.

Big Data (informazioni fornite), IoT (Internet of Things), AI (Intelligenza artificiale) e Cloud (permette ai clienti di accedere al sistema da remoto tramite browser o applicazione) sono gli elementi chiave che guidano l'approccio del digital twin. Questo prepara il terreno per un'automazione digitalmente potenziata che porti a edifici autonomi, che si controllano e si ottimizzano sulla base dell'intelligenza artificiale.

I gemelli digitali sono progettati per modellare beni o processi complessi che interagiscono in molti modi con i loro ambienti e per i quali è difficile prevedere i risultati/prestazioni su un intero ciclo di vita del prodotto. Possono anche essere utilizzati per altri obiettivi, tra cui le simulazioni di specifiche prove. Possono fornire importanti indicazioni che possono aiutare nella progettazione futura.

Anche il Programma Nazionale per la Ricerca (Pnr) 2021-2027 individua i diversi ambiti di innovazione su cui puntare (Ministero dell'Università e della Ricerca). Tra le tecnologie citate nel Piano rientra il Digital Twin, grazie al quale si potrà progredire nell'ambito della digitalizzazione, in maniera tale da ridurre la distanza tra progetto e realizzazione di un elemento.

Un esempio di utilizzo del Digital twin è il caso studio di "Here East", descritto qui di seguito.

Here East è un nuovo centro per l'innovazione nel mondo degli affari della tecnologia, dei media e dell'istruzione situato nel Queen Elizabeth Olympic Park ad est di Londra. L'esperimento ha avuto una durata di sei mesi, da febbraio a luglio del 2018. Per questo



Fig. 2.16 Gruppo di sensori ambientali.
Fonte: Dawkins, O., Dennett, A., Hudson-Smith, A., 2018.



Fig. 2.17 Esempi di visualizzazione dei dati dinamica.
Fonte: Dawkins, O., Dennett, A., Hudson-Smith, A., 2018.

lavoro sono stati installati 20 scatole di sensori all'interno del campus. I dati ottenuti sono stati utilizzati per eseguire delle analisi al fine di identificare modelli e relazioni tra i parametri ambientali nel tempo. L'analisi visiva dei dati è stata elaborata in tre dimensioni e quasi in tempo reale sfruttando le capacità di rendering del motore di gioco Unity. Ciò ha consentito un'ispezione visiva e tempestiva di aspetti altrimenti invisibili delle prestazioni quotidiane dell'edificio.

È stato costruito un modello 3D del sito a partire dai dati BIM, protetti dal processo di costruzione, e dai dati LiDAR acquisiti in collaborazione con il gruppo di scansione Bartlett. I sensori sono stati collegati in maniera interattiva con il Digital Twin; è stato realizzato un collegamento da un oggetto fisico, la scatola dei sensori, a delle risorse online a cui è possibile accedere tramite dispositivi mobili che possono includere link delle rappresentazioni 3D del gemello digitale di Here East (Dawkins, O., Dennet, A., Hudson-Smith, A., 2018) (Fig. 2.16 - 2.17).

2.4.2 Il BIM per simulazioni e verifiche prestazionali

La realizzazione di un gemello digitale necessita dell'utilizzo di una modellazione BIM dell'elemento da analizzare.

La digitalizzazione dell'involucro, il trasferimento del modello BIM al software di analisi strutturale e l'applicazione della prova generano una procedura BIM - based che permette di monitorare, prima di effettuare i test in laboratorio, eventuali criticità e problemi nell'utilizzo di un determinato involucro edilizio; o al contrario dimostrare il corretto funzionamento della facciata analizzata.

I risultati ottenuti digitalmente devono essere successivamente verificati sperimentalmente mediante la realizzazione del medesimo test in scala 1:1 presso il laboratorio.

Tale processo porta a raggiungere risultati sostanziali che vogliono evidenziare i vantaggi nella simulazione delle prove prestazionali su modelli digitali di involucri edilizi.

Al fine di offrire una visione più ampia e dei risultati maggiormente attendibili sono analizzati e confrontati tra loro tre diversi scenari, schematizzati in figura 2.18.



Fig. 2.18 Schema sui tre livelli di analisi.

Questi tre casi permettono non solo di validare la digitalizzazione del test per l'involucro sottoposto alla prova in laboratorio, ma consentono di verificare il corretto funzionamento del test anche per una facciata esistente.

2.5 Conclusioni e problemi aperti

La progettazione degli involucri edilizi e le verifiche prestazionali ad esso associate costituiscono un tema attuale e in rapida evoluzione all'interno del dibattito disciplinare. In particolare, dall'esame dello stato dell'arte, si evince che l'impiego del digital twin mediante modellazione BIM sugli involucri edilizi è stato proposto in tempi molto recenti e costituisce un tema di ricerca ricco di spunti per sviluppi futuri.

Risulta evidente la necessità di introdurre nelle fasi di concettualizzazione e di ingegnerizzazione dell'involucro una serie di simulazioni e verifiche prestazionali su base digitale con lo scopo di anticipare il risultato dei test, e di conseguenza facilitare e rendere più economico il percorso di progettazione. L'applicazione digitale delle prove sugli involucri edilizi implica una comunicazione, e quindi uno scambio di informazioni, tra software di modellazione BIM e di calcolo strutturale. Per cui risulta fondamentale l'interoperabilità tra tali software, che per quanto intuitiva sia, presenta, come si vedrà, alcune criticità applicative.

Riferimenti bibliografici

AAMA 501.1-17, *Standard Test Method for Water Penetration of Windows, Curtain Walls and Doors Using Dynamic Pressure*

AAMA-501.5, *Test Method for Thermal Cycling of Exterior Walls*, (2007)

American Architectural Manufacturers Association, *AAMA 501.4-00 Recommended Static Test Method For Evaluating Curtain Wall and Storefront Systems Subjected to Seismic And Wind Induced Interstory Drifts*, *AAMA 501.6-01 Recommended Dynamic Test Method For Determining The Seismic Drift Causing Glass Fallout From A Wall System*, (2001), 20 pages.

ARUP, *Digital twin*. London. www.arup.com, 2019.

Ascione, F., Bianco, N., Iovane, T., Mastellone, M., & Mauro, G. M., *The evolution of building energy retrofit via double-skin and responsive façades: A review*. *Solar Energy*, 224, pp. 703-717, (2021).

Asl, M. R., Bergin, M., Menter, A., Yan, W., *BIM-based Parametric Building Energy Performance Multi-Objective Optimization*, International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 32, Newcastle upon Tyne, (2014) 455-464.

Asl, M. R., Stoupine, A., Zarrinmehr, S., *Optimo: A BIM-based Multi-Objective Optimization Tool Utilizing Visual Programming for High Performance Building Design*, International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 33, Vienna, (2015) 673-682.

ASTM E283-04, *Standard Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen*, (2012)

ASTM E331-00, *Standard Test Method for Water Penetration of Exterior Windows, Skylights, Doors, and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference*, (2009)

ASTM E330, *Standard Test Method for Structural Performance of Exterior Windows, Doors, Skylights and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference*.

Banham, R., *Architecture of the Well Tempered Environment*. The Architectural Press, London The University of Chicago Press, Chicago. ISBN: 0 85139 074 9, (1969).

Barbosa, S., Ip, K., *Perspectives of double skin façade for naturally ventilated buildings: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40 (2014) 1019–1029.

Böke, J., Knaack, U., Hemmerling, M., *State-of-the-art of intelligent building envelopes in the context of intelligent technical systems*, *Intelligent Buildings International*, Vol 11, n°1 (2019) 27-45.

Bonham, M.B., *Bioclimatic Double-Skin Façades*, Routledge (2020) (350 pages).

Brock, L., *Designing the exterior wall: an architectural guide to the vertical envelope*, N.J., John Wiley, Hoboken (2005).

Butera, F., "La trasparenza è sostenibile?", *Modulo* 318, (2006) 4 pages.

Cascone, S., *Analysis and design of unitized curtain walls*, In *Colloqui.AT.e 2016 Convegno Ar.Tec – Matera*. [a cura di Guida, A., Pagliuca, A.]. pp. 1-10. Gangemi Editore, Roma, (2016).

Chen, J., Huang, S., *Adaptive Building Facade Optimisation: An integrated BIM-green approach*, *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing*, Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA, (2016) 259-268.

Compagno, A., *Intelligent Glass Facades - Material, Pratiche, Design*, Artemis Verlags, Switzerland, Basilea, 1995.

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).

Dawkins, O., Dennett, A., Hudson-Smith, A., *Living with a Digital Twin: Operational management and engagement using IoT and Mixed Realities at UCL's Here East Campus on the Queen Elizabeth Olympic Park*, *Conference Paper*, (2018) 7 pages.

Di Ruocco, G., *Oltre la facciata. L'evoluzione tecnologica dell'involucro edilizio tra tradizione e innovazione*, CUES Edizioni, Luglio 2012 (294 pages).

Elder, K.E., *Building Envelope*. In: Turner, W.C., Doy, S., *Energy management handbook*, 5th ed., pp. xviii, 856, Lilburn, GA., Fairmont Press; Marcel Dekker, New York (2007) 221–46.

EU, *Industry 5.0: Towards more sustainable, resilient and human-centric industry*, Report, 2021.

Faheem, M., Shah, S.B.H, Butt, R.A., et al., *Smart grid communication and information technologies in the perspective of Industry 4.0: Opportunities and challenges*, *Computer Science Review*, 30 (2018) 1-30.

- Fedorko, G., Molnar, V., Vasil, M., Salai, R., *Proposal of digital twin for testing and measuring of transport belts for pipe conveyors within the concept Industry 4.0*, Measurement 174 (2021), 14 pages.
- Gerrish, T., Ruikar, K., Cook, M., Johnson, M., Phillip, M., Lowry, C., *BIM application to building energy performance visualization and management: Challenges and potential*, Energy and Buildings, 144 (2017) 218-222.
- Giedion, S., *Spazio, tempo, architettura*, Seconda edizione Hoepli, (1979) 770 pages.
- Haag, S., Anderl, R., *Digital twin – Proof of concept*, Manufacturing Letters, 15 (2018) 64-66.
- Kamel, E., Memari, A. M., *Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions*, Automation in Construction 97 (2019) 164-180.
- Kazmierczak, K., *Review of curtain walls, focusing on design problems and solutions, Design and Rehabilitation*, Session EE4-1 (2010), 20 pages.
- Kim, H., Asl, M. R., Yan, W., *Parametric BIM-based Energy Simulation for Buildings with Complex Kinetic Façades Leave empty if you require no subtitle*, International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, (2015) 9 pages.
- Kumar, G., Raheja, G., *Design Determinants of Building Envelope for Sustainable Built Environment: A Review*, International Journal of Built Environment and Sustainability, (2016), 111-118.
- Lang, H.K., *Atlante delle Facciate*, Grande Atlante di Architettura (2005).
- Lauria, M., Trombetta, C., *Building Future Lab, Experimental Research for Sustainability in the Building Sector*, Maggioli Ed., 2016.
- Legislazione Tecnica, *Norme tecniche per le costruzioni (NTC 2018)*. D. Min. Infrastrutture e Trasporti 17 gennaio 2018.
- Lim, Y. W., Majid, H. A., Samah, A. A., Ahmad, M. H., *BIM and Genetic Algorithm optimisation for sustainable building envelope design*, International Journal of Sustainable Development and Planning, (2018) 12 pages.
- Malik, P. K., Sharma, R., et al. "Industrial Internet of Things and its Applications in Industry 4.0: State of The Art", Computer Communications 166, (2021) 125-139.
- Mariano, R.O., *Responsive Building Envelope Solutions*, DeCivil, Instituto Superior Técnico, Lisbon University, (2018) 11 pages.
- Matthews, R.S., Bury M.R.C., & Redfearn D., *Investigation of dynamic water penetration tests for curtain walling*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 60, pp. 1-16, (1996).
- McFarquhar, D., *The Role of the Building Facade - Curtain Walls*, Building Enclosure Technology & Environment Council (National Institute of Building Sciences), (2012), 11 pages.
- Ministero dell'Università e della Ricerca, *Programma Nazionale per la ricerca 2021-2027*, Delibera n.74/2020, 182 pages.
- Modin, H., *Adaptive building envelopes*, Master's Thesis, (2014), 147.
- Mohtashami, N., Fuchs, N., Fotopoulou, M., Drosatos, P., Streblow, R., Osterhage, T., & Müller, D., *State of the Art of Technologies in Adaptive Dynamic Building Envelopes (ADBES)*, Energies, 15(3), 829., (2022).
- Najafi, E., Faizi, M., *Evolution of Building Envelopes through Creating Living Characteristics*, Journal of Civil Engineering and Architecture 11 (2017) 1186-1202.
- Nataphra, W., Yabuki, N., Fukuda, T., *Optimizing the evaluation of building envelope design for thermal performance using a BIM-based overall thermal transfer value calculation*, Building and Environment, 136 (2018) 128-145.
- Romano, R., *Evoluzione delle prestazioni energetiche dell'involucro architettonico - Energy performance evolution of the building envelope*, Recupero bioclimatico edilizio e urbano. Strumenti, tecniche e casi studio, (2010) pp.95-103.
- Romano, R., Aelenei, L., Aelenei, D., & Mazzucchelli, E. S., *What is an adaptive façade? Analysis of Recent Terms and definitions from an international perspective*, Journal of Facade Design and Engineering, 6(3), pp. 65-76, (2018).
- Sadineni, S. B., Madala, S., Boehm, R. F., *Passive building energy savings: A review of building envelope components*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 3617-3631.
- Samir H., Shahin M., *Adaptive building envelopes of multistory buildings as an example of high performance buildings skin*, Alexandria Engineering Journal, (2019) 58 345-352.
- Sanders, R. M., & Craig, A., *Preventing and Treating Failure in Glazed Curtain Wall Systems*. Journal of architectural technology ISSUE 2/2012, Vol. 29, pp. 1-8. Hoffmann Architects, Inc., (2012)

Shen, Y. T., Lu, P. W., *The development of kinetic façade units with BIM-based active control system for the adaptive building energy performance service*, *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing*, Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA, (2016) 517-526.

Tatano V., Rossetti, M., *Le facciate continue*, G-Day, 25 ottobre 2007 (70 pages).

Taveres-Cachat, E., Grynning, S., Thomsen, J., Selkowitz, S., *Responsive building envelope concepts in zero emission neighborhoods and smart cities - A roadmap to implementation*, *Building and Environment* 149 (2019) 446-457.

Tuhus-Dubrow, D., Krarti, M., *Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings*, *Building and Environmental* 45, (2010) 1574-1581.

Wael Salah, M. A.R., *Thermal performance optimization of parametric building envelope based on bio-mimetic inspiration*, *Ain Shams Engineering Journal*, (2020) 10 pages.

William J. R. Curtis, *L'architettura moderna dal 1900*, terza edizione Phaidon, (2006) 736 pages.

Wyckmans, A., *Intelligent Building Envelopes. Architectural Concept & Applications for Daylighting Quality*, Norwegian University of Science and Technology – Faculty of Architecture and Fine Art, Trondheim, Norway, PhD Thesis, (2005)

Yaik-Wah, L., Azurah, A.S., Hairudin, A. M., Mohd, H., A., et al., *BIM and Genetic Algorithm optimization for sustainable building envelope design*, *International Journal of Sustainable Development and Planning*, (2018) 151-159.

Riferimenti sitografici

ArchiExpo, <https://www.archiexpo.it/prod/focchi/product-149696-1712551.html>

BibLusBIM, [www. https://bim.acca.it/legame-bim-ifc/](https://bim.acca.it/legame-bim-ifc/)

Caneva serramenti, <https://www.canevasrl.it/project/facciate-continue/>

Falar, <https://www.falar.it/facciate-continue/facciata-continua-strutturale/>

Metallbau Bühlmann, <https://www.buehlmann-ag.ch/it/facciate/sistema/facciata-a-montanti-e-traversi/>

Ipotesi di lavoro e definizioni di simulazioni su modelli digitali

Chapter 3 states the delimitation of the field, the identification of the case study and proposes the definition of a digital twin approach that combines physical and virtual reality, enabling data analysis and systems monitoring such that predictive reasoning is possible. Recent damage from earthquakes and hurricanes has been a reminder of how vulnerable we are to the forces of nature. As a result, one of the major current challenges in the field of building envelopes concerns the development of innovative design concepts to better protect such structures from the damaging effects of environmental forces, including those from earthquakes. In this regard, in order to monitor the structural strength of the building envelope under the action of environmental forces, the dynamic seismic test according to American Standard (AAMA 501.6-09) was applied on a mullion and transom façade. Specifically, the building envelope identified as a case study is the Poliedra Sky 50. Its choice derived mainly from the availability of information and material provided by the company itself producing such a façade, namely Metra Building.

The case study under consideration is replicated on multiple situations: (i) digital testing and verification simulating the laboratory; (ii) digital testing and verification simulating the existing; and (iii) laboratory testing and verification. This choice allows the results found to be compared and analyzed in a broader view, offering greater benefits than a single analysis. Furthermore, BIM modeling and how to be able to apply this technology in order to simulate building envelope testing is described. The focus is also on the interoperability between the BIM modeling software, Autodesk Revit, and the structural analysis software, Sap2000. This includes a description of the IFC information exchange format, the advantages and disadvantages it generates, and the reasons why Sap2000 was chosen as the structural analysis software. Information exchange, although intuitive, as will be seen, has some critical application issues.



Fig. 3.1. Facciata continua in pannelli Poliedra Sky 50 Metra Building.

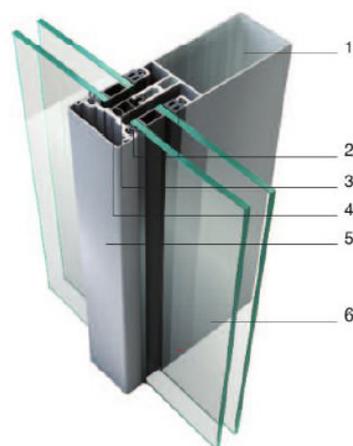
3.1 Presupposti operativi

Tale fase di lavoro è indispensabile ai fini della delimitazione della ricerca; è servita per la scelta della prova che verrà digitalizzata e sottoposta ai vari modelli realizzati in BIM e per l'individuazione del caso studio.

Tra i vari test strutturali e tecnologici a cui vengono sottoposti gli involucri al fine di soddisfare determinati requisiti, è stato scelto di riprodurre digitalmente e sottoporre in via sperimentale alla facciata la **prova sismica dinamica** AAMA 501.6-09. La motivazione di tale scelta deriva dalla volontà di confrontarsi con una delle principali sfide attuali nell'ambito degli involucri edilizi, ovvero lo sviluppo di concetti di progettazione innovativi al fine di incrementare la resistenza strutturale degli elementi componenti la facciata quando sottoposta alle forze ambientali, quali per esempio il sisma. Inoltre, è stato deciso di operare seguendo la normativa Americana piuttosto che quella Europea, in quanto prevede, rispetto a quest'ultima, una prova sismica più completa, spingendo l'analisi verso lo stato limite ultimo, mediante l'applicazione del crescendo test.

Il caso studio individuato è la facciata a montanti e traversi della Metra Building, denominata "**Poliedra Sky-50**". I motivi che hanno portato alla scelta di tale tipologia di involucro come caso studio della ricerca sono principalmente tre. Il primo risiede nell'elevata gamma di involucri a montanti e traversi presenti negli edifici, per cui la procedura realizzata può essere applicata ad un campo molto vasto. Il secondo motivo deriva dalla possibilità di poter consultare i dati relativi all'applicazione in laboratorio della prova sismica secondo normativa Americana sulla Poliedra Sky-50 grazie ad una relazione tecnica molto dettagliata fornita dall'azienda stessa Metra Building. Questo permette di confrontare i risultati di tale prova con il medesimo test digitalizzato sulla stessa facciata, rendendo così affidabile la procedura realizzata. Infine, il terzo motivo risiede nella possibilità di poter visionare, in qualunque momento si voglia, la facciata Poliedra Sky-50; in quanto la digitalizzazione della prova dinamica verrà applicata anche ad uno scenario esistente, rappresentato dall'involucro Poliedra Sky-50 montato presso il lato sud del Dipartimento di Architettura e Territorio di Reggio Calabria.

Tecnologia



- 1 - Montante
- 2 - Guarnizioni per vetri in EPDM
- 3 - Distanziale
- 4 - Pressore
- 5 - Cartella
- 6 - Doppio vetro con intercapedine

Fig. 3.2. Facciata Metra Poliedra Sky 50.
Fonte: Metra Building, 2022.

Qui di seguito viene riportata la scheda tecnica di tale facciata, comprendente le caratteristiche tecniche, le prestazioni e i vantaggi.

SCHEDA TECNICA FACCIATA CONTINUA

Casa produttrice: Metra

Tipologia facciata continua: Poliedra-Sky 50

Caratteristiche tecniche:

- Facciata tradizionale a montanti e traversi;
- Struttura da 50 millimetri, visibile sia internamente che esternamente;
- Montante tubolare: profondità da 42 mm a 225 mm;
- Spessore del vetro: da 8 mm a 45 mm;
- Tenuta: guarnizioni in EPDM;
- Taglio termico: distanziale isolante rigido in Tecno CMP;
- Accessori originali;
- Finitura: anodizzato o verniciato;
- Lega in alluminio EN AW – 6060;
- Integrazione con i sistemi Poliedra-Sky 50l, 50S, 50CV, 60, Sistemi a Battente e Frangisole.

Prestazioni:

- Tenuta all'acqua statica – EN 12154: Re1050;
- Tenuta all'acqua dinamica - ENV 13050: 250/750 Pa;
- Permeabilità all'aria – EN 12152: AE;
- Resistenza al vento – EN 12179 – EN 13116: 2000/3000 Pa;
- Potere fonoisolante – EN ISO 140-3 – EN ISO 717-1: Fino a 50 Db;
- Trasmittanza Termica $U_f W/m^2 K$: 1.4-2.3;
- Resistenza all'urto – EN 14019: Classificazione I5; altezza di caduta 950 mm.

Vantaggi:

- Isolamento acustico e termico;
- Impiego del sistema per molteplici tipi di realizzazione;
- Struttura portante leggera con notevole facilità di montaggio;
- Aspetto estetico personalizzabile tramite copertine esterne;
- Integrazione di tutte le aperture a battente della serie METRA.

I materiali utilizzati sono principalmente l'alluminio per montanti e traversi, ed il vetro per i pannelli. Qui di seguito viene riportata la scheda tecnica di tali materiali.

SCHEDA TECNICA MATERIALI

Materiali facciata:

- Alluminio EN AW – 6060
- Vetro

Alluminio EN AW - 6060

L'alluminio EN AW - 6060 è in realtà una lega formata da Alluminio, Magnesio e Silicio. Viene utilizzata principalmente in edilizia, trasporti, arredamento dove non sono richieste elevate caratteristiche meccaniche. Possiede una ottima attitudine all'anodizzazione.

CARATTERISTICHE CHIMICHE	Designazione numerica	ENAW - 6060
	Designazione chimica	ENAW - AlMgSi
COMPOSIZIONE CHIMICA IN %	Silicio Si	0.30 - 0.60
	Ferro Fe	0.10 - 0.30
	Rame Cu	0.10 massimo
	Manganese Mn	0.10 massimo
	Magnesio Mg	0.35 - 0.60
	Cromo Cr	0.05 massimo
	Zinco Zn	0.15 massimo
	Titanio Ti	0.10 massimo
	Altri	Ognuno 0.05
Alluminio	Resto	

Tab. 3.1. Caratteristiche chimiche dell'alluminio ENAW - 6060.

CARATTERISTICHE MECCANICHE	Spessore (mm)	≤25	≤5	5≤25
	Tempra	T4	T5	T5
	Resistenza a trazione Rm (MPa) min.	120	160	140
	Carico di snervamento Rp 0.2 (MPa) min.	60	120	100
	Allungamento A% min.	16	8	8
	Durezza Brinell HB (non normata) min.	50	60	60

Tab. 3.2 Caratteristiche meccaniche dell'alluminio ENAW - 6060.

CARATTERISTICHE MECCANICHE	Spessore (mm)	≤5	5≤25
	Tempra	T6	T6
	Resistenza a trazione Rm (MPa) min.	190	170
	Carico di snervamento Rp 0.2 (MPa) min.	150	140
	Allungamento A% min.	8	8
	Durezza Brinell HB (non normata) min.	70	70

Tab. 3.3 Caratteristiche meccaniche dell'alluminio ENAW - 6060.

CARATTERISTICHE FISICHE	Densità (Kg/dm ³)	2.70
	Punto di fusione (°C)	600/655
	Coefficiente di Poisson	0.33
	Modulo di elasticità (GPa)	69.00
	Modulo di elasticità tangenziale (GPa)	26.00
	Coeff. Dilat. Termica lineare da 20-100 °C (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	23.00
	Conducibilità termica a 20°C (W/(cm x K))	2.09
	Calore specifico da 0 a 100°C (J/(Kg x K))	890.00

Tab. 3.4 Caratteristiche fisiche dell'alluminio ENAW - 6060.

Vetro

Tab. 3.5 Caratteristiche chimiche del vetro.

COMPOSIZIONE CHIMICA IN %	Costituente di base	SiO ₂	69 - 47
	Abbassa il punto di fusione	NaO ₂	12 - 16
	Modificatore di reticolo	K ₂ O	0 - 1
	Abbassa il punto di fusione	CaO	5 - 12
	Aumenta la stabilità chimica	MgO	0 - 6
	Aumenta la stabilità chimica	Al ₂ O ₃	0 - 3
	Migliora la resistenza agli sbalzi termici	B ₂ O ₃	0 - 12

Tab. 3.6 Caratteristiche meccaniche del vetro.

CARATTERISTICHE MECCANICHE	Resistenza a trazione R _m (MPa)	20 - 200
	Resistenza a compressione (MPa)	221 - 1000
	Tenacia alla frattura (MPa m ^{1/2})	0.75

Tab. 3.7 Caratteristiche fisiche del vetro.

CARATTERISTICHE FISICHE	Densità (Kg/dm ³)	2.70
	Punto di fusione (°C)	600/655
	Coefficiente di Poisson	0.33
	Modulo di elasticità (GPa)	69.00
	Modulo di elasticità tangenziale (GPa)	26.00
	Coeff. Dilat. Termica lineare da 20-100 °C (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	23.00
	Conducibilità termica a 20°C (W/(cm x K))	2.09
	Calore specifico da 0 a 100°C (J/(Kg x K))	890.00

Infine, la prova selezionata è stata applicata sul caso studio in tre diverse situazioni:

- prove e verifiche digitali che simulano il laboratorio;
- prove e verifiche digitali che simulano l'esistente;
- prove e verifiche di laboratorio.

3.2 Delimitazione del campo di indagine

3.2.1 Prove e verifiche che simulano il laboratorio

La digitalizzazione di tali prove è un passo utile e necessario al fine di rendere più rapido ed economico il percorso di progettazione delle facciate. La realizzazione dei test in formato digitale può aiutare il progettista nella scelta dei materiali e delle dimensioni geometriche degli elementi della facciata da sottoporre alle prove, avendo già a disposizione dei risultati attendibili. Il digital twin inevitabilmente modifica i processi e i comportamenti della progettazione di facciate continue.

Inoltre, la realizzazione di un gemello digitale, consente, in real time, di fornire tutte le informazioni necessarie ai diversi professionisti e/o operatori coinvolti, in particolare sullo stato degli elementi, permettendo la creazione di un programma di manutenzione e consentendo così di poter intervenire tempestivamente su tali elementi.

Oggi, uno dei più grandi ostacoli per lo sviluppo della metodologia BIM nel mondo delle strutture ed infrastrutture è sicuramente la mancanza di interoperabilità tra i software presenti nel mercato. Questo aspetto è preso in considerazione in questo lavoro di ricerca,

sottopendo in particolare l'attenzione sull'interoperabilità tra software di modellazione parametrica BIM e software di calcolo strutturale.

Le facciate continue sono state realizzate digitalmente mediante l'utilizzo di un software di modellazione BIM, ovvero **Autodesk Revit**, e sono state sottoposte alle prove digitalizzate AAMA 501.6-09 mediante un software strutturale, ovvero **Sap2000**. Tale programma permette di testare gli effetti dei carichi su molti tipi di strutture e verificarne la conformità dei codici.

I due programmi scambiano informazioni tra loro mediante il formato IFC (Industry Foundation Classes). L'IFC, originariamente creato come formato di file d'interscambio aperto e interoperabile, è in grado di soddisfare a diverse necessità. In senso stretto, IFC non è un solo un formato di scambio, ma uno schema, cioè una struttura o una specifica dei dati: lo schema IFC può essere pensato come un "sistema di archiviazione" per organizzare e trasportare dati digitali. Nonostante tale formato permetta l'acquisizione di numerose informazioni, alcune di esse non possono essere estrapolate e trasferite ad un software di tipo strutturale. Infatti il trasferimento di informazioni da un software di modellazione ad uno strutturale presenta alcune criticità applicative; esso può acquisire esclusivamente il modello analitico (strutturale) e non quello architettonico. La facciata continua realizzata su Revit è considerata quale elemento architettonico, per cui non viene riportata su Sap2000, di conseguenza viene trascurata la presenza dei montanti e dei traversi. Si può ovviare a questo problema modellando i montanti e i traversi come delle travi strutturali ("beam"), mentre i pannelli come elementi "shell". Per cui risulta importante verificare che il trasferimento degli elementi strutturali avvenga in maniera corretta; di conseguenza si effettuerà un controllo sulla posizione e sui collegamenti tra gli elementi una volta che il modello è stato trasferito sul software strutturale.

In sintesi al fine di trasferire correttamente gli elementi tra i due software occorre seguire i seguenti punti:

- verifica dell'omogeneità analitica del modello che garantisce sulla stabilità della struttura;
- trasferimento del modello da Autodesk Revit al software strutturale Sap2000;
- controllo sulla posizione degli elementi e sul corretto trasferimento dei materiali al software di analisi strutturale.

Quest'ultimo aspetto risulta indispensabile al fine di evitare errori di posizionamento degli elementi della facciata dovuti al trasferimento tra i modelli.

3.2.2 Prove e verifiche digitali che simulano l'esistente

La facciata sud del Dipartimento di Architettura e Territorio dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria è composta da sei pareti vetrate (Facciata A), ciascuna formata da trenta moduli indipendenti di vetro, e da una singola parete vetrata (Facciata B) che delimita l'ingresso alla facoltà. Il motivo della scelta di questa facciata per la simulazione e la verifica digitale che simula l'esistente risiede principalmente:

- nella presenza della Poliedra Sky-50 come tipologia di involucro;
- nella facilità di ottenimento di informazioni;
- nella possibilità di visionare la facciata ogni qual volta si ritenga necessario.

La facciata A copre due piani con diverse altezze di interpiano, rispettivamente di 4.2 m e 3.6 m; è larga 4.35 m e alta 7.8 m ed è costituita da sei montanti e sette traversi. Sono presenti trenta pannelli in vetro (Fig. 3.3), di cui quattro apribili. I pannelli di vetro del primo piano sono dotati di un certo angolo di inclinazione. Montanti e traversi sono realizzati in alluminio EN AW – 6060. 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 facciata che delimita l'ingresso all'edificio (Fig. 3.4) è invece notevolmente più grande; è larga 6 m ed alta 12.4 m, ed è costituita da sette montanti e dieci traversi per un totale di quarantasei pannelli di vetro, alcuni di essi apribili. Alla base, le singole unità di vetro sono interrotte dalla presenza di due porte che danno accesso all'edificio.

La tabella 3.7 riassume tutte le informazioni riguardanti le caratteristiche delle due facciate, tra cui i dati geometrici, il numero di elementi ed i pannelli di vetro.



Fig. 3.3 Fotografia della facciata A.



Fig. 3.4 Fotografia della facciata d'ingresso B.

Attributo		Facciata A	Facciata B
Dati geometrici	Altezza (m)	7.80	12.40
	Lunghezza (m)	4.35	6.00
	Altezza 1° piano (m)	4.20	4.20
	Altezza 2° piano (m)	4.20	4.20
	Altezza 3° piano (m)	/	4.20
Numero di elementi	Montanti	6	7
	Traversi	7	10
	Pannelli di vetro	30	46
Pannelli di vetro	Spessore	0.1 - 0.3 - 0.1	0.1 - 0.3 - 0.1

Tab. 3.8 Dati generali delle due facciate.

3.2.3 Prove e verifiche di laboratorio dell'ITC del CNR

Gli involucri edilizi vengono sottoposti a determinate prove e verifiche in laboratorio al fine di soddisfare determinate prestazioni. Alcuni di tali test vengono richiesti dalla normativa vigente, altri invece semplicemente dalla committenza, la quale richiede ulteriori prove in funzione dell'utilizzo di quella specifica facciata.

Esistono dei laboratori predisposti per effettuare le prove richieste, uno di questi è l'ITC del CNR (Istituto per le Tecnologie della Costruzione del Consiglio Nazionale delle Ricerche) di San Giuliano Milanese. L'Istituto svolge attività di ricerca, innovazione, trasferimento tecnologico e formazione nelle seguenti principali aree tematiche:

- Tecnica, tecnologia e sicurezza delle costruzioni e delle infrastrutture;
- Materiali, componenti e tecnologie di nuova concezione per una costruzione sicura e di elevate prestazioni;
- Soluzioni e tecnologie sostenibili per l'efficienza energetica, la qualità ambientale e l'acustica di edifici e aree urbane;
- Rischio, vulnerabilità, danno e resilienza del patrimonio edilizio costruito in zona sismica, restauro dell'architettura e tutela del paesaggio costruito;
- Metodi e strumenti di rilievo, analisi, rappresentazione e modellazione per la valorizzazione e la riqualificazione dell'ambiente costruito e del patrimonio storico-architettonico;
- Ambienti digitali per la progettazione, esecuzione e gestione delle opere architettoniche e dei cantieri di restauro;
- Condizionamento dell'aria, riscaldamento, refrigerazione e impianti tecnologici per la costruzione: sistemi, tecnologie e materiali per l'efficienza energetica;
- ICT a supporto della rigenerazione delle aree urbane e della valorizzazione dei Beni Culturali materiali e immateriali;
- Formazione continua e informazione nel settore delle costruzioni e soluzioni di Digital Learning (<https://www.cnr.it/it/istituto/101/istituto-per-le-tecnologie-della-costruzione-it>).

Il caso studio selezionato, ovvero la facciata continua in alluminio a montanti e traversi, denominata Poliedra Sky 50, è stato sottoposto, presso il laboratorio ITC del CNR, alla prova dinamica secondo normativa americana AAMA 501.6-09. Le informazioni sul test condotto, comprendente i risultati, sono state fornite dall'azienda produttrice dell'involucro (Metra Building). Il report comprende:

1. Descrizione del campione sottoposto a prove;
2. Campionamento e procedura di preparazione del campione;
3. Metodologia di prova;
4. Apparecchiatura di prova;

5. Set-up di prova;
6. Risultati;
7. Considerazioni sui risultati e conformità ai requisiti richiesti;
8. Limitazioni.



Fig. 3.5 Vista del laboratorio di Componenti e Sistemi Edilizi di San Giuliano Milanese.

3.3 Modellazione BIM

Il lavoro di tesi mira a valutare come la modellazione in ambiente BIM può portare benefici e facilitare il calcolo strutturale, nonché la sperimentazione relativa alla simulazione del comportamento al sisma di facciate continue attraverso software di calcolo a elementi finiti (FEM), semplificando la comunicazione tra ambiti progettuali che lavorano, molte volte, parallelamente senza interagire tra loro nel modo più funzionale.

Al giorno d'oggi vengono progettate strutture sempre più complesse, per cui nasce l'esigenza di far comunicare professionisti differenti che lavorano con applicazioni e software diversi. Per non limitare il BIM alla sola fase di progettazione, ma renderlo effettivamente un flusso di informazioni che inizia durante la fase di progettazione, continua con la gestione e termina con la demolizione della struttura, è necessario che lo scambio di dati e modelli tra i diversi software sia possibile. È utilizzato di norma un formato aperto di scambio di dati, Industry Foundation Classes, ovvero IFC, ben consolidato in tutto il mondo nel

campo del BIM. Tale formato consente lo scambio di dati non solo associati alle proprietà geometriche dei componenti, come pareti, travi e pilastri, ma anche agli attributi eterogenei, ovvero le proprietà meccaniche e fisiche, i costi di costruzione, il tempo di lavoro e molte altre informazioni. Il primo rilascio del formato IFC risale al 1996, IFC 1.0, ed è stato continuamente sviluppato fino al giorno d'oggi da BuildingSMART. Tra i software di modellazione BIM che possiedono la certificazione completa di esportazione e importazione di file IFC è presente Autodesk Revit.

3.4 Revit

Revit è un software BIM sviluppato dalla Revit Technologies Inc. ed acquistato nel 2002 dalla Autodesk. Si basa su una modellazione di tipo parametrico, consentendo all'utente di modificare il modello variando dei parametri. Questo software ha la capacità di riprodurre un modello in un modo molto simile alla realtà.

Attraverso Revit i progettisti possono avvalersi di uno strumento capace di gestire i progetti durante l'intero ciclo di vita dell'opera, seguendo per fasi i diversi livelli di dettaglio ed implementando il modello di tutte le informazioni necessarie secondo un approccio coordinato ed omogeneo.

Il programma è in grado di realizzare prospetti, sezioni, e viste tridimensionali in tempo reale; le modifiche che vengono fatte sul modello vengono automaticamente aggiornate in tutte le viste.

Il processo BIM non si ferma all'utilizzo di un singolo programma per la gestione del progetto, per questo risulta indispensabile il rapporto di condivisione del modello che viene realizzato con Autodesk Revit con gli altri tipi di software che possono entrare in gioco durante il ciclo di vita dell'opera. Un progetto basato su un approccio BIM può infatti essere arricchito di ulteriori livelli di dettaglio e di analisi attraverso l'ausilio di altri programmi, a seconda delle esigenze. Il dialogo tra i possibili programmi che il team di progetto può scegliere di utilizzare è quindi molto importante, a tal proposito Revit consente di esportare il modello in tantissimi formati, permettendo così la lettura delle informazioni presenti nel file anche su altri programmi, i quali possono rielaborarle al fine di realizzare ulteriori elaborati e dati di supporto al progetto.

3.4.1 Famiglie

Autodesk Revit contiene al suo interno delle categorie di oggetti, dette famiglie. Esse sono certamente una delle risorse più importanti del software e sono delle raccolte di tutti gli oggetti e gli elementi che si possono inserire in un progetto 2D e 3D. "Una famiglia è un gruppo di elementi con un gruppo di proprietà comuni, denominate parametri, e una rappresentazione grafica correlata" (Autodesk, 2022).

Il software presenta tre tipi di famiglie: famiglie di sistema, famiglie locali e famiglie caricabili.

Le famiglie di sistema sono in genere usate per creare elementi semplici, come ad esempio, muri, tetti, pavimenti, scale e possono essere inseriti dalla "Tab" di Architettura, Strut-



Fig. 3.6 Logo Autodesk Revit.
Fonte: autodesk.com

tura, Acciaio e Sistemi. La caratteristica principale di queste famiglie è che sono predefinite all'interno del software: non è possibile caricarle partendo da un file esterno o salvarle esternamente al progetto.

Le famiglie caricabili sono generalmente usate per creare componenti che vengono acquistati, sviluppati e installati all'interno o all'esterno dell'edificio, come finestre, porte e a causa della loro natura personalizzabile si possono utilizzare per modellare svariati oggetti. Queste famiglie sono create in file esterni ".rfa" e importati in ogni singolo file di progetto ".rvt". Autodesk Revit mette a disposizione una propria libreria nella quale è possibile selezionare e caricare queste famiglie.

Le famiglie locali sono elementi unici e vengono adottate quando è necessario disporre di un componente specifico nel progetto corrente. Per questo, esse vengono realizzate quando si presume di non riutilizzare l'elemento in altri progetti.

3.4.2 Facciate continue

All'interno del software Revit esiste la possibilità di realizzare delle facciate continue in maniera molto semplice. Vengono modellate mediante il comando "Muro architettonico", all'interno del quale si seleziona come proprietà specifica "Facciata continua Generico" (Fig. 3.7).

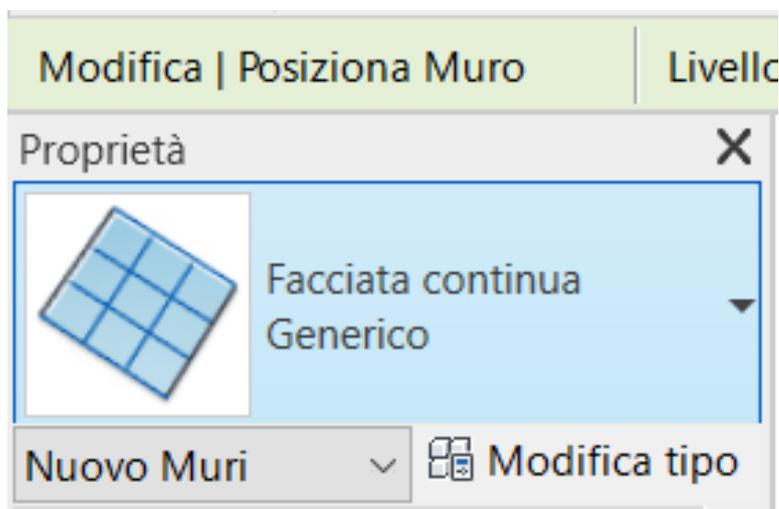


Fig. 3.7 Comando creazione facciata continua.

Cliccando su "Modifica tipo" è possibile variare alcuni parametri relativi alla costruzione, ai materiali, alla finitura, alle griglie, ai montanti e ai traversi (Fig. 3.8).

Inoltre è possibile effettuare dalle modifiche anche mediante i comandi "Sistema facciata continua", "Griglia facciata continua" e "Montante" (Fig. 3.9).

Questa procedura porta alla realizzazione di una facciata continua avente tutte le caratteristiche desiderate. Tuttavia ai fini della verifica del **comportamento strutturale** si evidenzia una fondamentale criticità.

Revit crea un modello esclusivamente architettonico e non strutturale. Tale situazione genera dei problemi nel momento in cui si vuole trasferire il **modello analitico** della facciata ad un software FEM per una eventuale analisi strutturale. Ai fini dunque della sperimentazione e degli obiettivi della tesi relativi alla realizzazione della prova sismica secondo normativa americana, come si vedrà nelle parti successive della medesima tesi, sarà neces-

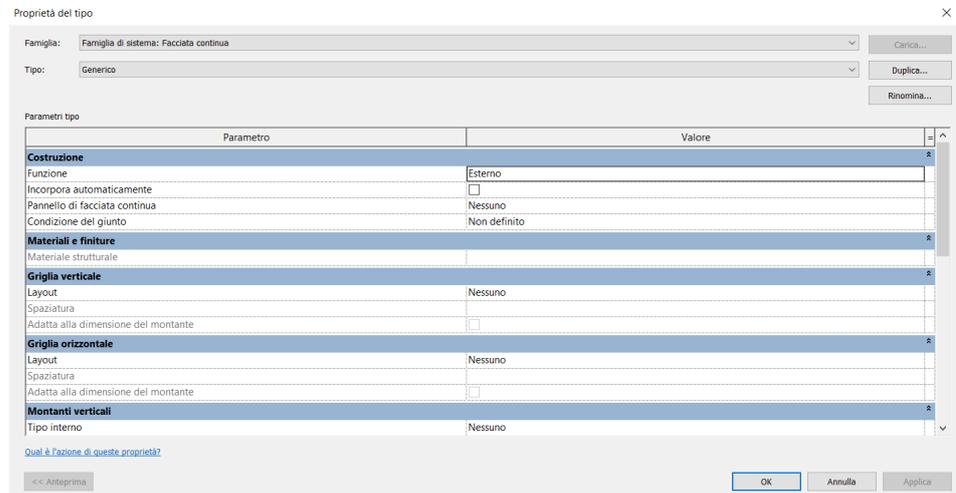


Fig. 3.8 Proprietà del tipo della facciata continua.

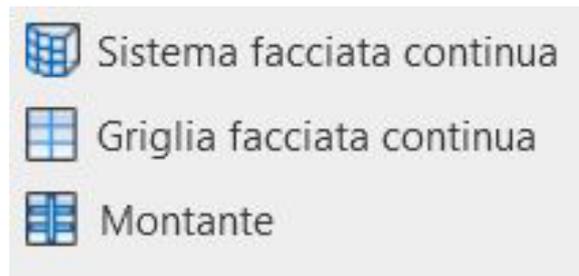


Fig. 3.9 Altri comandi per la modifica delle caratteristiche della facciata continua.

sario realizzare il modello della facciata continua in maniera diversa, utilizzando elementi che su Revit vengono considerati come strutturali. Questo permette di realizzare il modello analitico completo sul software di modellazione BIM e crea così la possibilità di trasferire l'intera facciata su un software FEM per l'**analisi strutturale** voluta, superando la criticità evidenziata precedentemente.

Ma cosa si intende per modello analitico? Autodesk rilascia una definizione: "Un modello analitico corrisponde ad una rappresentazione 3D semplificata della descrizione tecnica completa di un modello fisico strutturale. Il modello analitico è costituito da componenti strutturali, geometria, proprietà dei materiali e carichi che insieme formano un sistema di progettazione. Il modello analitico di una struttura include una serie di modelli analitici di elementi strutturali, uno per ogni elemento della struttura [...] Il modello viene creato automaticamente durante la generazione del modello fisico e può essere esportato in applicazioni di analisi e progettazione." (Autodesk, 2022). Il modello analitico non è altro che una riduzione del modello architettonico schematizzando ad esempio gli elementi lineari, quali travi e pilastri, tramite aste legate a due nodi di estremità.

3.5 Il BIM e l'interoperabilità

L'interoperabilità, definita come l'abilità di due sistemi di scambiarsi informazioni, è un concetto complesso ed è ormai alla base dello sviluppo della metodologia BIM (Eastman, C., 2011). Lo scambio di informazioni avviene in due modi differenti, entrambi mono o bidirezionali:

- Collegamenti diretti tra piattaforme proprietarie di formati;
- Collegamenti tramite formati di scambio pubblici.

Il più comune ed utilizzato di questi formati in ambito BIM, come detto in precedenza, è quello IFC.

L'estensione IFC ha due livelli principali: estensione dei concetti IFC ed estensione del dominio IFC. Nel primo caso, i concetti possono essere classificati in tre categorie principali: concetti presenti in un modello IFC, non presenti in un modello IFC e concetti di nuova introduzione (Wan et al., 2004). Ad esempio, nell'analisi strutturale, le condizioni al contorno (vincoli e rilasci degli elementi del telaio) sono solitamente aggiunte manualmente ad un modello IFC esistente e devono essere compatibili con le informazioni presenti nel modello stesso. È importante aggiungere nuovi concetti ad un modello IFC senza causare conflitti con le informazioni esistenti del modello. Lee e Kim (2011) hanno proposto l'inserimento di "IfcSpatialElement" come sotto concetto di "IfcElement" per rappresentare gli elementi spaziali nelle strutture dei ponti. Questa aggiunta ha consentito di rappresentare gli elementi spaziali sempre nel contesto di un ponte con maggiore chiarezza, senza andare in conflitto con le altre parti esistenti del ponte. Markova, Dieckmann e Russel (2013) hanno esteso lo schema IFC mediante l'aggiunta dei concetti di "simulazioni", "documentazione", e "ottimizzazione" nella sezione dei materiali. Amann et al. (2015) hanno, invece, aggiunto l'elemento "IfcReferenceCurveAlignment2D" relativo ad una curva di allineamento orizzontale e verticale per la progettazione stradale.

Invece, l'estensione del dominio IFC richiede la comprensione da parte degli utenti di: (1) quali informazioni di input sono necessarie in questo dominio e (2) come minimizzare i potenziali conflitti tra l'estensione e le definizioni già esistenti. Zhang e El-Gohary (2016) hanno esteso il supporto IFC dalla progettazione architettonica alla verifica della conformità alle norme edilizie attraverso metodi di estensione IFC semi-automatici.

File IFC ben analizzati e le loro estensioni potrebbero contribuire ad ampliare la copertura delle informazioni BIM per migliorarne l'interoperabilità.

Una ulteriore distinzione generale dell'interoperabilità viene fatta in base al percorso del flusso di lavoro dell'utente. L'interoperabilità orizzontale è definita come uno scambio di dati tra due ambienti software BIM dello stesso tipo, come il percorso da CAD a CAD. L'interoperabilità verticale, invece, si riferisce a uno scambio di dati tra ambienti software architettonici e strutturali, come il percorso CAD-CAE.

In questa ricerca l'interoperabilità assume un ruolo fondamentale. Dal modello vengono trasferite le specifiche porzioni che interessano di volta in volta la specifica disciplina. In un'analisi strutturale, è chiaro che sarà esportato esclusivamente il sistema resistente oggetto di analisi.

L'esportazione di un modello BIM per l'analisi strutturale coinvolge la definizione di tutta una serie di parametri come comportamento strutturale, posizione degli elementi, caratteristiche fisiche e chimiche degli elementi, vincoli esterni e condizioni di carico. La sfida sta nel rendere questo trasferimento automatico e non manuale in seguito alle analisi, senza rendere incoerenti i modelli tra di loro.

È importante verificare che il trasferimento degli elementi strutturali tra il BIM e il software strutturale avvenga in maniera corretta. Per cui risulta necessario effettuare un controllo sulla posizione e sui collegamenti tra gli elementi una volta che il modello è stato importato sul software strutturale. Tuttavia tale trasferimento non è così semplice ed immediato. Come descritto precedentemente, la realizzazione dell'involucro edilizio su Revit mediante il comando "Facciata continua generico" crea esclusivamente elementi architettonici, che non vengono rilevati dal software strutturale, e di conseguenza viene trascurata la presenza di eventuali montanti e traversi. Si può ovviare a questo problema mediante delle

soluzioni pratiche, realizzando i montanti ed i traversi, ed i pannelli come se fossero rispettivamente delle travi strutturali (beam) e degli elementi "shell".

Risulta indispensabile fornire alcune problematiche/lacune relative all'interoperabilità architettonica-strutturale attraverso il formato di scambio IFC.

3.5.1 Scelta del software di calcolo FEM

Nella prima fase della scelta del software di calcolo strutturale sono stati considerati alcuni aspetti chiave:

- Collegamento diretto all'interno di Autodesk stesso: questo rende più semplice la comunicazione tra il software di modellazione BIM e quello strutturale;
- Collegamento mediante file IFC: permette lo scambio di informazioni e quindi di modelli tra software di ditte diverse;
- Affidabilità del software di calcolo: deve garantire l'accuratezza dei calcoli e deve essere un programma versatile, atto a diverse prove in ambito strutturale;
- Velocità di calcolo: anche i tempi di calcolo di modellazione sono un aspetto importante nella scelta di un software;
- Presenza di normative italiane, europee ed americane e principali normative internazionali.

Visti e presi in considerazione i cinque punti riportati precedentemente, diversi software di calcolo sono stati confrontati tra loro. La scelta è ricaduta principalmente su due: Robot Structural Analysis e Sap2000. Il primo garantisce una integrazione diretta tra il software di modellazione BIM e quello strutturale; mentre su Sap2000 lo scambio di informazioni avviene tramite formato IFC.

Robot Structural Analysis

Robot Structural Analysis è un software di calcolo facente parte di Autodesk, per cui rappresenta il più alto livello di interoperabilità. Il trasferimento del modello avviene tramite dei semplici passaggi. La fase preliminare prevede la verifica dell'omogeneità analitica del modello in BIM che garantisce sulla stabilità della struttura. Una volta eseguita questa verifica, il modello è pronto per essere trasferito al software di analisi strutturale Robot, mediante i comandi mostrati in figura 3.10.

Il programma fornisce la possibilità di realizzare tutte le analisi sismiche presenti nelle differenti normative (analisi statiche e dinamiche, lineari e non lineari). In particolare, da la possibilità di inserire manualmente una storia temporale, descrittiva del terremoto, mediante il comando "Analisi Time History". Per poter far ciò è necessario prematuramente effettuare un'analisi modale (Fig. 3.11 - Fig. 3.12). Sono state qui di seguito descritte le varie fasi funzionali all'applicazione del "crescendo test" della normativa Americana AAMA 501.6-09.

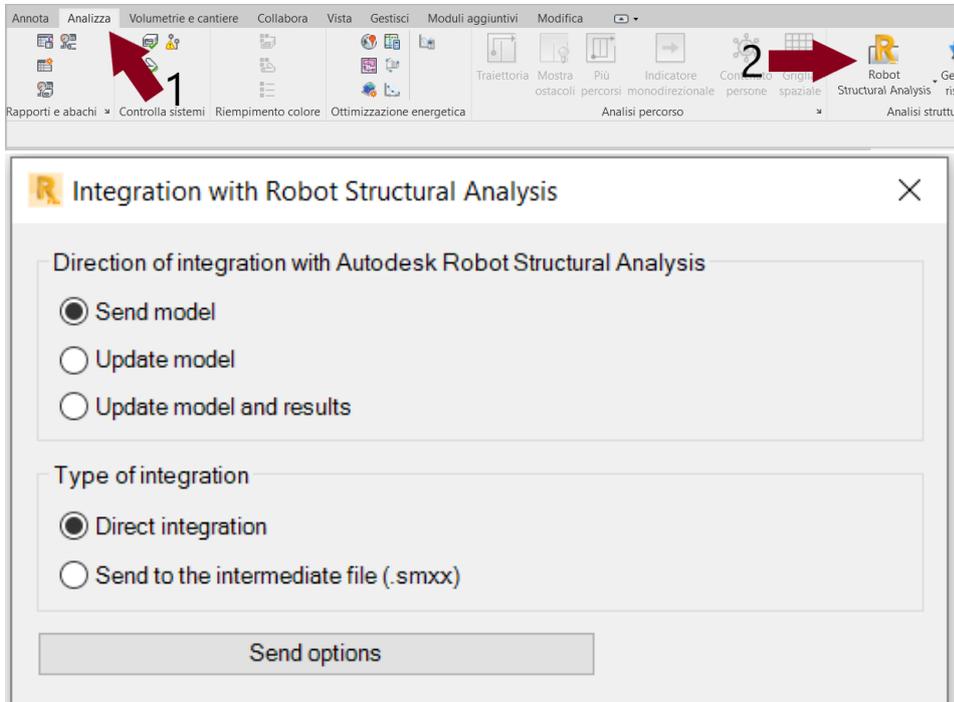


Fig. 3.10 Procedura invio modello da Revit a Robot.

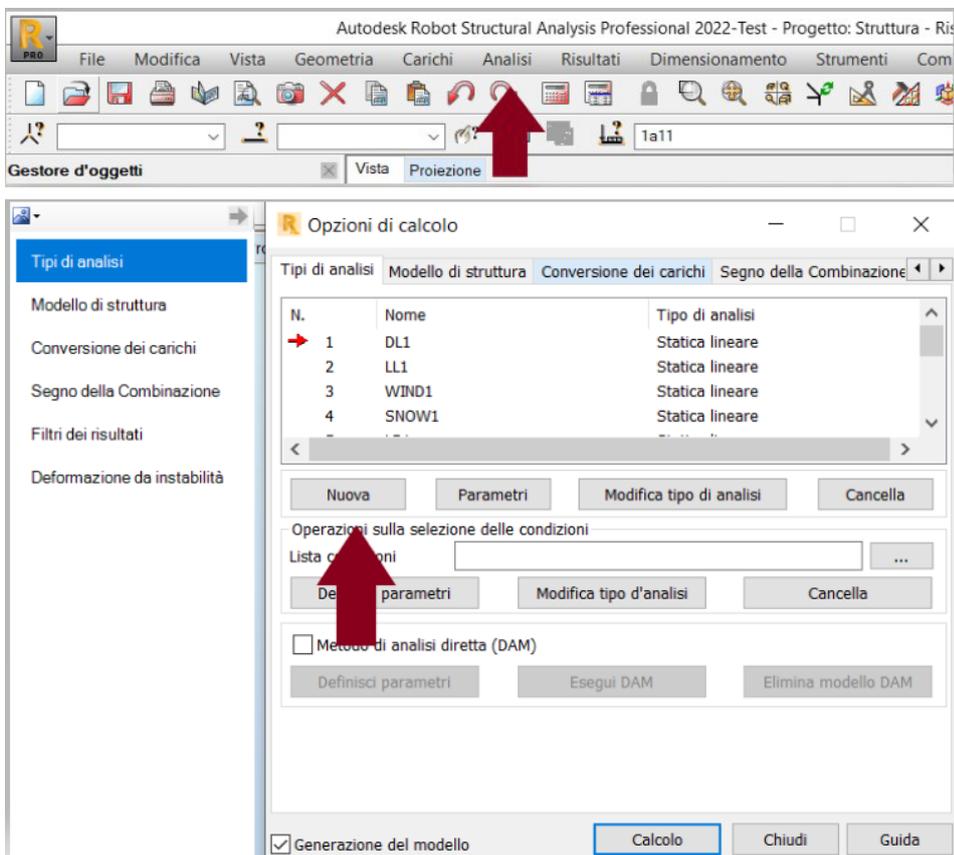
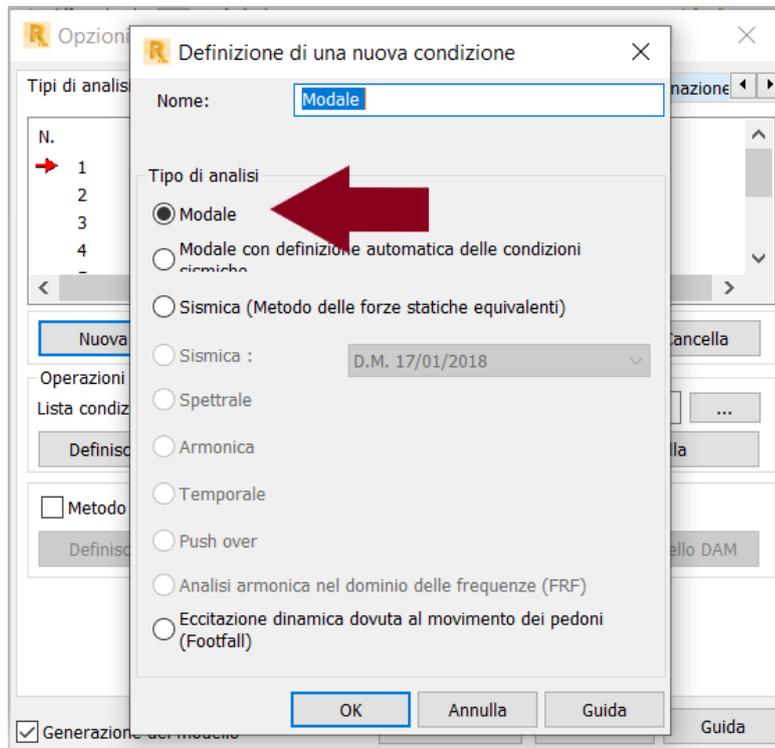


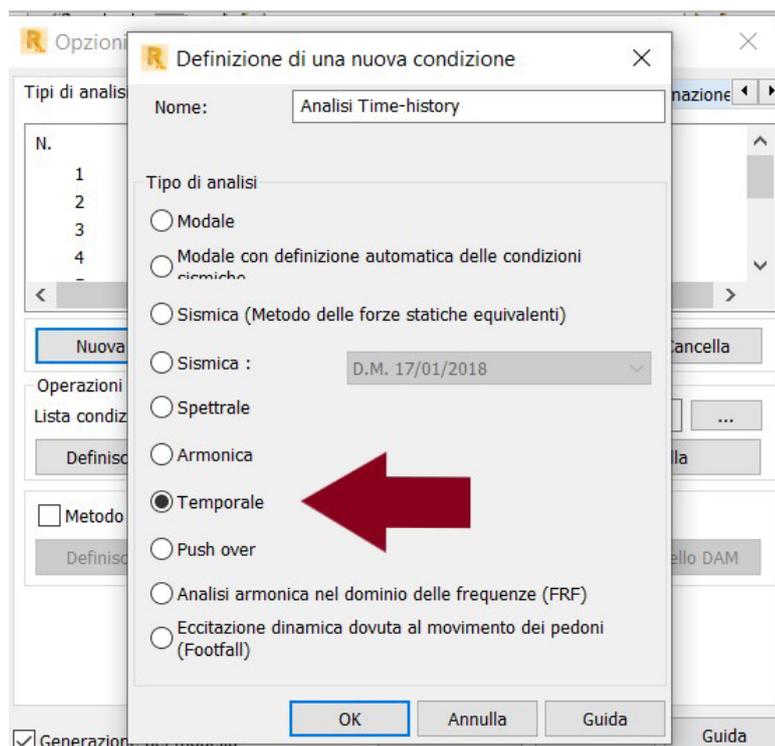
Fig. 3.11 Primo step procedura analisi modale su Robot Structural Analysis.

Fig. 3.12 Secondo step procedura analisi modale su Robot Structural Analysis.



Una volta eseguita la condizione di analisi modale è possibile effettuare quella "Temporale" (Fig. 3.13).

Fig. 3.13 Procedura analisi temporale su Robot Structural Analysis.



A questo punto è possibile definire una qualunque funzione, rappresentativa della storia temporale da applicare al modello strutturale importato da Revit. Il programma fornisce diverse modalità di inserimento della funzione del tempo:

- dal programma stesso per punti (Fig. 3.14);
- mediante espressione matematica;
- importando un file .dat

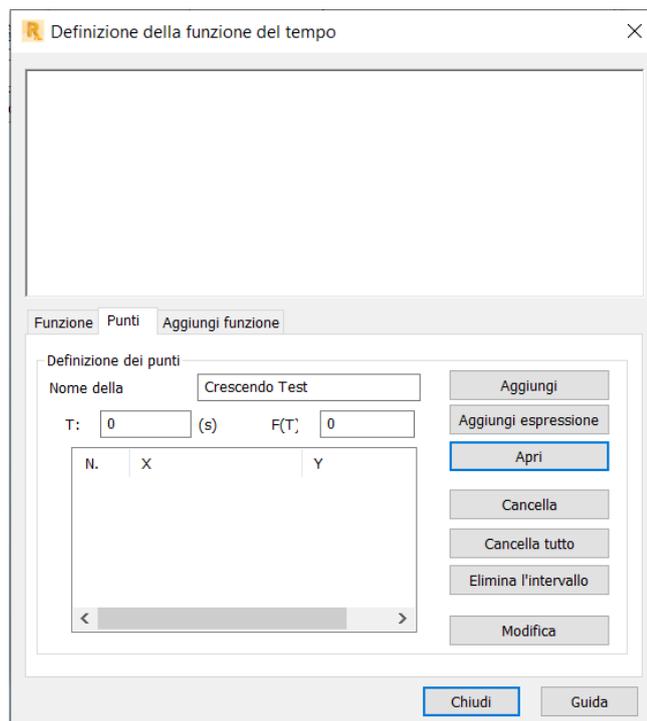


Fig. 3.14 Definizione della funzione del tempo per punti su Robot Structural Analysis.

Ad esempio (Fig. 3.15) è stata importata la storia temporale del terremoto di El Centro del 1900.

Sap2000

Sap2000 è un programma di calcolo agli elementi finiti prodotto da Computers and Structures Inc. di Walnut Creek, California. Grazie alla sua grande versatilità, permette la progettazione e la verifica di strutture con caratteristiche molto diverse tra loro, che siano di bassa, media od elevata complessità. Le fasi di modellazione, analisi e verifica sono integrate in un unico ambiente grafico ad oggetti che rende l'utilizzo del programma intuitivo e di facile apprendimento. "Anche i modelli più complessi possono essere creati in modo semplice, partendo da template predefiniti e sfruttando specifici strumenti di disegno e meshing. Comandi dedicati consentono l'applicazione automatica dei carichi (vento, sisma, moto ondoso) e la progettazione degli elementi in accordo alle norme italiane, europee, americane ed alle principali normative internazionali. La sua semplicità d'uso consente di sfruttare la potenza di SAP2000 per qualunque attività, dai grandi progetti ai più piccoli problemi di natura quotidiana, rendendolo il programma di calcolo strutturale più efficace e produttivo sul mercato." (Sap2000, versione 24).

Dal punto di vista dell'interoperabilità con i software di modellazione BIM, Sap2000 ha la possibilità di immagazzinare modelli ed informazioni mediante diverse tipologie di forma-

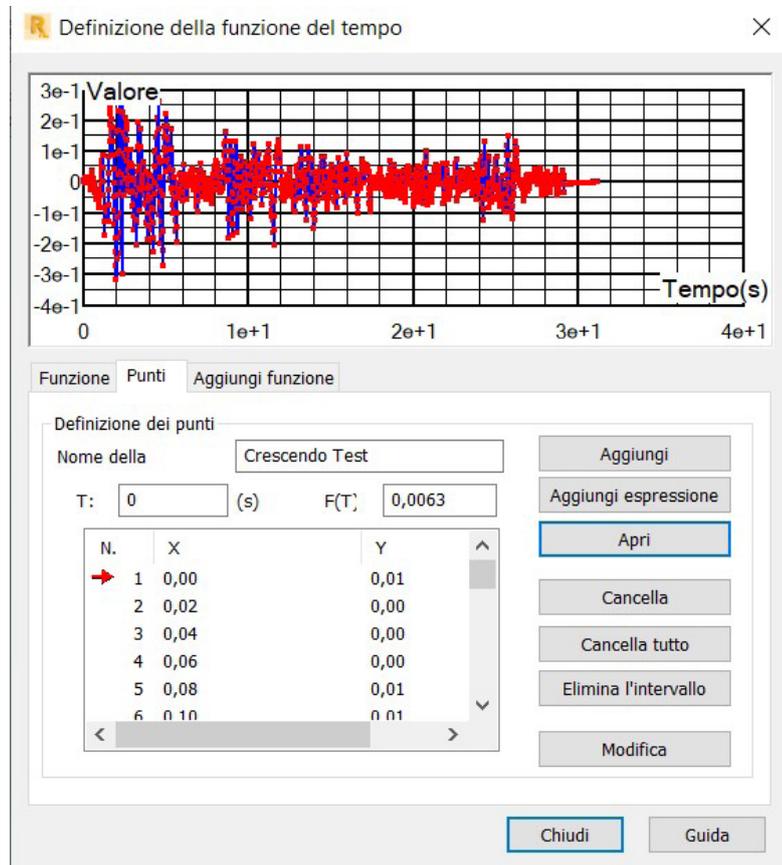


Fig. 3.15 Definizione della forzante del terremoto di El Centro del 1900 su Robot Structural Analysis.

to, tra cui IFC. Questo rende elevata l'interoperabilità con Revit; e nonostante alcuni test condotti inizialmente sul software Robot Structural Analysis, la scelta è ricaduta sull'utilizzo di Sap2000 grazie alla sua estrema versatilità e potenza di calcolo.



Fig. 3.15 Logo Sap2000.
Fonte: <https://www.ideastatica.com/it/bim/sap2000steel>

In tale caso la procedura per applicare la storia temporale del "crescendo test" è leggermente differente rispetto al software descritto precedentemente. Inizialmente, come mostrato nelle figure 3.16 - 3.17 è definito un caso di carico (ad esempio spostamento). Successivamente è assegnato uno spostamento unitario al nodo in cui deve essere applicata la forzante (storia temporale del crescendo test). Nelle figure 3.18 - 3.19 è definita la funzione "Time History"; ed infine, figura 3.20, è assegnato un caso di analisi sempre relativo alla "Time History". Si seleziona il tipo di analisi da condurre, se lineare o non lineare. A questo punto si sceglie il caso di carico definito inizialmente (spostamento) e la funzione importata precedentemente (crescendo test).

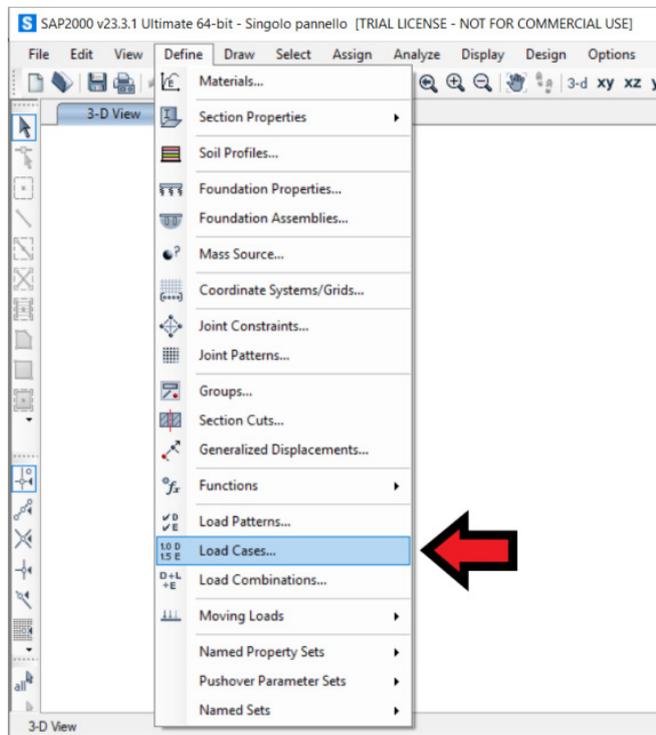


Fig. 3.16 Primo step definizione di caso di carico su Sap2000.

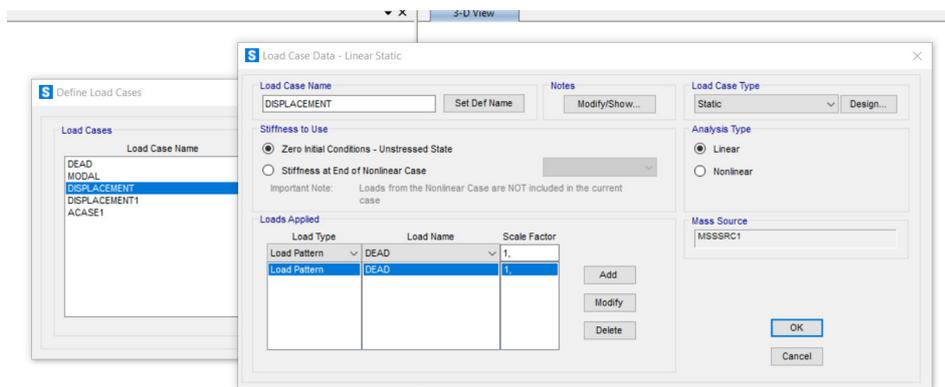


Fig. 3.17 Secondo step definizione di caso di carico su Sap2000.

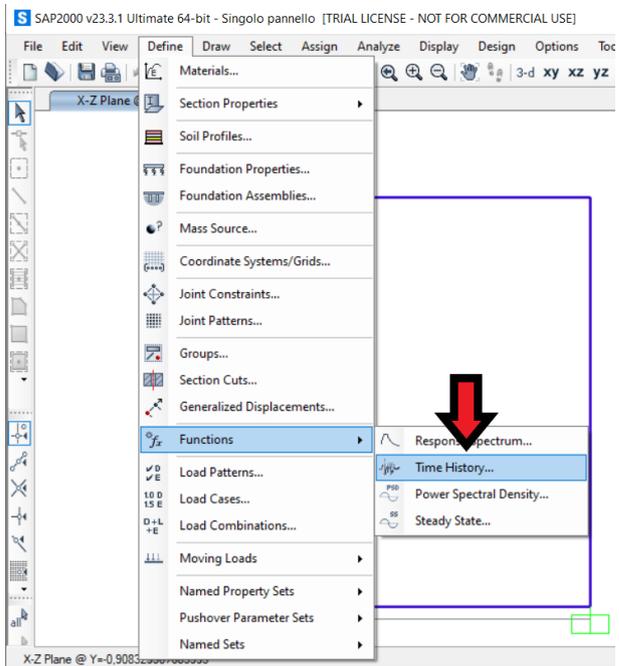


Fig. 3.18 Primo step definizione della funzione Time History su Sap2000.

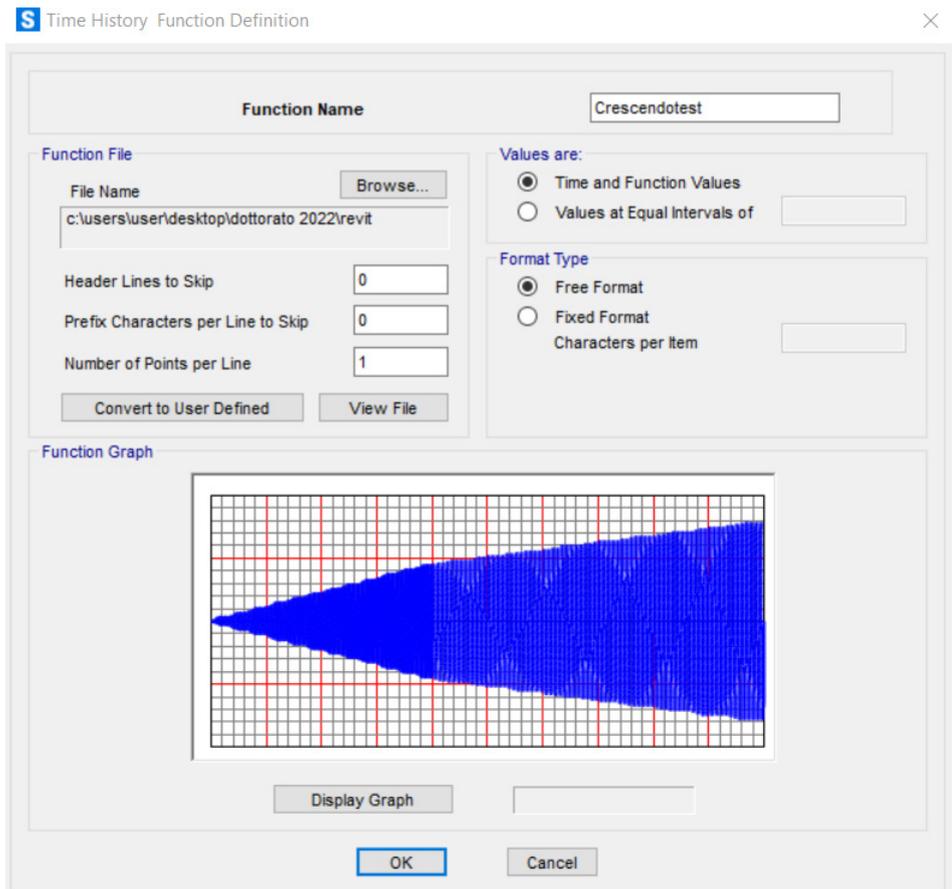


Fig. 3.19 Secondo step definizione della funzione Time History su Sap2000.

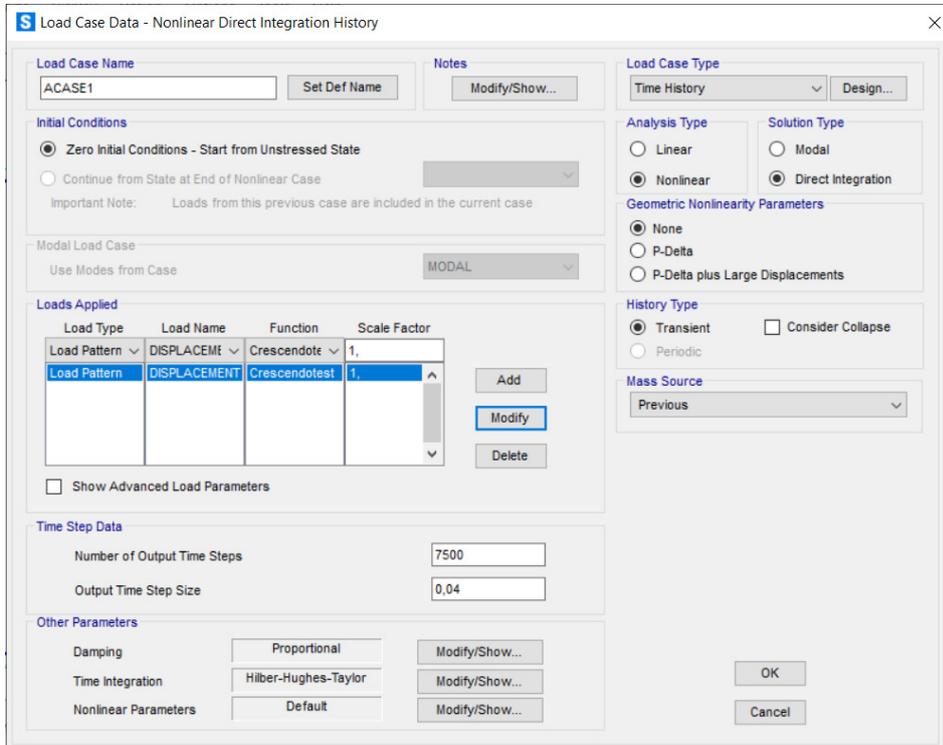


Fig. 3.20 Definizione caso di analisi Time History su Sap2000.

Come detto in precedenza non tutti gli elementi vengono trasferiti da Revit a Sap2000, in tabella 3.9 è stata riportata una tabella contenente le entità IFC che vengono importate e non, con eventuali limitazioni.

Entità IFC	Importata	Restrizioni
lfcBeam		Imported if it has a 'Body' shape representation with a 'SweptSolid' representation type and an lfc-SweptAreaSolid; or if it has an 'Axis' shape with a 'Curve3D' representation type and an lfcBoundedCurve. The end points typically require adjustment by the user as they are at the face of the support – wall, column, or girder. Always imported as a straight line.
lfcColumn		Imported if it has a 'Body' shape representation with a 'SweptSolid' representation type and an lfc-SweptAreaSolid; or if it has an 'Axis' shape with a 'Curve3D' representation type and an lfcBoundedCurve. Always imported as a straight line.

IfcCurtain Wall		IfcColumn
IfcPlate		
IfcRoof		
IfcSlab		Imported if it has a 'Body' shape representation with a 'SweptSolid' representation type and an IfcSweptAreaSolid; or if it has an 'Axis' shape with a 'Curve3D' representation type and an IfcBoundedCurve. Always imported as a straight line.
IfcWall		
IfcMaterial		
IfcSectionProperties		

Tab. 3.9 Alcune entità IFC che vengono riportate e non, con eventuali limitazioni.

Pertanto, quando un modello IFC viene esportato da un software e importato in un altro, alcune informazioni possono mancare o diventare irrintracciabili. Ridefinire manualmente le informazioni richiede molto tempo ed è soggetto ad errori umani. Tuttavia, senza una completa interoperabilità non è possibile evitare questi inserimenti/correzioni manuali.



Fig. 3.21 Schema interoperabilità Autodesk Revit con Sap2000.

3.6 Il BIM per prove strutturali

Gli involucri sono degli elementi che interagiscono con la struttura principale, sia in termini di carichi trasferiti che di deformazioni da accomodare. La facciata continua deve essere progettata adeguatamente per resistere a carichi dinamici, quali sisma, vento ed urto. Il maggior pericolo di una facciata, durante un evento di quelli descritti precedentemente, è la rottura del vetro con conseguente caduta dei frammenti che possono ferire persone o danneggiare beni posti nelle vicinanze. Tra l'altro le facciate continue, durante il loro ciclo di vita, sono soggette a fenomeni di degrado e decadimento prestazionale. Le cause possono essere molteplici e dipendono soprattutto dalle condizioni ambientali e climatiche, dal naturale invecchiamento dei materiali, dagli stress subiti durante la fase di esercizio, ecc. Con l'avvento dell'Industria 4.0 si è passati da una progettazione e produzione tradizionale ad una innovativa. La digitalizzazione cambia radicalmente il modo in cui gli edifici vengono progettati, costruiti, utilizzati e, in ultima analisi, gestiti. Questa trasformazione porta le strutture a nuovi livelli di efficienza, sicurezza e comfort. Gli edifici, inoltre, rispondono in modo intelligente ai loro ambienti grazie a dei sensori installati in tutto il complesso e all'analisi completa dei dati raccolti. In questo contesto la realizzazione di un gemello digitale, di edifici o elementi di esso, per esempio le facciate continue, permette di immagazzinare

all'interno del modello informazioni di ogni genere (dalle caratteristiche meccaniche e fisiche dei materiali, fino alle aziende produttrici dei vari elementi).

Al fine di garantire una maggiore sicurezza, visti i problemi a cui sono soggetti gli involucri, è possibile restituire un modello digitalizzato della facciata, operando successivamente su due livelli:

1. simulare digitalmente le prove di resistenza che vengono effettuate in laboratorio;
2. monitorare in tempo reale le condizioni dell'involucro e poter agire tempestivamente in caso di eventuali problemi.

Infatti, è noto quanto siano dispendiose, sia in termini di costi che di risorse umane, le attività necessarie alla restituzione del quadro di degrado di un edificio esistente o anche di un involucro. È necessario, prima di ogni intervento, una fase di indagine ben dettagliata con rilievi in sito. Il gemello digitale, attraverso una modellazione BIM, può intervenire come alternativa alle procedure tradizionali per la gestione informatizzata del danno dovuto al sisma, al vento o all'urto, allo scopo di ridurre i tempi e i costi associati alle prove da effettuare in laboratorio su nuovi involucri e alle attività di verifica di un quadro fessurativo e di progettazione di interventi per una facciata esistente.

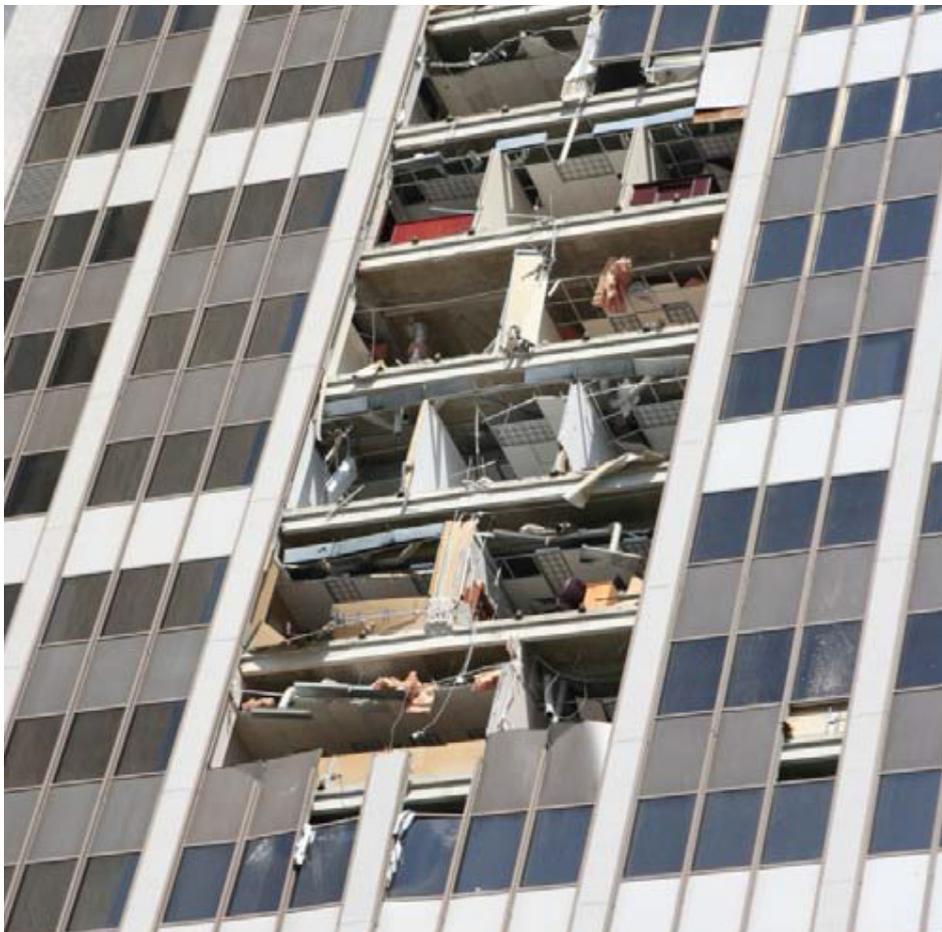


Fig. 3.22 Fotografia del crollo di una facciata continua.
Fonte: Bui, N., Merschbrock, C., Munkvold, B. E., 2016.

3.7 Il BIM per prove ambientali/tecnologiche

Gli involucri edilizi giocano un ruolo fondamentale nella costruzione e nella progettazione degli edifici, specialmente quando si considerano gli obiettivi riguardanti la sostenibilità. L'involucro rappresenta la maggior parte del consumo di energia e rappresenta una voce di costo importante nel valore totale di un edificio. A seconda delle condizioni esterne (in termini di condizioni climatiche, di rumore, di carichi), le facciate degli edifici influenzano e modificano le condizioni interne, tra cui temperatura, livello sonoro, luce, aria, rapporto visivo tra esterno ed interno. Sotto questo punto di vista gli involucri edilizi fanno parte di un'area di ricerca sempre più rilevante, in quanto svolgono un ruolo chiave ai fini della determinazione della prestazione energetica globale dell'edificio.

Le prime fasi di progettazioni hanno dimostrato di avere un ruolo primario nell'impatto sui costi, sui tempi e sulla manutenzione. Tuttavia è difficile fornire una visione completa delle scelte e delle soluzioni in questa fase, a causa della limitata quantità di informazioni disponibili. Ciò che può fornire aiuto è una modellazione BIM dell'involucro edilizio, che possa così contenere tutte quelle informazioni riguardanti l'efficienza energetica e le prove ambientali al quale viene sottoposta la facciata. Questo permetterebbe una facile acquisizione dei dati necessari per una stima ed un'analisi su tutti quei fattori che influenzano la sostenibilità ambientale, al fine di minimizzare i costi e massimizzare al tempo stesso l'efficienza dell'involucro.



Fig. 3.23 Prova dinamica di penetrazione dell'acqua AAMA 501.1-05. Fonte: Ilter, E., Tavil, A., Celik, O.C., 2015.

Riferimenti bibliografici

Airoldi Metalli S.P.A., Scheda prodotto alluminio lega EN AW 6060

Amann, J., Singer, D., and Borrmann, A., *Extension of the upcoming IFC alignment standard with cross sections for road design*, (2015).

Autodesk, *Integrating Autodesk Revit, Revit Structure, and Robot Structural Analysis Professional*, 2014 (29 pages).

Bhusad, A. A., Akhare, A. R., *Application of BIM in Structural Engineering*, SSRG International Journal of Civil Engineering, volume 1 Issue 5 October 2014, (7 pages).

Bui, N., Merschbrock, C., Munkvold, B. E., *A review of Building Information Modelling for construction in developing countries*, Procedia Engineering 164, (2016) 487-494.

Cardani, G., Angjeliu, G., *Considerazioni sull'interoperabilità tra modelli BIM e l'analisi strutturale degli edifici storici*, Built Heritage Information Modelling/Management BHIMM PRIN 2010-2011, (7 pages).

Dawood, N., Kassem, M., *BIM for facility management: a review and a case study investigating the value and challenges*, Proceedings of the 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality, 30-31 October 2013.

De Gaetani, C. I, Mert, M., Migliaccio, F., *Interoperability Analyses of BIM Platforms for Construction Management*, applied sciences, 27 June 2020, (15 pages).

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K., Wiley, J. et al, *A guide to Building Information modeling for owners, managers, designers, enengineers and contractors*, Bim Handbook, Secondaz Edizione 2011.

Gerbino, S., Cieri, L., Rainieri, C., Fabbrocino, G., *On BIM Interoperability via the IFC Standard: An Assessment from the Structural Engineering and Design Viewpoint*, Applied Sciences, 2021, 11, 11430 (25 pages).

Huang, C., *Application of BIM Technology Based on Autodesk Revit in Construction and Installation Engineering*, Advances in Social Science, Education and Humanities Research, volume 119 (4 pages).

Ilter, E., Tavil, A., Celik, O.C., *Full-scale performance testing and evaluation of unitized curtain walls*, Journal of Facade Design and Engineering 3, (2015) 39-47.

Istituto per le Tecnologie della Costruzione, Relazione tecnica, Facciata continua in alluminio a montanti e traversi, denominata "Poliedra SKY 50", 2017.

Lee, S. H., and Kim, B. G., *IFC extension for road structure and digital modeling*, Procedia Engineering, 14(2011), 1037-1042.

Markova, S., Dieckmann, A., and Russell, P., *Custom IFC material extension*, Proc., 18th Int. Conf. on Compt.-Aided Archi. Desi. Research in Asia, Hong Kong. p13-22 (2013).

Metra Building, Catalogo facciate continue, 2022.

Ren, R., Zhang, J., Dib, H. N., *Bim interoperability for structural analysis*, Proc., ASCE Construction Research Congress, ASCE, Reston, VA, 470-479 (2018).

Wan, C., Chen, P., and Tiong, R. L. K., *Assessment of IFCs for structural analysis domain*, J., Information Technology in Construction, 9 (2004).

Warner, S. A., *Test methods for performance of glazing systems and exterior walls during earthquakes and extreme climatic events*, Civil and Structural Engineering, (2009) pages 232-251.

William, F., *The Importance of BIM in Structural in Structural Engineering, The Greatest Change in Over a Century*, Structure magazine, (2008).

Zhang, J., and El-Gohary, N., *Extending building information models semi-automatically using natural language processing techniques*, J. Comput. in Civ. Eng., 30(5), 2016.

Zotkin, S. P., Ignatova, E. V., Zotkina, I. A., *The Organization of Autodesk Revit Software Interaction with Applications for Structural Analysis*, Procedia Engineering 153, (2016) 915-919.

Riferimenti sitografici

Autodesk, *Revit: software BIM per progettisti, costruttori e responsabili*, <https://www.autodesk.it/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Autodesk, *Robot Structural Analysis*, <https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

CSI italia srl, *Sap2000 software di analisi strutturale*, <https://www.csi-italia.eu/software/sap2000/>

IDEA StatiCa, *Sap2000 Steel*, <https://www.ideastatica.com/it/bim/sap2000steel>

Istituto per le tecnologie della costruzione, *Missione*, <https://www.cnr.it/istituto/101/istituto-per-le-tecnologie-della-costruzione-itc>

Verifica e sperimentazioni

Chapter 4 proposes the applicative and "experimental" part of the research.. Two models were realized through Autodesk Revit: (i) the first one concerning the building envelope by means of which the laboratory test will be simulated; (ii) the second one instead referred to the three-dimensional model of the existing envelope, which will be subjected to the digital verification of the test.

The models made on Autodesk Revit in BIM subsequently were transferred to the structural analysis software Sap2000 in order to simulate the dynamic seismic test according to American standard (AAMA 501.6-09). The simulation of that test on the existing façade was compared with that of the digitized test on an envelope reproducing the same laboratory characteristics.

In addition, these two cases are joined by a third one, that of the test carried out at the CNR ITC laboratory. This choice allows further comparison of the first two cases with the test carried out at the CNR laboratory on the off-site facade.

In summary, the three studies developed and analyzed allow for a critical cross-reading between the new, the existing and the outcomes of the tests conducted in the laboratory.

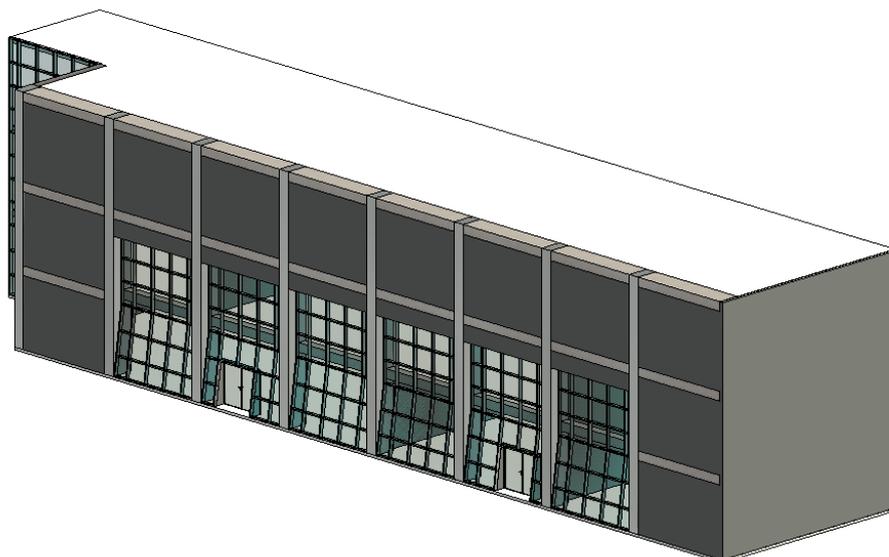


Fig. 4.1 Modello tridimensionale architettonico facciata Sud del plesso di Architettura.

4.1 Simulazioni e verifiche prestazionali digitali che emulano il laboratorio

Il primo dei tre casi presi in esame in questo studio riproduce esattamente il test che viene realizzato in laboratorio, replicando le stesse modalità e le stesse condizioni di quest'ultimo. Si è scelto di digitalizzare la prova sismica dinamica AAMA 501.6-09 secondo normativa Americana, e di sottoporre tale test ad una facciata in montanti e traversi che riproduca perfettamente le stesse caratteristiche del laboratorio. A tale scopo, avendo già a disposizione i risultati del test applicato alla facciata Metra "Poliedra Sky 50", è stata digitalizzata la prova su tale involucro. È stato inizialmente realizzato il modello BIM della facciata su Autodesk Revit, successivamente è stato trasferito sul software di analisi strutturale Sap2000, ed infine è stata applicata la prova sismica dinamica AAMA 501.6-09.

4.1.1 Realizzazione modello BIM

La prima fase ha previsto la realizzazione del modello BIM della facciata Poliedra Sky 50. L'involucro è formato da 16 pannelli in vetro di dimensioni pari a 1.345 m x 1.950 m. È una facciata continua a montanti e traversi, formata da profilati di montanti da 175 mm e traversi da 174 mm. In laboratorio la facciata viene montata su un sistema di tre travi poste rispettivamente alle altezze di 0.40 m, 3.70 m, 7.10 m.

Nel modello BIM sono state inserite tutte le informazioni necessarie al fine di riprodurre al meglio l'involucro edilizio. Inizialmente sono state definiti i materiali e le geometrie degli elementi. Successivamente è stato realizzato il telaio di montanti e traversi, modellati rispettivamente come pilastri e travi. Infine sono state modellate le travi "sismiche" presenti in laboratorio; in particolare quella inferiore, fissa, e quelle intermedia e superiore, invece mobili, le quali, come si vedrà, saranno sottoposte a degli spostamenti in funzione del tempo secondo normativa Americana.

Successivamente è stato inserito il pannello di vetro per ogni modulo presente nella facciata.

Infine, il modello realizzato è stato sottoposto ad una verifica dell'omogeneità analitica (Fig. 4.2).

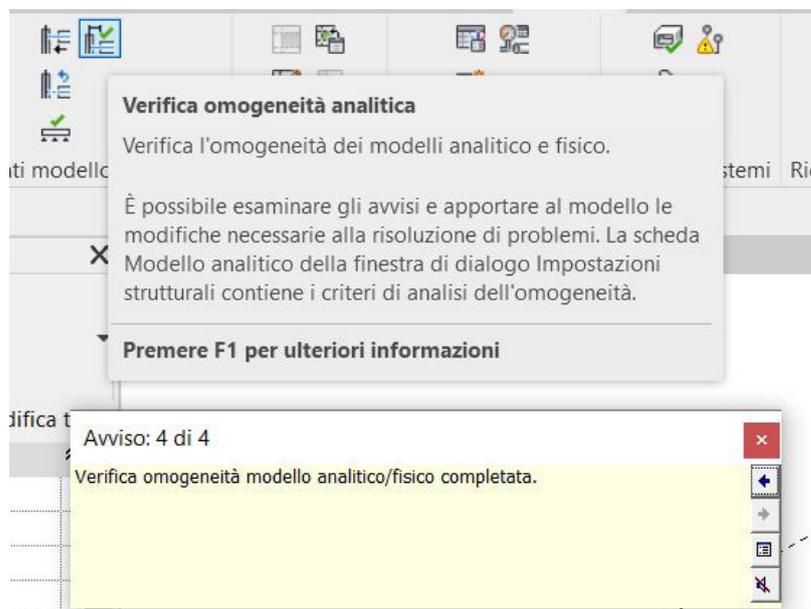


Fig. 4.2 Verifica omogeneità analitica Autodesk Revit.

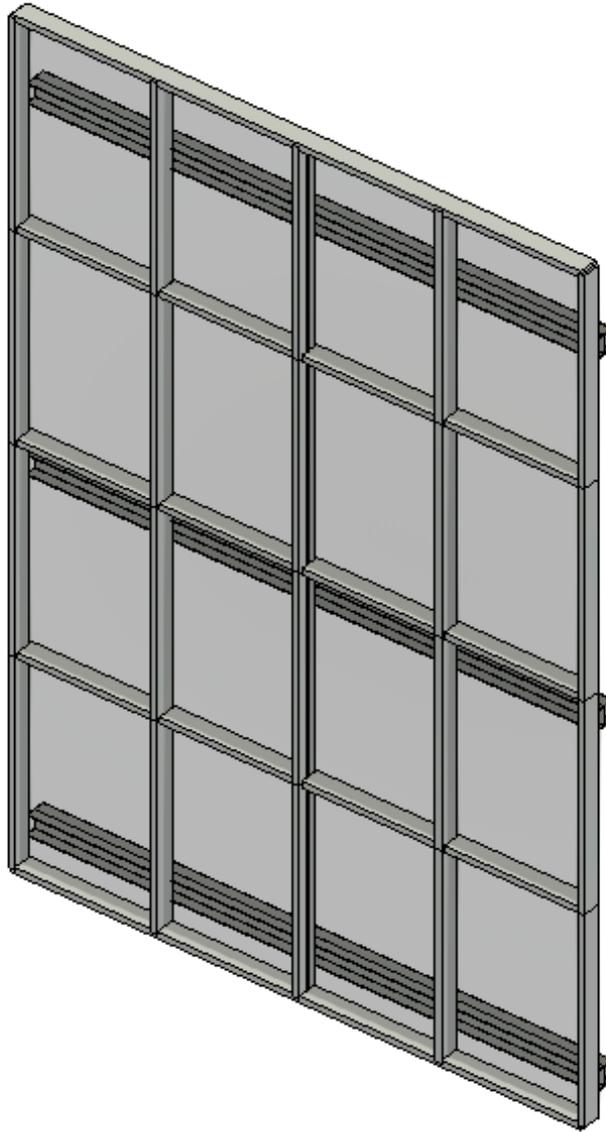


Fig. 4.3 Modello tridimensionale architettonico facciata continua Poliedra Sky 50 su Autodesk Revit.

Una volta superato tale controllo è stato salvato come file IFC, per poi essere trasferito al software di analisi strutturale.

In figura 4.3 è raffigurato il modello tridimensionale architettonico della facciata continua realizzato su Autodesk Revit.

Mentre in figura 4.4 è stato riportato il modello tridimensionale strutturale della facciata continua sempre realizzato su Autodesk Revit.

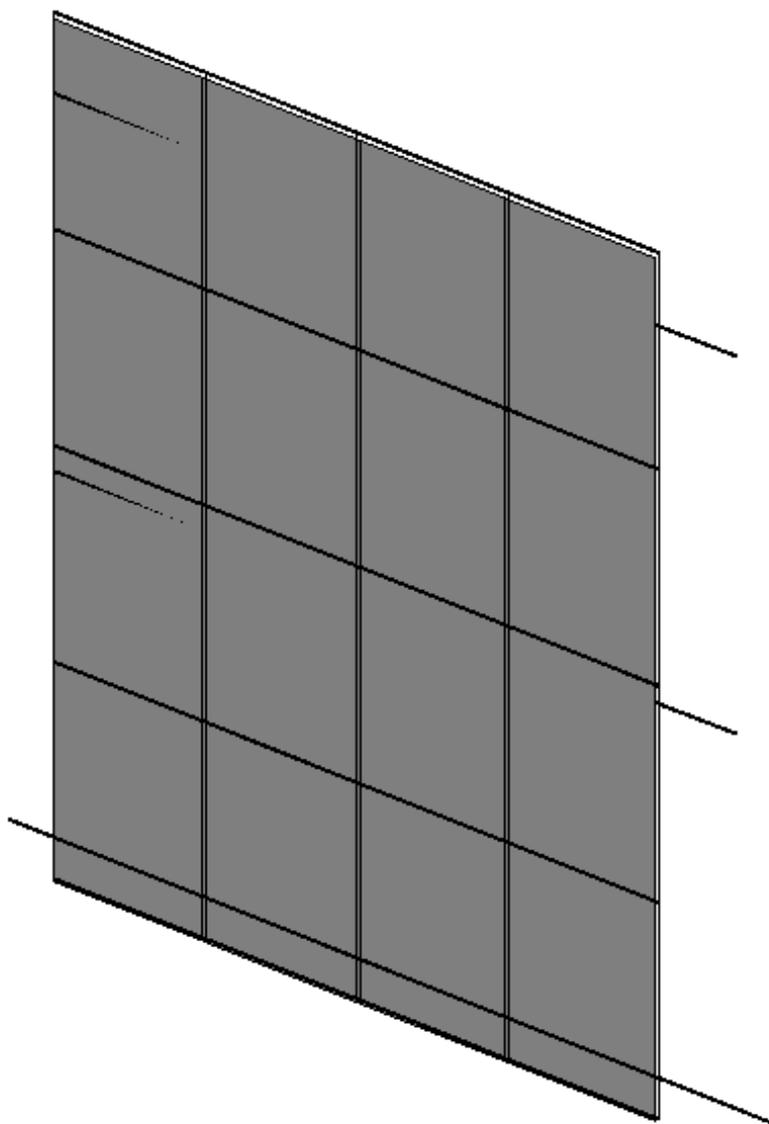


Fig. 4.4 Modello tridimensionale strutturale della facciata continua Poliedra Sky 50 su Autodesk Revit.

4.1.2 Realizzazione modello FEM

Il modello FEM dell'involucro edilizio è stato realizzato mediante il seguente iter:

1. Trasferimento modello su Sap2000:

Il modello realizzato su Autodesk Revit è stato trasferito, mediante file IFC, al software di analisi strutturale Sap2000 (Fig. 4.5-4.6). Sono stati effettuati dei controlli sull'allineamento, sul posizionamento e sulla geometria degli elementi e sulle caratteristiche dei materiali. In figura 4.7 è stata raffigurata la visualizzazione del modello della facciata continua trasferito al software Sap2000.

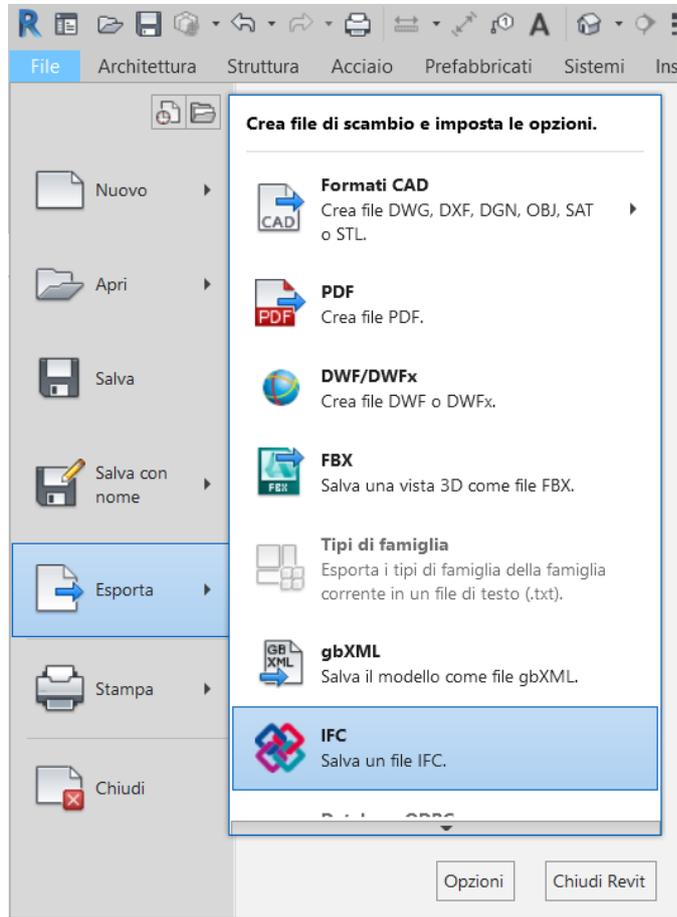


Fig. 4.5 Esportazione file IFC da Autodesk Revit.

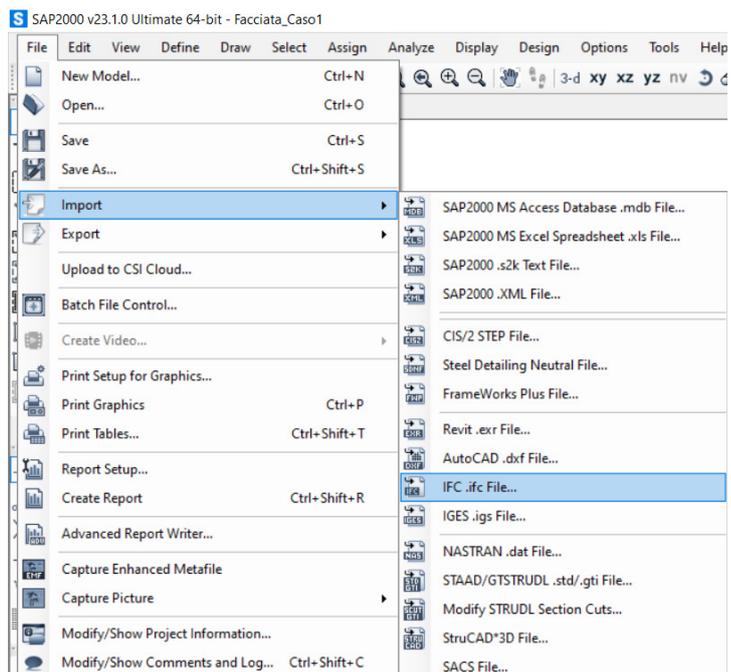


Fig. 4.6 Importazione file IFC su Sap2000 v23.1.0.

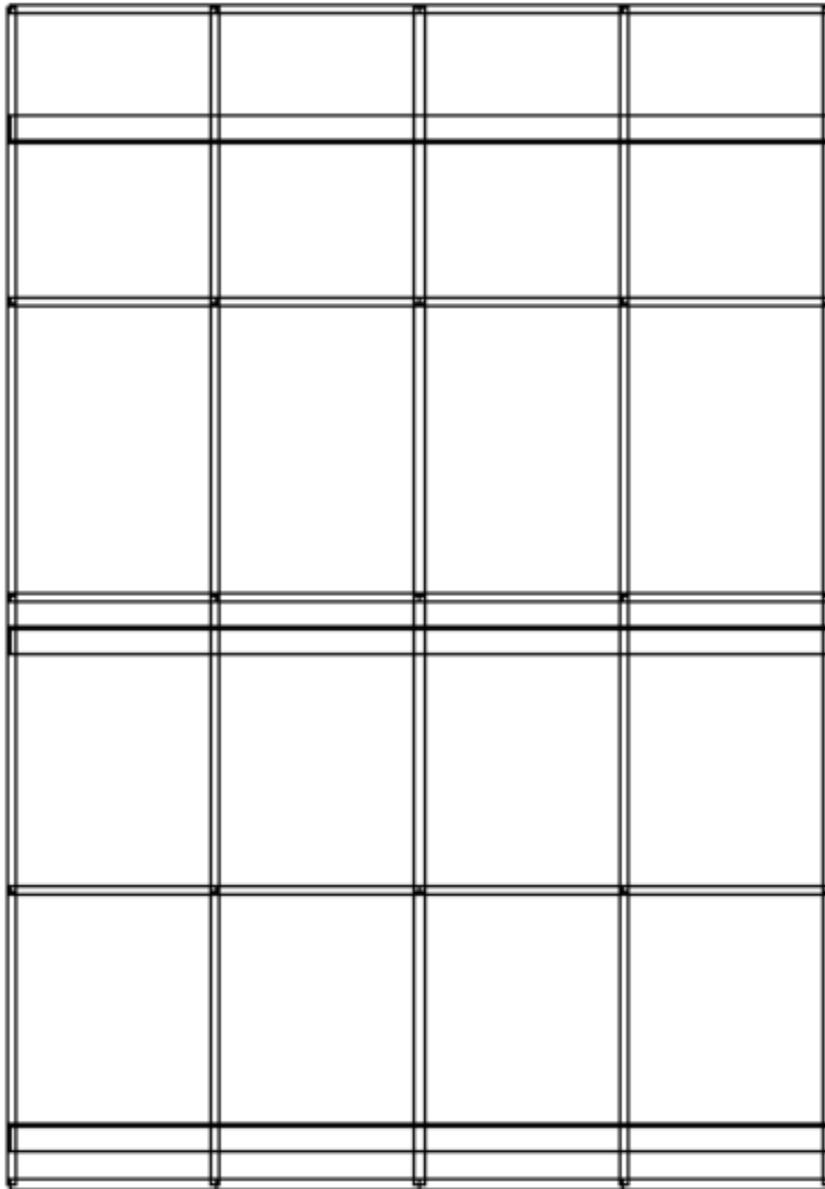


Fig. 4.7 Visualizzazione modello facciata continua su Sap2000.

2. Inserimento vincoli/collegamenti:

- La trave inferiore è stata vincolata mediante degli incastri (Fig. 4.8)

Inoltre sono stati modellati i vari collegamenti tra:

- Montanti e traversi: il loro collegamento è stato reso una cerniera mediante l'inserimento di sconnessioni definite come rilasci (Fig. 4.9);
- Travi mobili e telaio: mediante vincoli interni "rod", che permettono di ottenere un uguale spostamento di tali nodi (Fig. 4.10);

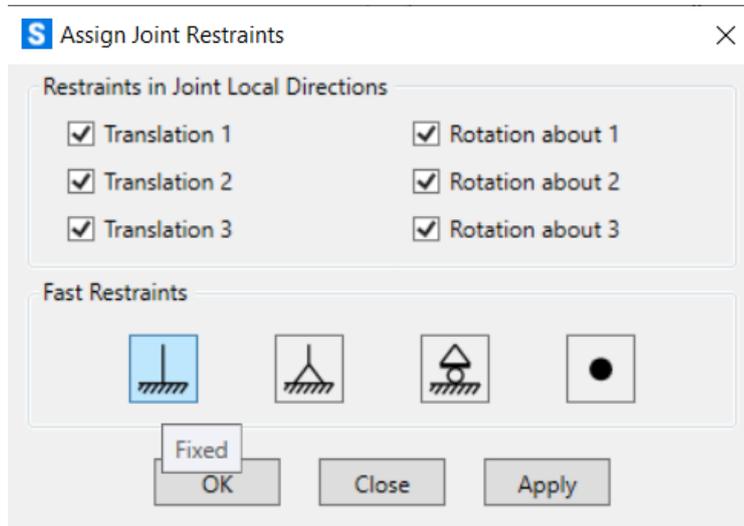


Fig. 4.8 Visualizzazione di inserimento dei vincoli di incastro.

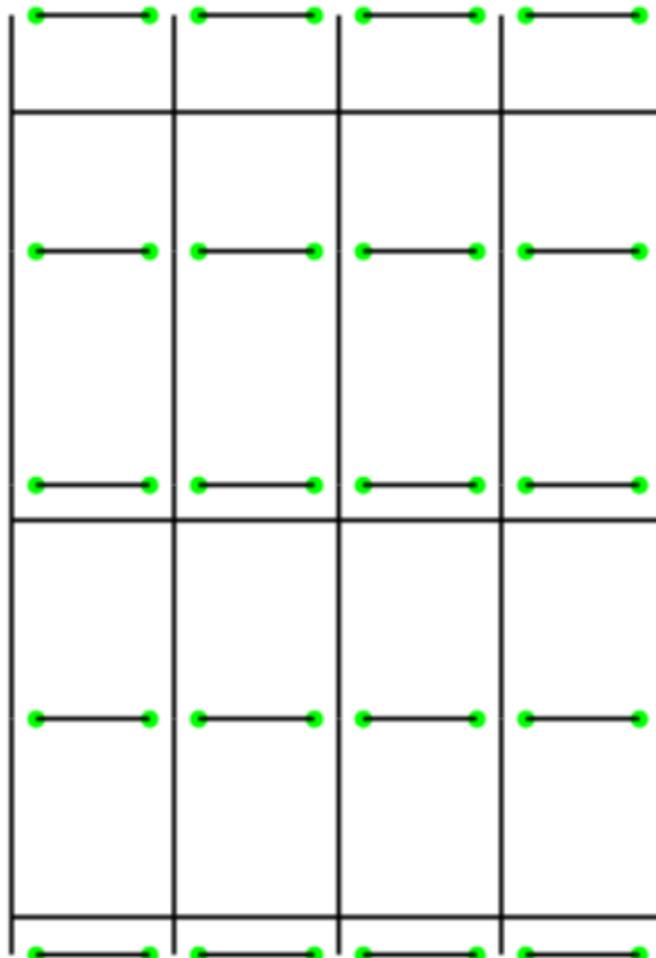


Fig. 4.9 Visualizzazione collegamento tra montanti e trasversi.

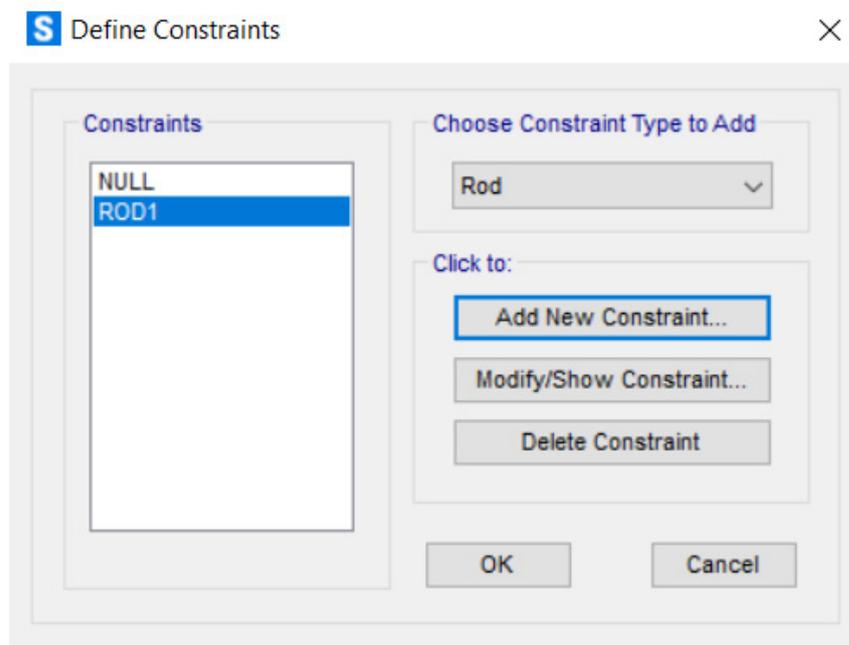


Fig. 4.10 Definizione vincoli "Rod" su Sap2000.

- Pannello e montanti/traversi: mediante dei "link" al fine di simulare la presenza della guarnizione (Fig. 4.11).

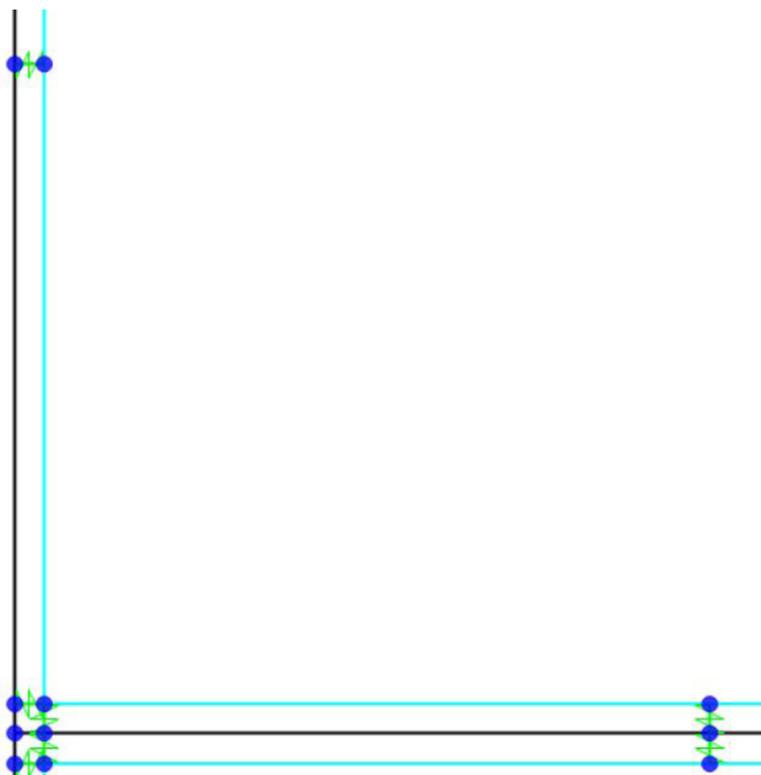


Fig. 4.11 Visualizzazione dei "link" di collegamento tra pannello e montanti/traversi su Sap2000.

3. Inserimento pannelli in vetro

La terza fase ha previsto l'inserimento dei pannelli in vetro mediante il comando "Draw Rectangular Area" (Fig. 4.12). Sono stati così realizzati i 16 pannelli costituenti la facciata. Infine è stata assegnata la mesh a tali pannelli, individuando la discretizzazione del pannello nei nodi di collegamento al telaio dove sono posizionati i link (Fig. 4.13 - 4.14).

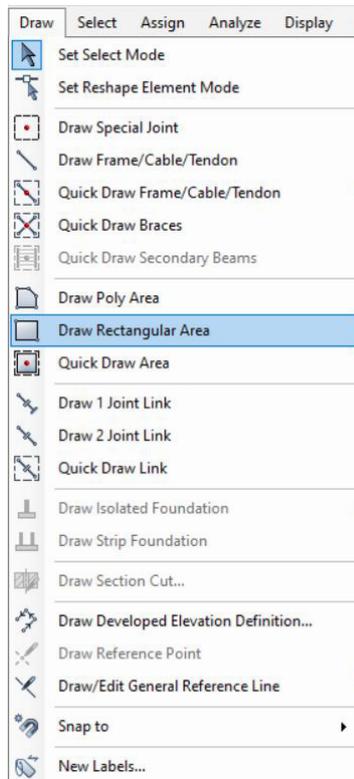


Fig. 4.12 Inserimento dei pannelli di vetro mediante il comando "Draw Rectangular Area" su Sap2000.

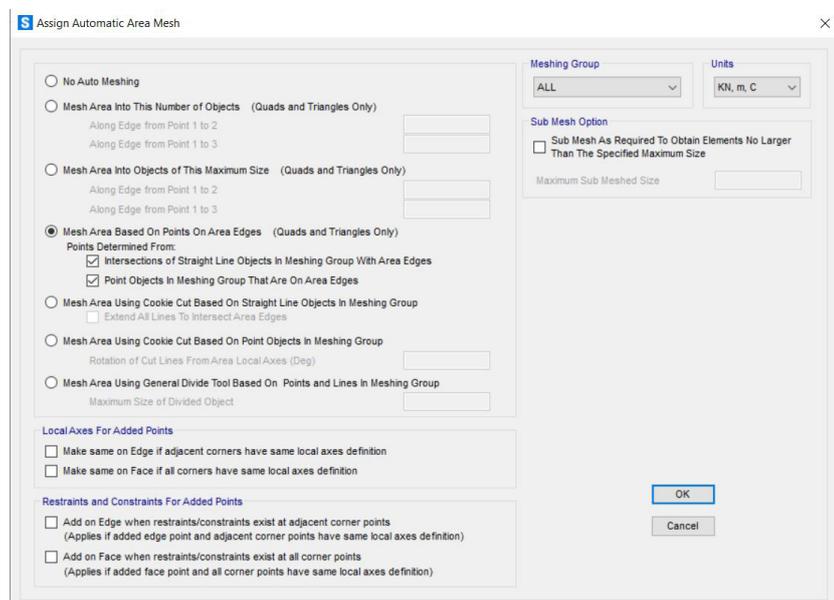


Fig. 4.13 Assegnazione mesh automatica su Sap2000.

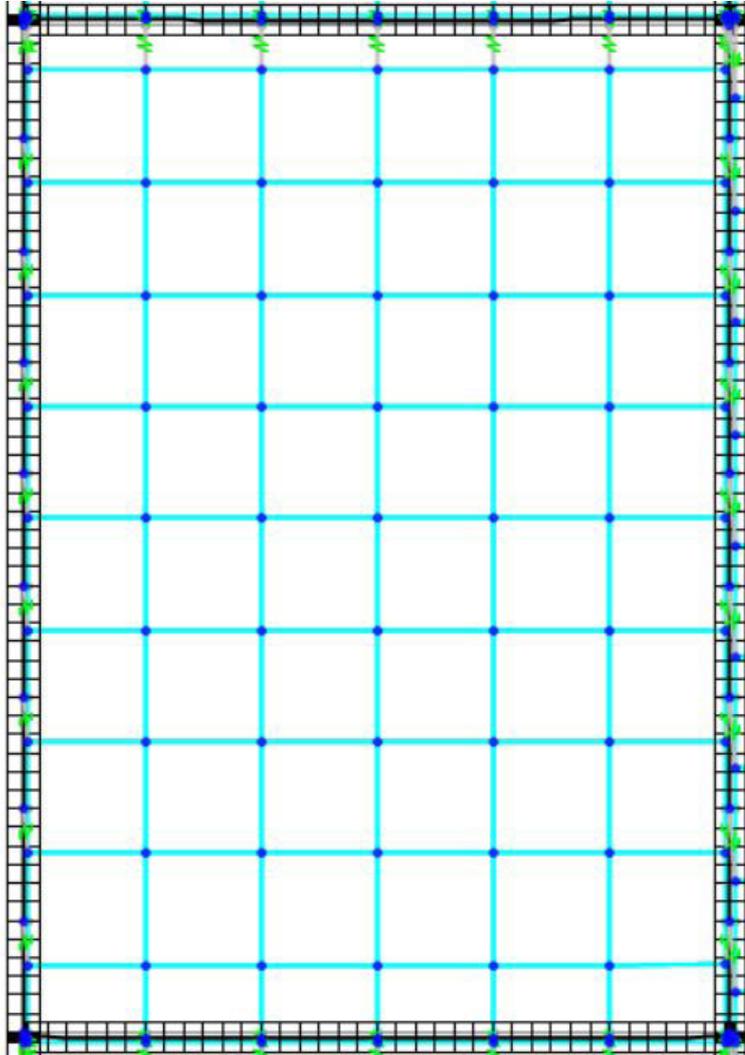


Fig. 4.14 Visualizzazione della discretizzazione del pannello di vetro mediante la mesh su Sap2000.

4.1.3 Applicazione prova sismica 501.6-09

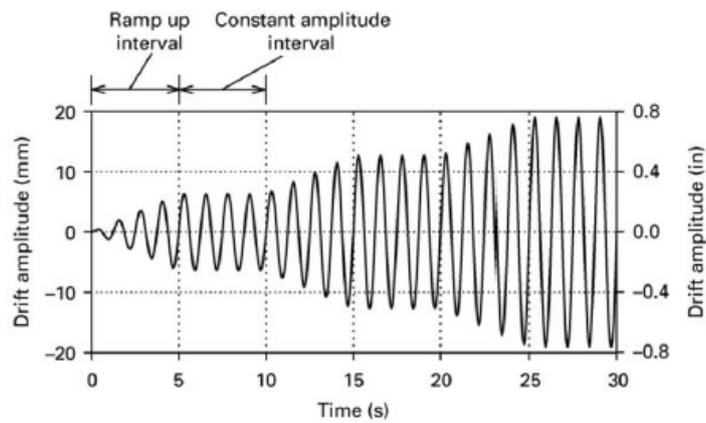
Il modello è stato così sottoposto alla prova sismica dinamica secondo normativa Americana: AAMA 501.6-09, Recommended Dynamic Test Method for Determining the Seismic Drift Causing Glass Fallout from a Wall System Panel. È un test dinamico focalizzato sulla resistenza al sisma di componenti architettoniche in vetro all'interno di sistemi di facciate continue. Essenzialmente, il test AAMA 501.6-09 consiste nel montare campioni di facciata continua su un sistema così fatto:

- Struttura a telaio di supporto: sufficientemente rigida da sostenere le azioni indotte dal movimento delle travi;
- Travi mobili: hanno il compito di muoversi simulando il sisma;
- Sistema di sollevamento meccanico: collegato alle travi mobili per consentire differenti spostamenti di piano;
- Sistema di attuatori idraulici controllati;
- Sistema di controllo e di acquisizione di dati.

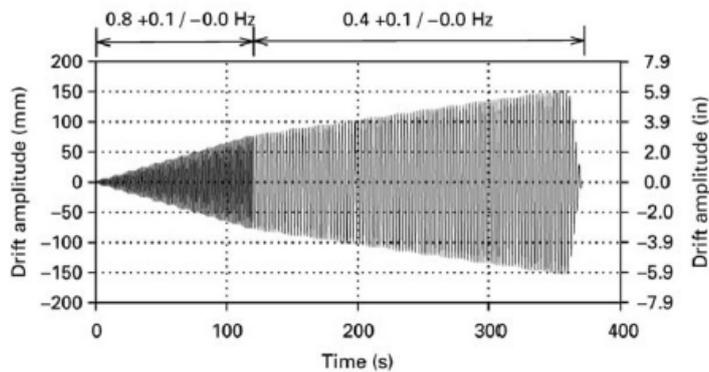
Tale test è caratterizzato da una serie concatenata di cicli sinusoidali ad ampiezza gradualmente crescente fino a 150 mm, con frequenza variabile da 0,8 Hz (per spostamenti fino a 75 mm) a 0,4 Hz (per spostamenti superiori a 75 mm) (Fig. 4.15).

La prova serve a determinare lo spostamento per il quale si determina la caduta del vetro dal telaio. Il valore ottenuto viene utilizzato nell'equazione 9.6.2.10.1-1 della normativa ASCE 7-02:

$$\Delta_{\text{fallout}} \geq 1.25 I_D \rho \text{ o } 13 \text{ mm}$$



(a) First 30 seconds of crescendo test



(b) Full crescendo test

Fig. 4.15 Storia temporale del crescendo test secondo normativa Americana 501.6-09.

Table 1.5-2 Importance Factors by Risk Category of Buildings and Other Structures for Snow, Ice, and Earthquake Loads^a

Risk Category from Table 1.5-1	Snow Importance Factor, I_s	Ice Importance Factor—Thickness, I_t	Ice Importance Factor—Wind, I_w	Seismic Importance Factor, I_r
I	0.80	0.80	1.00	1.00
II	1.00	1.00	1.00	1.00
III	1.10	1.25	1.00	1.25
IV	1.20	1.25	1.00	1.50

^aThe component importance factor, I_p , applicable to earthquake loads, is not included in this table because it is dependent on the importance of the individual component rather than that of the building as a whole, or its occupancy. Refer to Section 13.1.3.

Fig. 4.16 Tabella utilizzata per ricavare il valore del fattore "I" da utilizzare all'interno dell'equazione 9.6.2.10.1-2 della normativa ASCE 7-02.

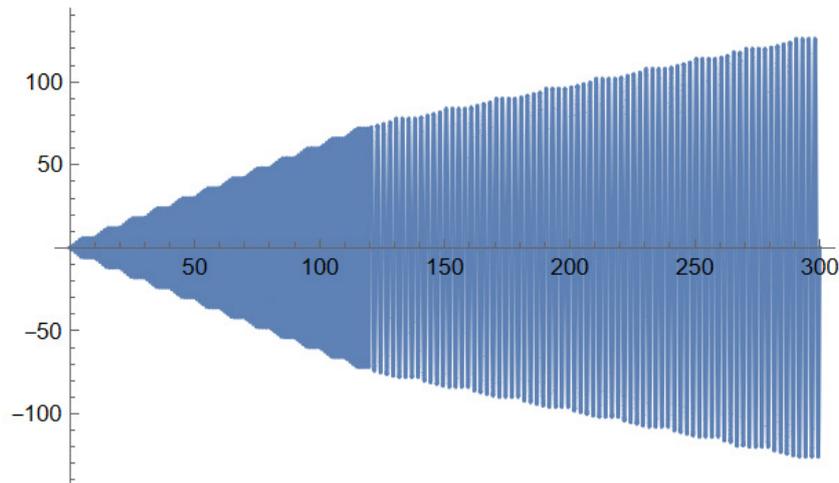


Fig. 4.17 Storia temporale del crescendo test realizzata su Wolfram Mathematica.

Dove:

- Δ_{fallout} è lo spostamento sismico relativo (drift di piano) che causa la caduta del vetro dalla facciata;
- D_p è lo spostamento sismico relativo per il quale viene progettato il componente;
- I è un fattore (ricavabile da una tabella, figura 4.16) che dipende dal tipo di occupazione dell'edificio.

Mediante l'utilizzo del software Wolfram Mathematica è stata realizzata la storia temporale del crescendo test, riportata in figura 4.17.

La storia temporale è stata applicata alle travi mobili che hanno il compito di simulare il sisma. In particolare nella trave centrale è stato applicato il crescendo test da sinistra verso destra (verso positivo), mentre nella trave superiore è stato applicato nel verso opposto, ovvero da destra verso sinistra (Fig. 4.18).

Successivamente è stata avviata un'analisi time-history; in figura 4.19 è stata raffigurata la deformata dell'involucro sottoposto a questi spostamenti crescenti nel tempo.

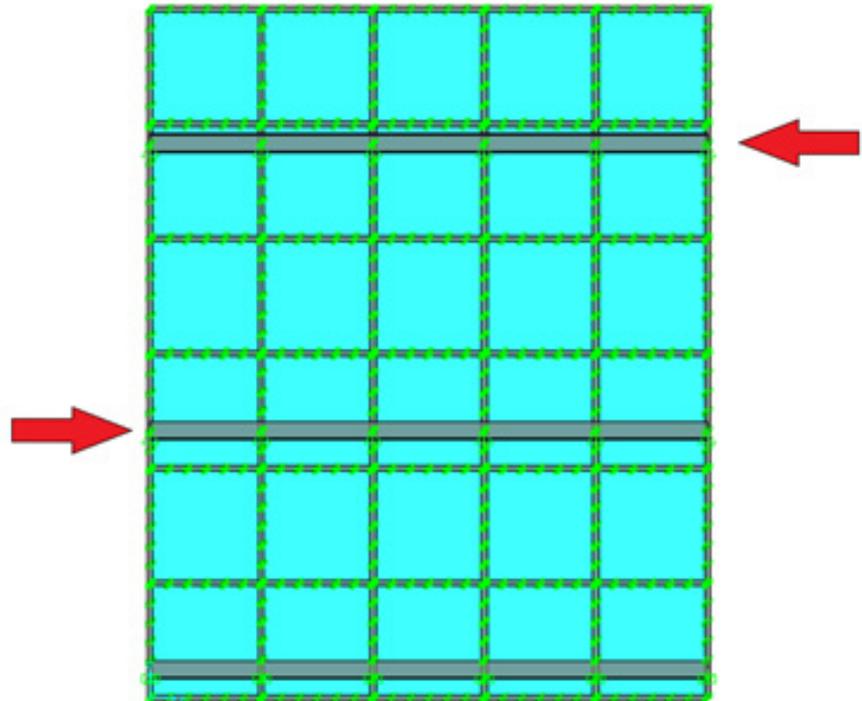


Fig. 4.18 Applicazione storia temporale del crescendo test.

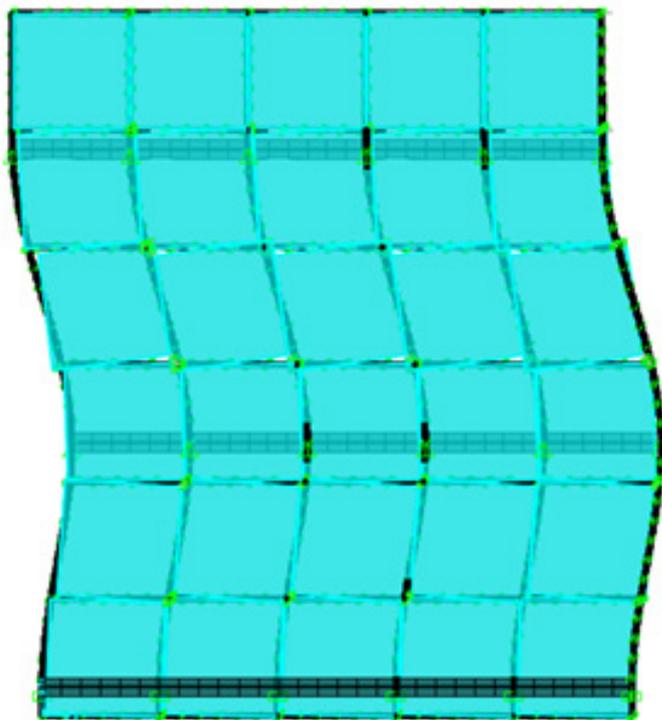


Fig. 4.19 Deformata dopo l'applicazione della storia temporale del crescendo test.

4.2 Simulazioni e verifiche prestazionali digitali dell'esistente

Il secondo caso, invece, riguarda l'applicazione della prova sismica dinamica AAMA 501.6-09 ad un involucro esistente, ovvero alla facciata del lato Sud del plesso di Architettura dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Anche in questo scenario sono state riprodotte al meglio le caratteristiche del test realizzato in laboratorio.

Rispetto al caso precedente, si è proceduto con un rilievo in loco della facciata mediante laser scanner, attraverso processi SCAN to BIM. In particolare, questa fase, ha visto il coinvolgimento di BIG srl., Spin off accademico e start up innovativa dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria, che ha reso disponibili competenze e strumentazioni. La nuvola di punti acquisita è stata funzionale per la realizzazione del modello BIM su Autodesk Revit. Infine, tale modello, è stato trasferito sul software di analisi strutturale Sap2000, al fine di applicare la prova sismica dinamica AAMA 501.6-09.

4.2.1 Nuvola di punti

È stato effettuato il rilievo della facciata del lato Sud del plesso di Architettura dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. Il rilievo (Fig. 4-20 - 4.21 - 4.22 - 4.23) è stato realizzato mediante l'utilizzo di un laser scanner, che ha permesso la creazione di una nuvola di punti altamente accurata. Lo strumento utilizzato, Leica BLK 360, permette di catturare 360.000 punti al secondo. È dotato di tre fotocamere HDR sferiche, panoramiche con una fotocamera termica; e permette di ottenere nuvole di punti 3D con precisione millimetrica. Crea un gemello digitale accurato dell'area interessata grazie a misurazioni basate sul laser.

Sono stati rilevate sette stazioni all'esterno dell'edificio, che hanno così permesso di ottenere la nuvola dei punti della parte esterna della facciata continua. Mentre internamente è stato necessario considerare molte più stazioni, al fine di permettere anche un collegamento visivo tra interno ed esterno, e tra corridoio e aule dell'università. La medesima operazione è stata ripetuta anche per il primo piano. In totale internamente sono state scansionate 24 stazioni.

Terminata la fase di acquisizione del rilievo si è proceduto con la fase di elaborazione dei dati, inserendo cioè le scansioni effettuate all'interno del software Leica Cyclone Register 360 BLK Edition. Tale programma permette di collegare facilmente le varie stazioni e di creare così la nuvola di punti completa. Le stazioni rilevate vengono collegate tra di loro mediante il comando "allineamento visivo", all'interno del quale è possibile effettuare l'allineamento tra i punti sia lateralmente e sia dall'alto (Fig. 4.24 - 4.25).

ReCap è un software Autodesk specializzato nell'elaborazione dei dati dei rilievi 3D con laser scanner o drone. Permette di visualizzare e gestire nuvole di punti, ottenendo numerosi vantaggi nel processo Scan-to-Bim.

Dopo aver importato la nuvola di punti su ReCap, il primo passo è stato quello di pulirla, ovvero di eliminare tutti quei punti errati o inutili creati a causa di fenomeni non voluti, quali per esempio il riflesso del sole. Successivamente la facciata, oggetto dello studio, è stata isolata dal resto del modello digitale. Si è passati così da una prima nuvola di punti (Fig. 4.26) molto disordinata e confusa ad una nuvola molto più pulita e visibile (Fig. 4.27). Su ReCap è possibile effettuare diversi studi sull'elevazione e sull'intensità dei punti. Inoltre è possibile effettuare operazioni di misura di distanze tra un punto ed un altro, ed è anche possibile fare uso delle foto scattate dal laser scanner per la misurazione delle distanze.

Fig. 4.20 Rilievo mediante laser scanner della facciata Sud del plesso di Architettura dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria lato esterno (1).



Fig. 4.21 Rilievo mediante laser scanner della facciata Sud del plesso di Architettura dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria lato esterno (2).





Fig. 4.22 Rilievo mediante laser scanner della facciata Sud del plesso di Architettura dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria lato interno (1).



Fig. 4.23 Rilievo mediante laser scanner della facciata Sud del plesso di Architettura dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria lato interno (2).

Fig. 4.24 Allineamento stazioni e realizzazione nuvola di punti mediante il software Leica Cyclone Register 360 BLK Edition.

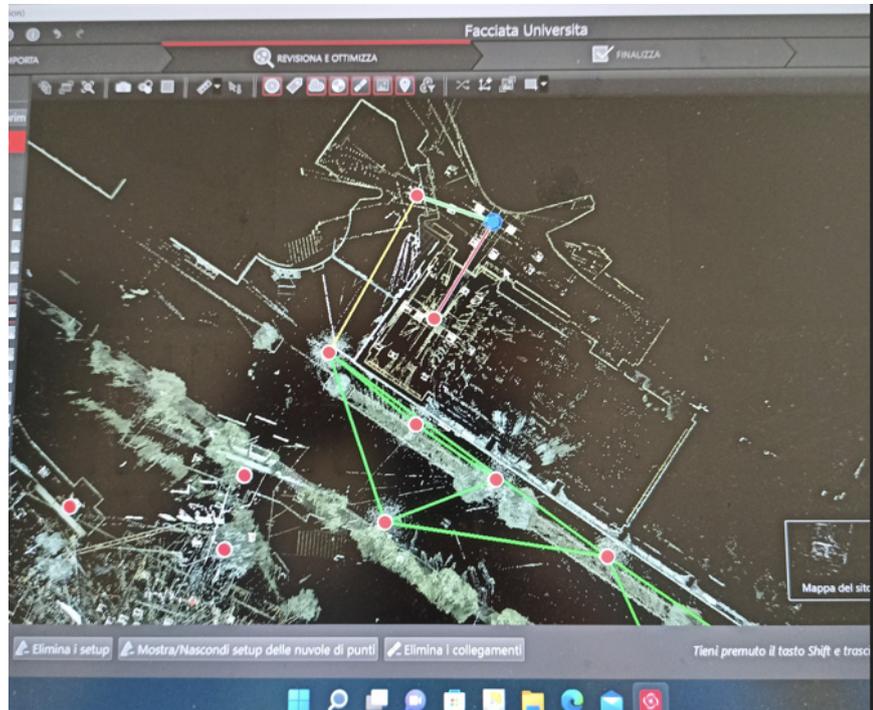


Fig. 4.25 Salvataggio della nuvola di punti mediante il software Leica Cyclone Register 360 BLK Edition.

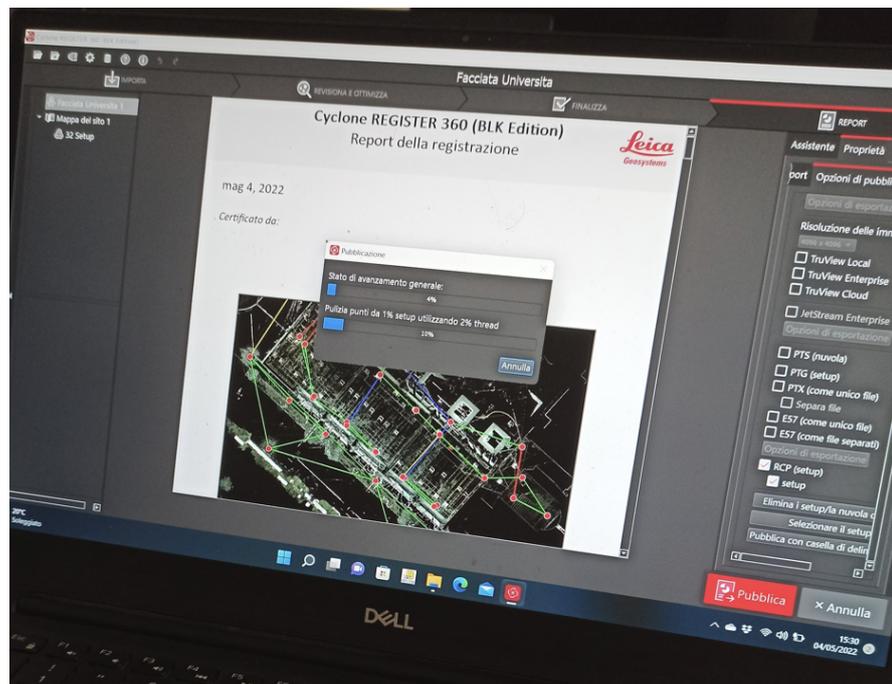




Fig. 4.26 Nuvola di punti importata su ReCap.



Fig. 4.27 Nuvola di punti pulita su ReCap.

4.2.2 Realizzazione modello BIM

Lo scopo è descrivere, a partire dalla nuvola di punti, le fasi principali seguite per la realizzazione del modello digitale della facciata rilevata. La nuvola di punti, all'interno di ReCap, è stata **georeferenziata**, e successivamente importata su Autodesk Revit, permettendo la realizzazione del modello BIM in maniera semplice ed accurata. Infatti, la nuvola di punti, se opportunamente creata, funge da affidabile riferimento geometrico su cui poter realizzare le geometrie di un modello digitale di un edificio rilevato. Una volta che la nuvola di punti viene caricata non può più essere modificata, ma può essere spostata o ruotata (Fig. 4.28). Questo potrebbe risultare un limite del software, ma in realtà è un grosso vantaggio per il disegnatore BIM che può contare su un modello geometrico fisso su cui costruire il

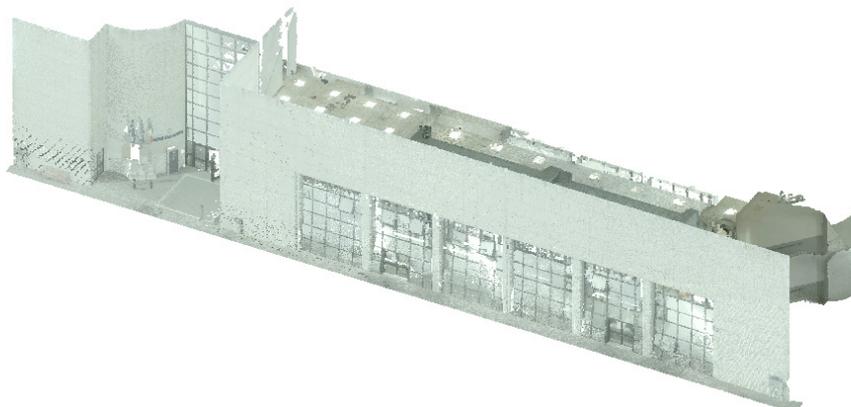


Fig. 4.28 Nuvola di punti caricata su Autodesk Revit.

suo lavoro. Per cui la **prima fase** è stata quella di posizionare ed allineare la nuvola di punti con gli assi di riferimento, e bloccarla in maniera tale da evitare di spostarla od eliminarla. Nella **seconda fase**, con l'aiuto di alcune sezioni, sono stati individuati e realizzati i vari livelli relativi ai piani dell'edificio ed all'altezza dei traversi. In particolare sono stati creati i livelli del piano terra, del primo, secondo e terzo impalcato; e quelli relativi ai traversi delle due tipologie di facciate continue presenti.

La **terza fase** ha previsto la generazione delle geometrie principali dell'involucro. Per cui, sfruttando come guida la nuvola di punti indicizzata, è stata ricalcata per andare a creare i macro-elementi architettonici costituenti l'edificio, ovvero il telaio di travi, pilastri e i solai che conferiscono resistenza alla struttura, nonché il modello strutturale. Successivamente sono stati realizzati i muri, le porte e tutti quegli elementi che compongono il modello architettonico.

Nella **quarta fase** sono state realizzate le facciate continue. Come si vedrà, al fine di creare le facciate quali elementi strutturali, non si è proceduto secondo il comando standard di realizzazione di "facciate continue" su Revit. Bensì esse sono state modellate come telai di travi e pilastri rappresentanti rispettivamente i traversi e i montanti. Il tutto è stato completato mediante l'inserimento dei pannelli di vetro.

Si è proceduto all'inserimento d'informazioni all'interno del modello dell'edificio sia durante la creazione sia successivamente. Le informazioni che si possono inserire all'interno di un modello BIM sono elevate e derivanti da ambiti multidisciplinari, tra cui: i materiali che lo compongono e le relative proprietà, la geometria dell'edificio, rilievi ad alta definizione con nuvole di punti, eventuali immagini di qualsiasi tipo, e altre tipologie di informazioni. Tutti questi dati sono raccolti e gestiti nel modello BIM, il quale funge da database tridimensionale e virtuale. Inoltre, Autodesk Revit permette l'inserimento di parametri al fine di aumentare il livello di informazione del modello; tali parametri possono rappresentare lo stato di degrado degli elementi che compongono la struttura.

Per lo scenario in esame, è stato utilizzato per i pilastri e per le travi che compongono il telaio un materiale strutturale presente nelle librerie "Calcestruzzo". Mentre per i montanti ed i traversi delle facciate è stato modificato un materiale presente in libreria "Alluminio" in "Alluminio EN AW 6060". In particolare, per ciascun materiale, Autodesk Revit implementa cinque voci: identità, grafica, aspetto, fisico, termico. Quello di maggior interesse in ambito

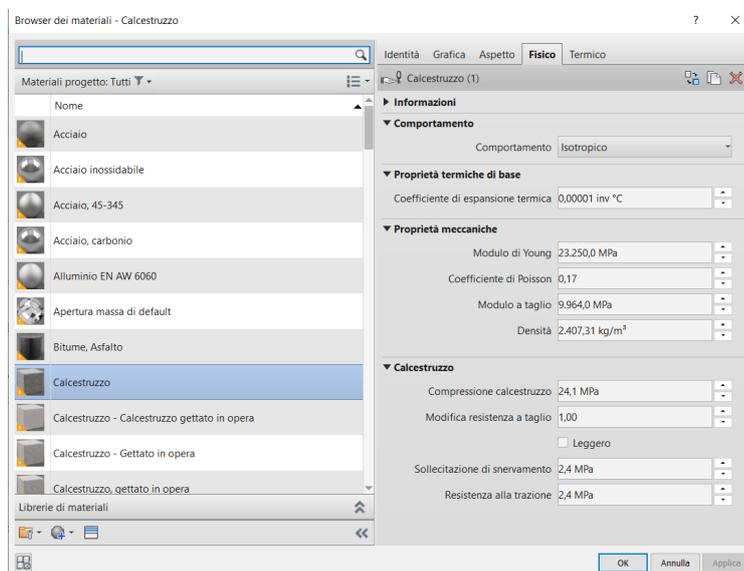


Fig. 4.29 Caratteristiche meccaniche e fisiche del materiale "Calcestruzzo" su Autodesk Revit.

civile è sicuramente quello "Fisico", dove vengono riportate le informazioni riguardanti le caratteristiche meccaniche e la resistenza del materiale (Fig. 4.29).

All'interno della vista 3D, in particolare nei "dati identità", è possibile scegliere il tipo di vista voluto, il quale ha lo scopo di verificare la correttezza del modello strutturale ed analitico. Queste viste sono personalizzabili al fine di poter visionare le parti del modello interessate per una determinata analisi. Sono riportati, nelle seguenti figure, alcuni esempi inerenti al modello realizzato:

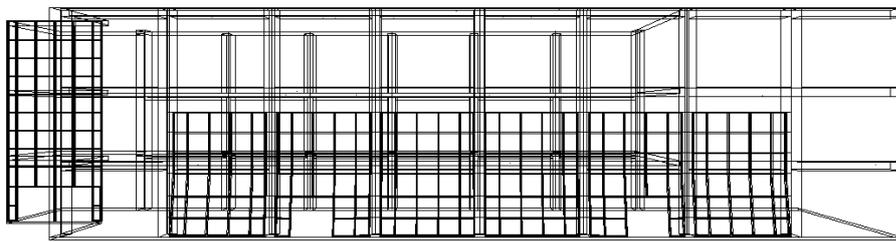


Fig. 4.30 Vista combinazione modello strutturale ed analitico su Autodesk Revit.

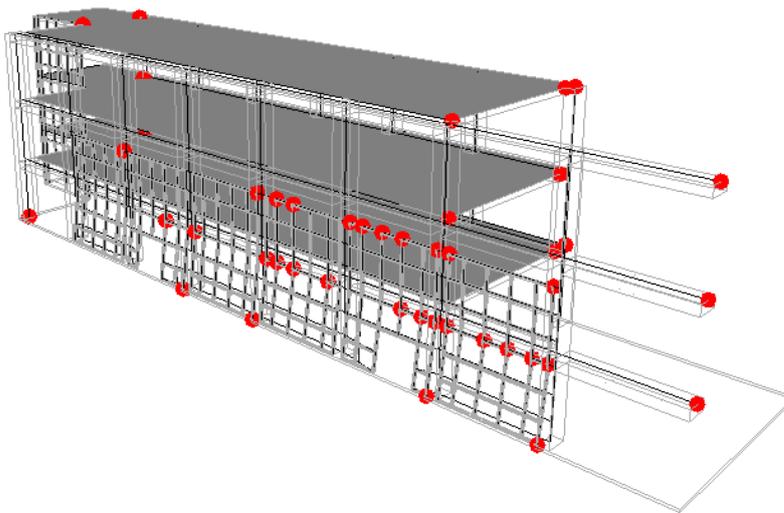


Fig. 4.31 Vista analitica strutturale - nodi non connessi su Autodesk Revit.

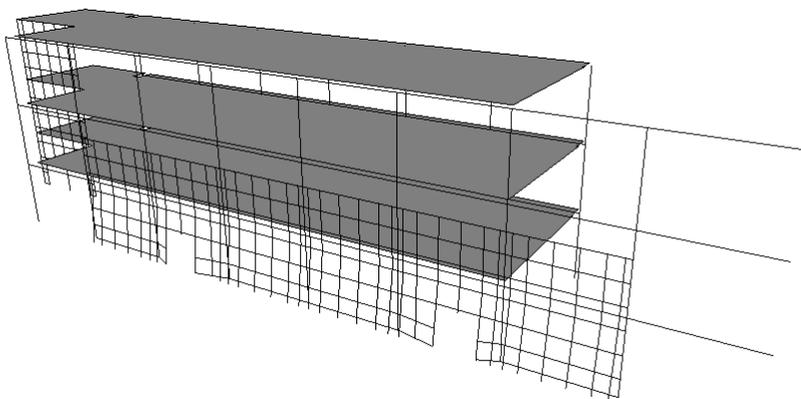


Fig. 4.32 Vista analitica strutturale - isolata - 3D su Autodesk Revit.

Fig. 4.33 Prospetto delle due facciate sud del modello realizzato su Autodesk Revit del plesso di Architettura dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria.

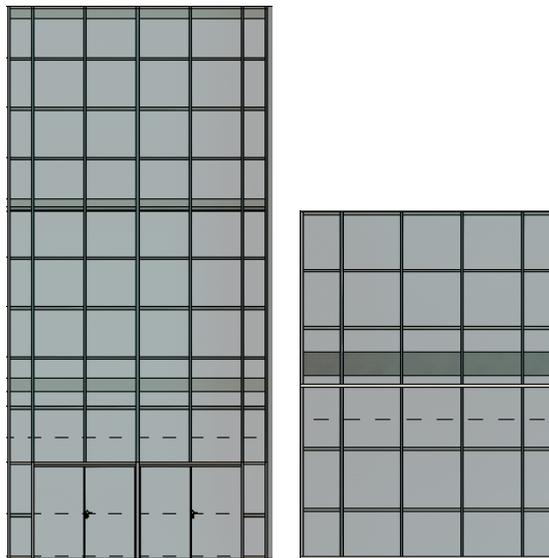


Fig. 4.34 Prospetto lato sud del modello realizzato su Autodesk Revit del plesso di Architettura dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria.



Dalle immagini si può evincere la differenza tra modello analitico e modello fisico, il primo mira a ottenere un modello verosimile allo stato di fatto, mentre il secondo a schematizzare la struttura con una serie di nodi e aste, in modo tale che il progetto sia leggibile da un software di calcolo strutturale.

4.2.3 Realizzazione modello FEM

Come nel primo caso, una volta realizzato il modello BIM su Autodesk Revit, è stato esportarlo tramite file IFC sul software strutturale Sap2000 al fine di eseguire l'analisi sismica secondo prescrizione della normativa Americana.

La facciata continua realizzata in BIM presenta degli elementi obliqui, i quali a rigor di modellazione devono essere realizzati con un taglio orizzontale alla base. Tuttavia tale elemento così modellato non viene importato nel software di analisi strutturale. Questo risulta essere un gran limite, in quanto si è costretti a realizzare un modello BIM graficamente errato con un taglio perpendicolare alla base degli elementi obliqui della facciata continua. Come è possibile vedere dalla figura 4.35 tale soluzione implica una visione grafica su Autodesk Revit errata, ma permette il trasferimento del modello su Sap2000.

Una volta trasferito il modello su Sap2000, esso è stato sottoposto ad un controllo generale sulla posizione degli elementi e ad una verifica dei materiali. La differenza rispetto al caso

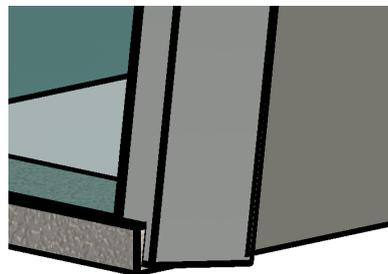
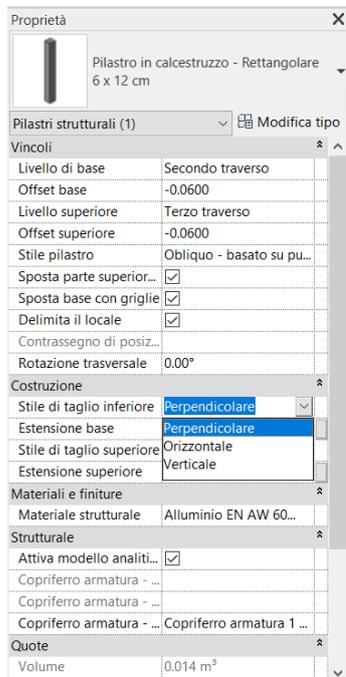


Fig. 4.35 Visualizzazione stile di taglio inferiore in Autodesk Revit.

precedente sta nel fatto che è presente una facciata obliqua (Fig. 4.36), per cui sarà necessario effettuare un'analisi 3D. In maniera molto simile al primo caso, il passo successivo è l'inserimento dei vincoli e dei collegamenti:

- La trave inferiore (fissa) viene vincolata mediante degli incastri.

Inoltre vengono modellati i vari collegamenti tra:

- Montanti e traversi: il loro collegamento è stato reso una cerniera mediante l'inserimento di sconnessioni definite come rilasci (Fig. 4.38);
- Travi mobili e telaio: mediante vincoli interni "rod", che permettono di ottenere un uguale spostamento di tali nodi;
- Pannello e montanti/traversi: mediante dei "link" al fine di simulare la presenza della guarnizione (Fig. 4.39).

4.2.4 Applicazione prova sismica AAMA 501.6-09

La facciata è stata sottoposta alla prova sismica secondo normativa AAMA 501.6-09. Tuttavia, rispetto al caso precedente in tale facciata è presente esclusivamente una trave fissa ed una mobile, alla quale è stata sottoposta la storia temporale (cre-scendo test).

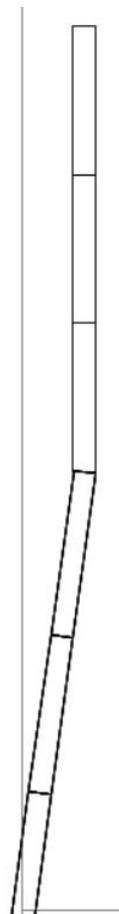


Fig. 4.36 Prospetto laterale della facciata su Sap2000.

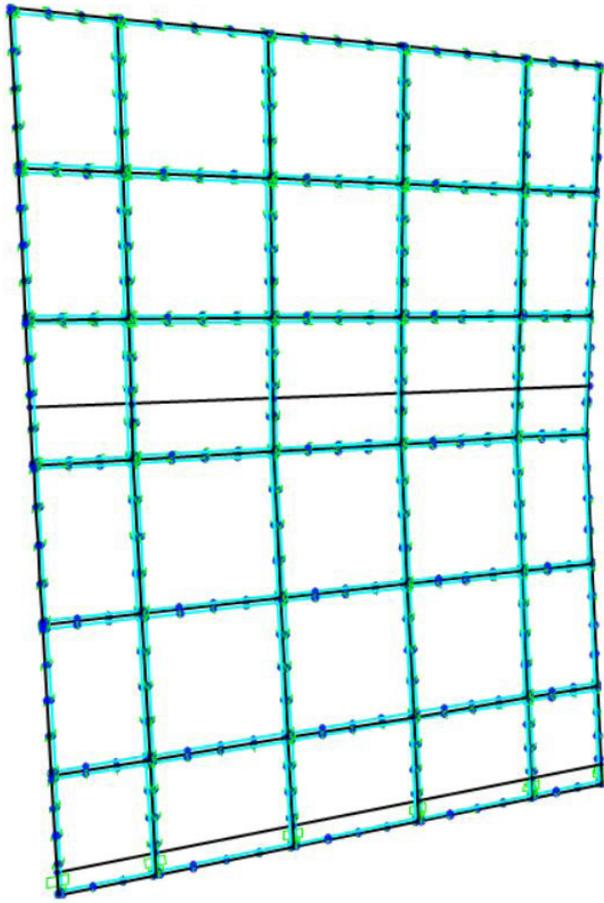


Fig. 4.37 Vista 3D della facciata su Sap2000.

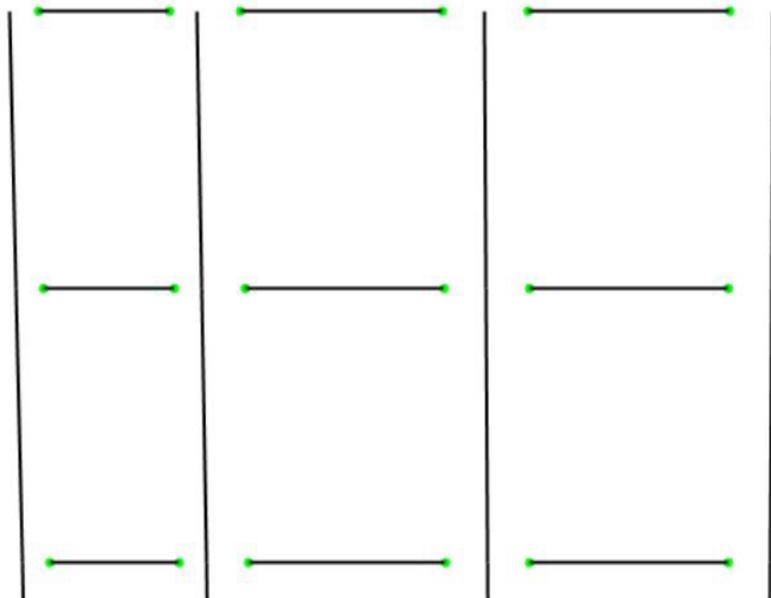


Fig. 4.38 Collegamento tra montanti e traversi su Sap2000.

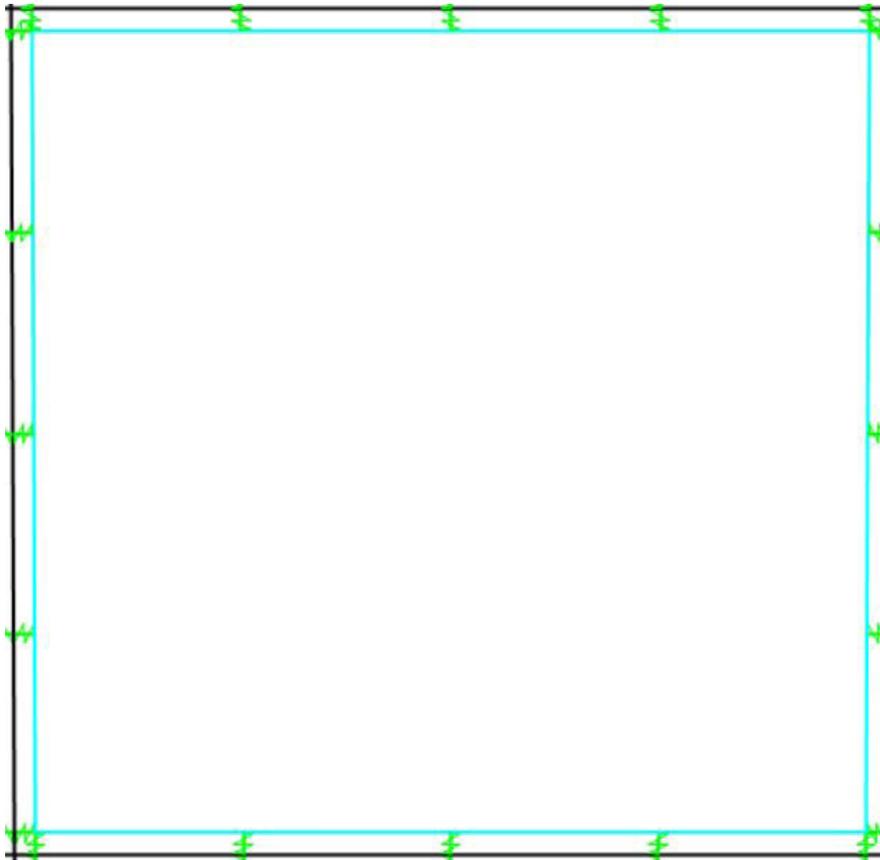


Fig. 4.39 Vista 2D dei collegamenti tra montanti/traversi e pannello in vetro su Sap2000.

4.3 Simulazioni e verifiche prestazionali di laboratorio

Il terzo e ultimo scenario riguarda l'applicazione della prova sismica dinamica AAMA 501.6-09 in laboratorio su un modello scala 1:1 di una facciata continua a montanti e traversi "Poliedra Sky 50", identica a quella modellata nel primo caso, al fine di poter effettuare un confronto valido sui risultati. Come già espresso nei presupposti operativi le informazioni riguardanti l'esecuzione di tale test, in particolare sui risultati, sono stati reperiti grazie alla collaborazione della Metra Building. Il laboratorio che si è occupato dell'esecuzione di tale prova è l'Istituto per le Tecnologie della Costruzione del Consiglio Nazionale delle Ricerche.

4.3.1 Test AAMA 501.6 realizzato presso il laboratorio ITC del CNR

La relazione tecnica fornita dalla Metra e realizzata dal laboratorio ITC del CNR è suddivisa in sette parti.

La prima riguarda la **descrizione del campione sottoposto alla prova**. La facciata è formata da:

- Profilati in lega di alluminio EN AW 6060 - T5, con montanti da 175 mm e traversi da 174 mm;
- Tipologie moduli: n° 16 specchiature fisse;
- Vetrazioni: vetrocamera da 44.2/16/44.2 mm (esterno/camera/interno).

In questa sezione sono state raffigurate alcune immagini e alcuni risultati ottenuti da tale test presso il laboratorio.

In figura 4.40 è stato raffigurato il prospetto vista esterna e la sezione orizzontale del campione della facciata; mentre in figura 4.41 la sezione verticale e lo schema degli interassi del campione pervenuto e sottoposto a prova.

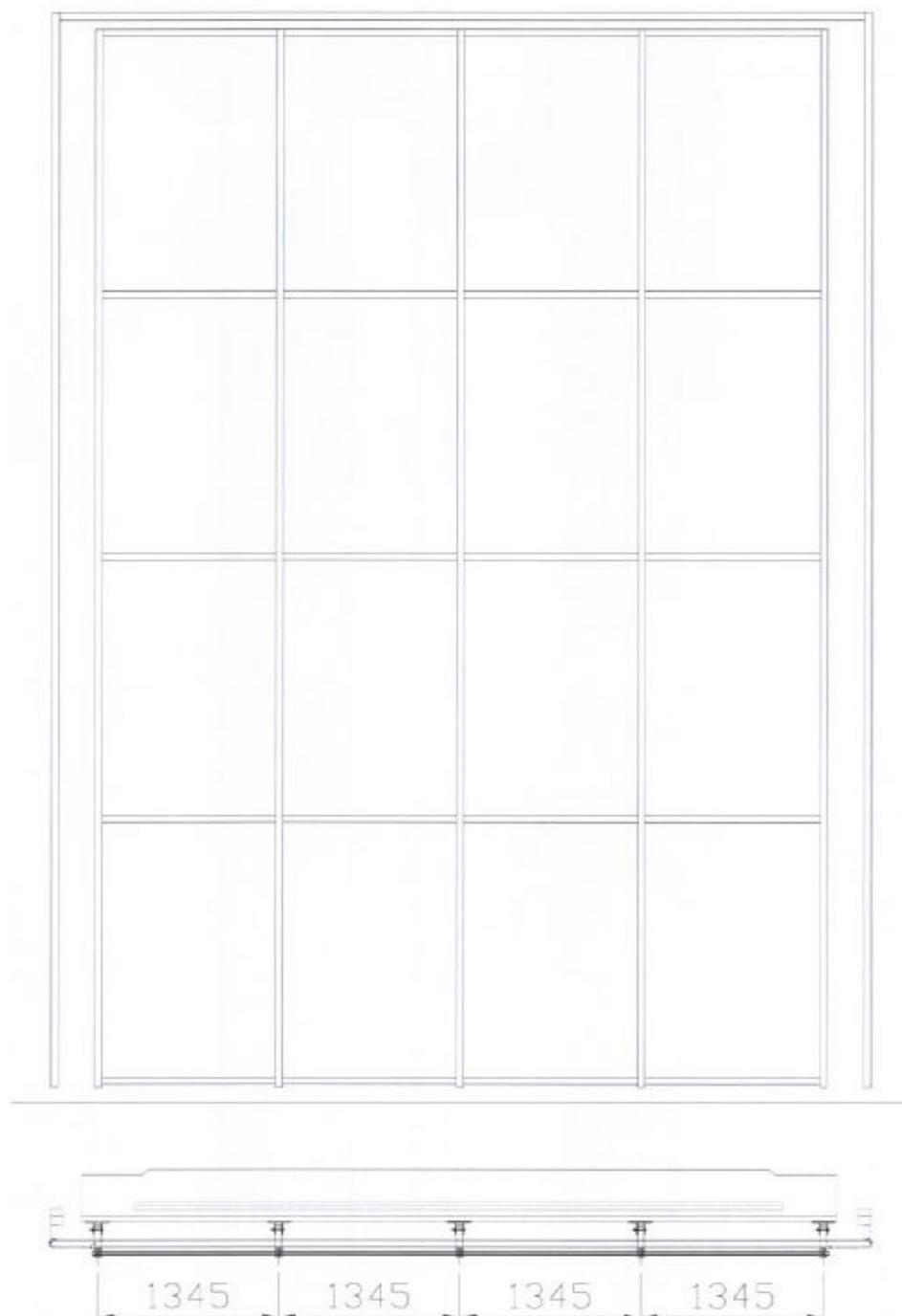


Fig. 4.40 Prospetto vista esterna e sezione orizzontale del campione pervenuto e sottoposto a prova.
Fonte: Relazione tecnica ITC.

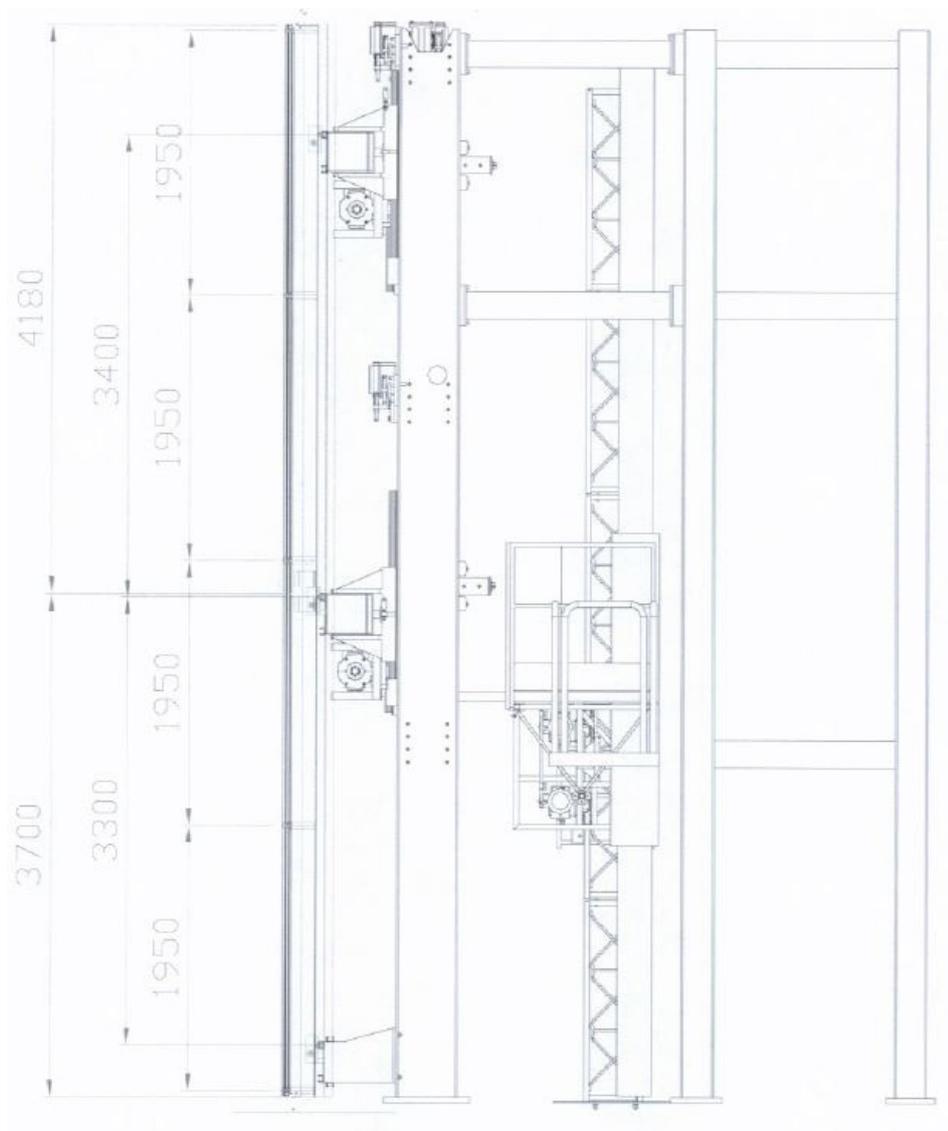


Fig. 4.41 Sezione verticale e schema degli interessi del campione pervenuto e sottoposto a prova.
Fonte: Relazione tecnica Metra.

Nelle figura 4.42 e 4.43 sono state raffigurate le sezioni dei profilati in alluminio, rispettivamente dei montanti e dei traversi, della facciata continua.

La seconda parte ha riguardato il **campionamento e la procedura di preparazione del campione**. La procedura di preparazione del campione è stata condotta conformemente ai requisiti della norma AAMA.

Successivamente è stata descritta la **metodologia di prova**. La prova è stata condotta direttamente da operatori ITC e in presenza di rappresentanti del richiedente.

La prova dinamica è stata eseguita in accordo alla metodologia proposta dall'AAMA 501.6-09. La prova permette di determinare l'ampiezza dello spostamento orizzontale di elementi facciata, il cosiddetto Δ fallout, che causerebbe la caduta di pannelli di vetro in condizioni

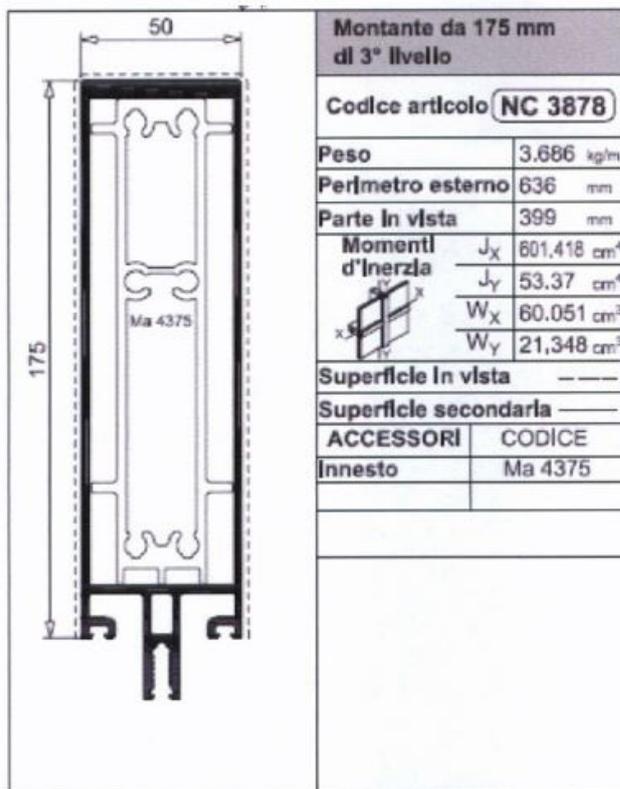
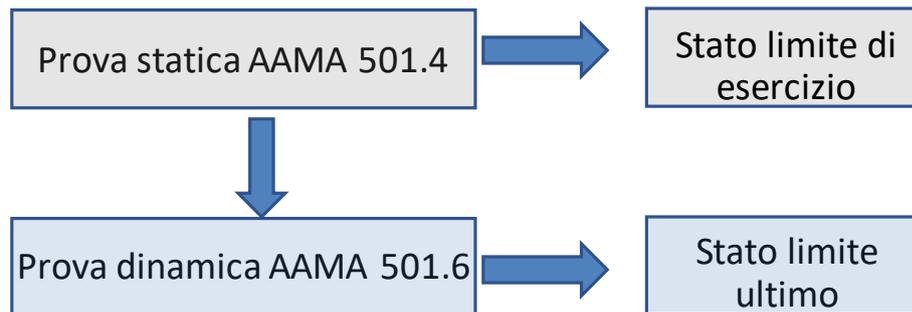


Fig. 4.42 Sezione del montante del campione pervenuto e sottoposto a prova.
Fonte: Relazione tecnica Metra.



Fig. 4.43 Sezione del traverso del campione pervenuto e sottoposto a prova.
Fonte: Relazione tecnica Metra.

di laboratorio. Tale metodo di prova, incentrato sul comportamento allo stato limite ultimo di un sistema facciata o di una partizione, è uno stato avanzato del test AAMA 501.4-00 che invece si concentra sul comportamento allo stato limite di esercizio delle facciate. Ven-



gono successivamente riportate le modalità di esecuzione della prova, ovvero il campione di facciata sottoposto ad una serie concatenata di cicli sinusoidali costituiti da intervalli di rampa e intervalli di ampiezza costanti, detto "crescendo test". Infine sono state rilasciate le prestazioni richieste; il test deve essere condotto senza interruzione fino a che non si verifica una delle seguenti condizioni:

- L'indice di drift rispetto all'altezza del pannello di vetro è almeno 0.1 (10%)
- Caduta di vetro (frammento di vetro maggiore di 650 mm² che cade in qualsiasi direzione rispetto alla facciata);
- Viene applicato uno spostamento dinamico di ± 150 mm al campione.

La quarta parte riguarda l'**apparecchiatura di prova**. Tutte le attrezzature utilizzate per condurre il test si trovano presso l'Istituto per le Tecnologie della Costruzione del Consiglio Nazionale delle Ricerche a San Giuliano Milanese. Nella relazione tecnica è inoltre presente una breve descrizione riguardante l'apparecchiatura di prova:

"Sull'apparecchiatura è possibile installare facciate in vera grandezza fino a 5600 mm di larghezza e 8000 mm di altezza. Queste possono essere montate alla struttura intelaiata in acciaio in corrispondenza di tre livelli: una trave fissa alla base e due travi mobili al secondo e terzo livello. Tutte le travi sono dotate di canaline di ancoraggio, al fine di poter installare varie tipologie di sistemi di facciata, pareti e partizioni. Le travi mobili sono connesse ad un sistema di attuatori idraulici controllati dinamicamente. Un sistema di sollevamento meccanico delle travi permette di ottenere diverse altezze di interpiano. Gli spostamenti nel piano della facciata sono prodotti da un attuatore idraulico a doppio stelo, posizionato su ogni trave mobile, con una capacità di carico di 200 kN e uno spostamento massimo di ± 85 mm. Gli spostamenti fuori dal piano sono prodotti da due attuatori doppio stelo (per ogni trave) con una capacità di carico di 100 kN e uno spostamento massimo di ± 85 mm. I due attuatori possono lavorare in controfase per ottenere spostamenti di interpiano (2-3 livello) fino a ± 170 mm. È prevista la possibilità di impartire spostamenti dinamici ad alte frequenze. Gli attuatori sono interfacciati con un sistema di controllo che permette di applicare le storie e le ampiezze di spostamento, le frequenze ed il numero di cicli desiderati" (Istituto per le Tecnologie della Costruzione, 2017) (Fig. 4.44).

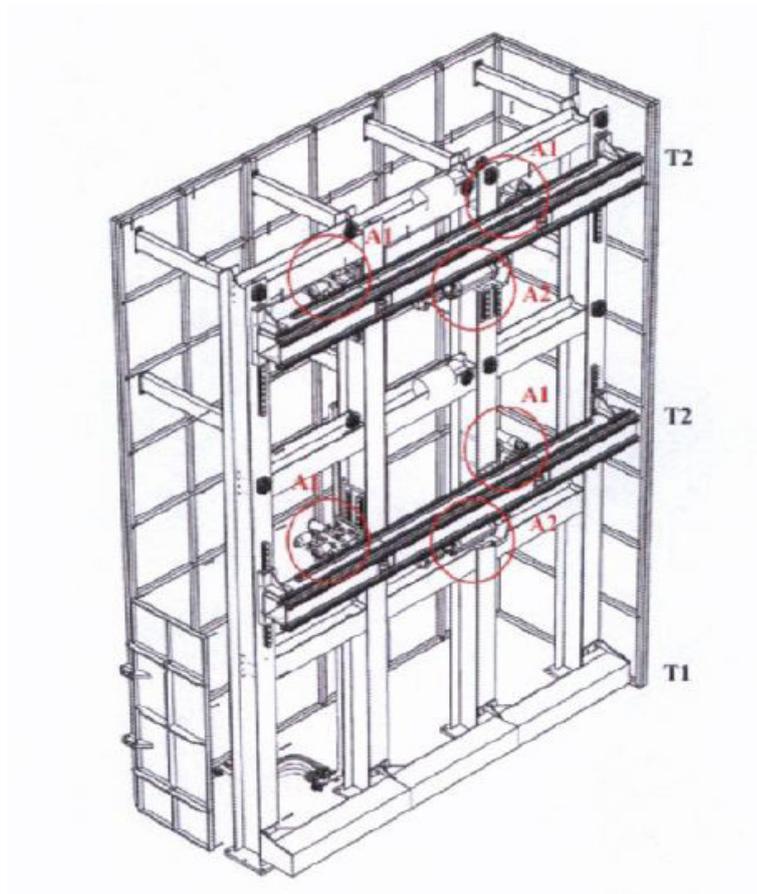


Fig. 4.44 Rappresen-
tazione schematica
dell'apparecchiatura di
prova (T1 - trave fissa,
T2 - trave mobile, A1 -
attuatori fuori piano, A2
- attuatori nel piano).
Fonte: Relazione tecnica
Metra.

La quinta parte descrive il **Set-up di prova**. Sono state riportate in foto le fasi salienti della posa della facciata (Figure 4.45, 4.46,4.47).
Le ultime due parti trattano rispettivamente i **risultati** e le **limitazioni**.

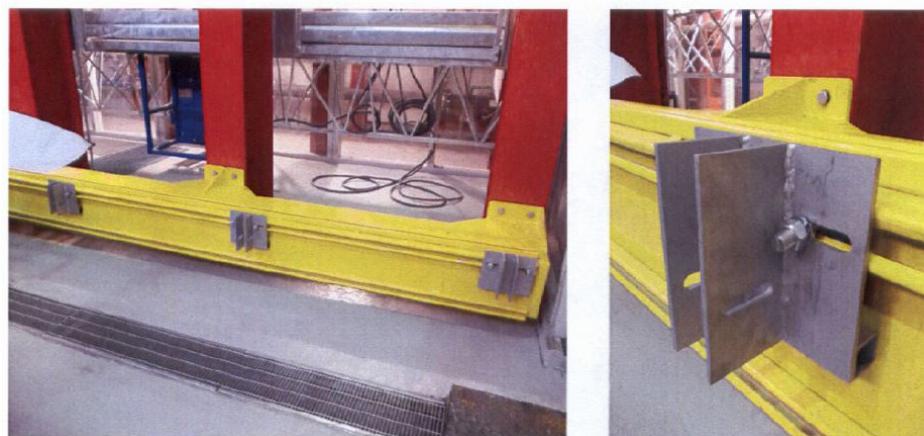


Fig. 4.45 Posizionamen-
to delle staffe sulla trave
fissa di base (sinistra)
e dettaglio della staffa
(destra).
Fonte: Relazione tecnica
Metra.



Fig. 4.46 Fasi salienti del posizionamento del campione sull'apparecchiatura di prova. Montaggio montanti, traversi e reticolo montanti-traversi.
Fonte: Relazione tecnica Metra.



Fig. 4.47 Fasi salienti del posizionamento del campione sull'apparecchiatura di prova. Installazione lastre di vetro, posa di coprigiunti ed altri elementi di completamento, completamento facciata.
Fonte: Relazione tecnica Metra.

I risultati sono descritti ampiamente nel capitolo finale, e comprendono anche considerazioni sulla conformità ai requisiti richiesti.

Per quanto riguarda le limitazioni viene esplicitamente detto che la prova non rappresenta una valutazione di idoneità all'uso né un certificato di conformità del prodotto; e che i risultati ottenuti si riferiscono esclusivamente ai campioni sottoposti a prova.

Riferimenti bibliografici

American Architectural Manufacturers Association, *AAMA 501.4-00 Recommended Static Test Method For Evaluating Curtain Wall and Storefront Systems Subjected to Seismic And Wind Induced Interstory Drifts*, *AAMA 501.6-01 Recommended Dynamic Test Method For Determining The Seismic Drift Causing Glass Fallout From A Wall System*, (2001), 20 pages.

Autodesk, *Integrating Autodesk Revit, Revit Structure, and Robot Structural Analysis Professional*, 2014 (29 pages).

Bedon, C., Zhang, X., Santos, F., Honfi, D., Kozłowski, M., Arrigoni, M., ... & Lange, D., *Performance of structural glass facades under extreme loads—Design methods, existing research, current issues and trends*. *Construction and Building Materials*, 163, pp. 921-937, (2018).

Behr, R. A., *Architectural Glass to Resist Seismic and Extreme Climatic Events*, Woodhead Publishing Limited, (2009).

Istituto per le Tecnologie della Costruzione, *Relazione tecnica, Facciata continua in alluminio a montanti e traversi, denominata "Poliedra SKY 50"*, 2017.

Riferimenti sitografici

Autodesk, *Recap*, <https://www.autodesk.com/products/recap/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Autodesk, *Revit: software BIM per progettisti, costruttori e responsabili*, <https://www.autodesk.it/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Autodesk, *Robot Structural Analysis*, <https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

CSI italia srl, *Sap2000 software di analisi strutturale*, <https://www.csi-italia.eu/software/sap2000/>

Leica BLK 360, *Laser scanner*, <https://shop.leica-geosystems.com/it-IT/leica-blk/blk360>

Leica Cyclone, *Elaborazione nuvole di punti 3D*, <https://leica-geosystems.com/it-it/products/laser-scanners/software/leica-cyclone>

Conclusioni

Chapter 5 returns the concluding section of the thesis.

The application of the seismic test on the Poliedra Sky 50 façade, the case study of the research, was replicated on multiple situations: (i) digitization of the test emulating the laboratory; (ii) digitization of the test on a real building envelope; and (iii) 1:1 scale laboratory testing. This choice made it possible to compare and analyze the results found in a broader view, offering greater advantages than a single analysis.

This chapter returned the results obtained for the different scenarios considered. In addition, a comparison between them was performed. It was found that: (i) for all the scenarios analyzed, the dynamic seismic test according to American standards was passed; (ii) the results of the laboratory test coincide with those of the digitized test; (iii) the application of the digitized test on the existing case shows higher displacements, compared to the other scenarios, due to the presence of a single moving beam.

In conclusion, the results obtained show a significant advantage in the digitization of tests that are required by the standards, which results in a reduction of the design process time and cost of experimental tests. It is good to remember that this procedure does not replace the tests carried out in the laboratory, but has the exclusive purpose of anticipating their results with a good approximation, leading to substantial advantages in terms of cost and time.

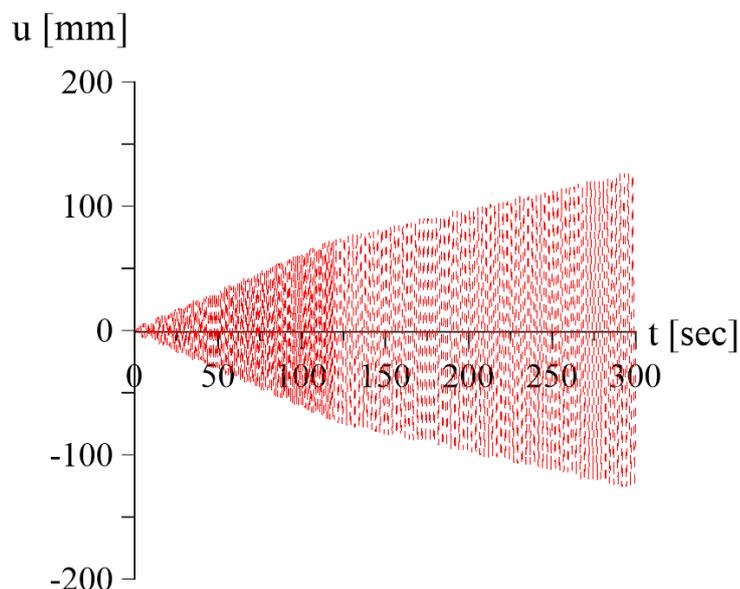


Fig. 5.1. Crescendo test realizzato su Wolfram Mathematica 13.

5.1 Risultati

I risultati dell'applicazione della prova sismica dinamica sono stati suddivisi per i tre differenti scenari, per poi essere messi a confronto tra loro al fine di effettuare le dovute considerazioni. Sono stati esaminati, come riportato dalla prova, i drift di piano, nonché lo spostamento relativo tra un pannello e l'altro, e ovviamente le condizioni di resistenza dei pannelli di vetro, al fine di valutare l'eventuale rottura o caduta di pezzi di vetro.

Scenario 1 - Simulazioni e verifiche prestazionali digitali che emulano il laboratorio

Il primo caso riguarda la facciata Poliedra Sky 50 sottoposta digitalmente esattamente al test che viene realizzato in laboratorio, replicando le stesse modalità e le stesse condizioni di quest'ultimo. Sono stati analizzati:

1. Spostamenti trasversi;
2. Drift di piano;
3. Rottura del vetro;
4. Spostamento trave centrale e trave superiore.

1. Spostamenti trasversi

Numero trasverso	Spostamento massimo (m)	Spostamento minimo (m)
1	2.086×10^{-11}	-2.01×10^{-11}
2	0.050673	-0.050840
3	0.107067	-0.107055
4	0.059170	-0.059104
5	0.102305	-0.102452

2. Drift di piano

Drift di piano = |Spostamento trasverso superiore - spostamento trasverso inferiore|

Numero piano	Drift di piano (spostamento massimo)	Drift di piano (spostamento minimo)
1	0.050673	0.05084
2	0.056394	0.056215
3	0.048013	0.047951
4	0.043135	0.043348

Il drift di piano, secondo il test AAMA 501.6-09, deve risultare minore del 10% dell'altezza del pannello, ovvero il 10% di 1.95m. In tale senso la prima verifica è soddisfatta.

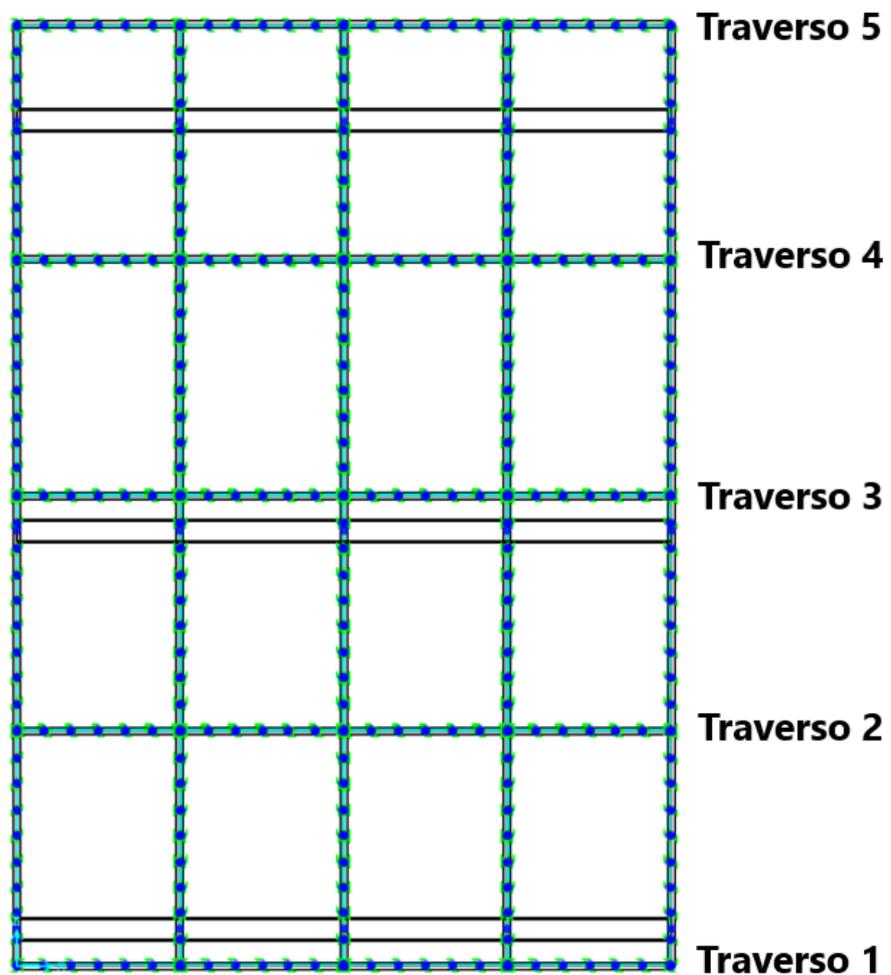


Fig. 5.2 Numero traversi caso 1 Sap2000.

3. Rottura del vetro

Il vetro possiede una elevata resistenza a compressione, ma allo stesso tempo, essendo un materiale fragile, può andare facilmente in crisi se soggetto a trazione. Il rischio è la rottura del vetro, con conseguente caduta di frammenti. Risulta perciò indispensabile valutare se i pannelli in vetro della facciata, applicata la prova sismica secondo normativa americana, garantiscono o meno una determinata resistenza a trazione. È chiaro che, applicando un test che spinge l'involucro fino allo stato limite ultimo, è ammissibile un lieve danneggiamento del vetro sotto l'applicazione di elevati spostamenti. La verifica consiste nel provare se il valore massimo di resistenza a trazione viene superato o meno.

I valori della sollecitazione a trazione più elevati nei pannelli di vetro, come è possibile vedere dalla figura 5.3, si verificano al di sotto del quarto traverso e al di sopra del terzo. I valori ricavati rientrano nel range di ammissibilità riportato nella tabella 3.6 sulle caratteristiche meccaniche del vetro.

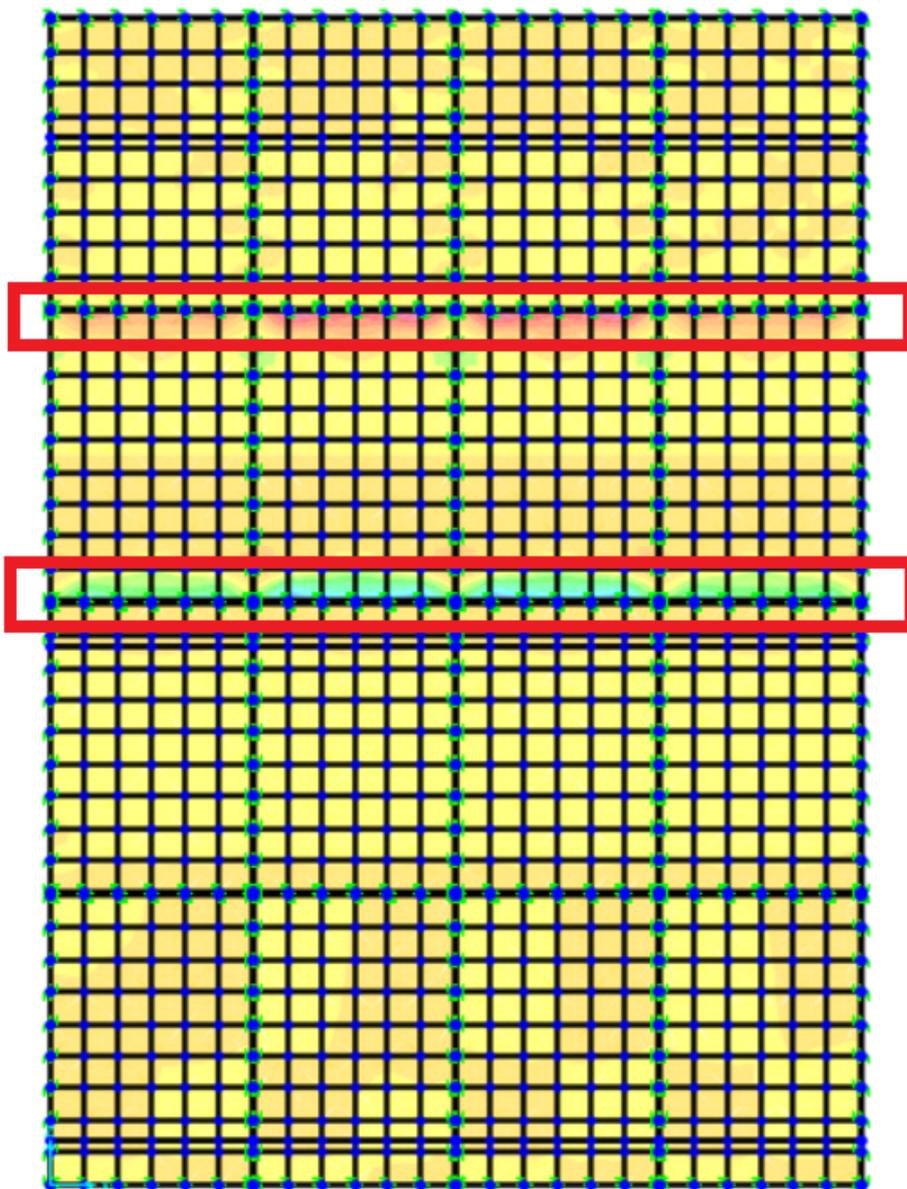


Fig. 5.3 Crisi pannelli di vetro caso 1.

4. Spostamento trave centrale e trave superiore

Altri utili risultati da visionare riguardano gli spostamenti che si vanno a creare nella trave centrale e in quella superiore. In particolare nelle figure 5.4 e 5.5 sono stati raffigurati rispettivamente gli spostamenti ottenuti nella trave centrale e in quella superiore per il caso 1. Come si può notare l'andamento degli spostamenti è molto simile alla storia temporale a cui sono sottoposti.

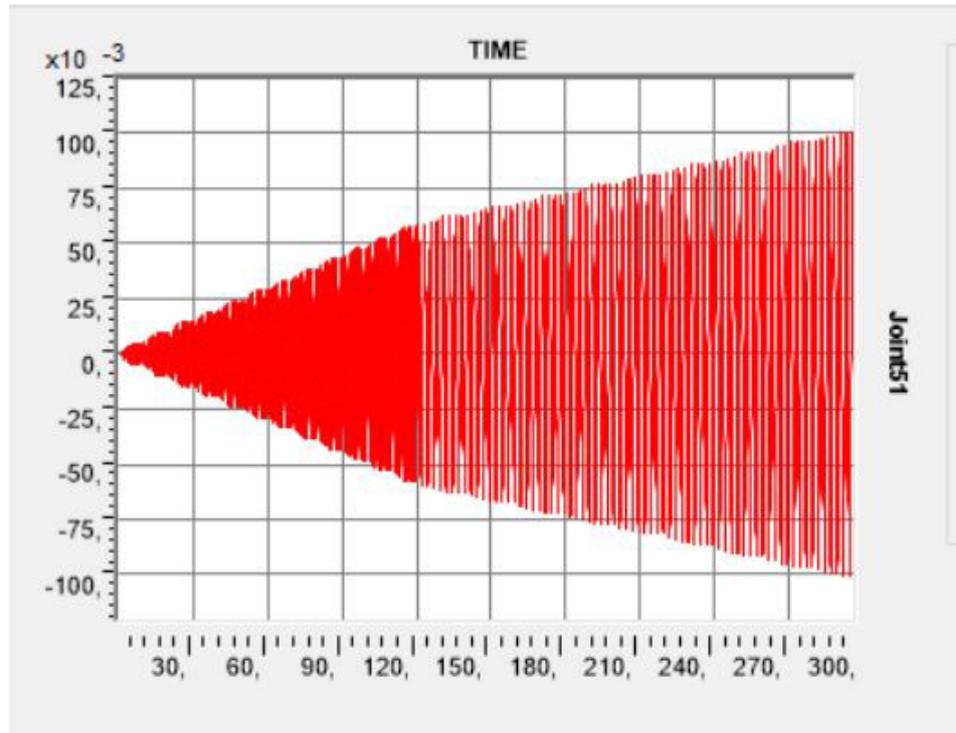


Fig. 5.4 Spostamenti trave centrale caso 1.

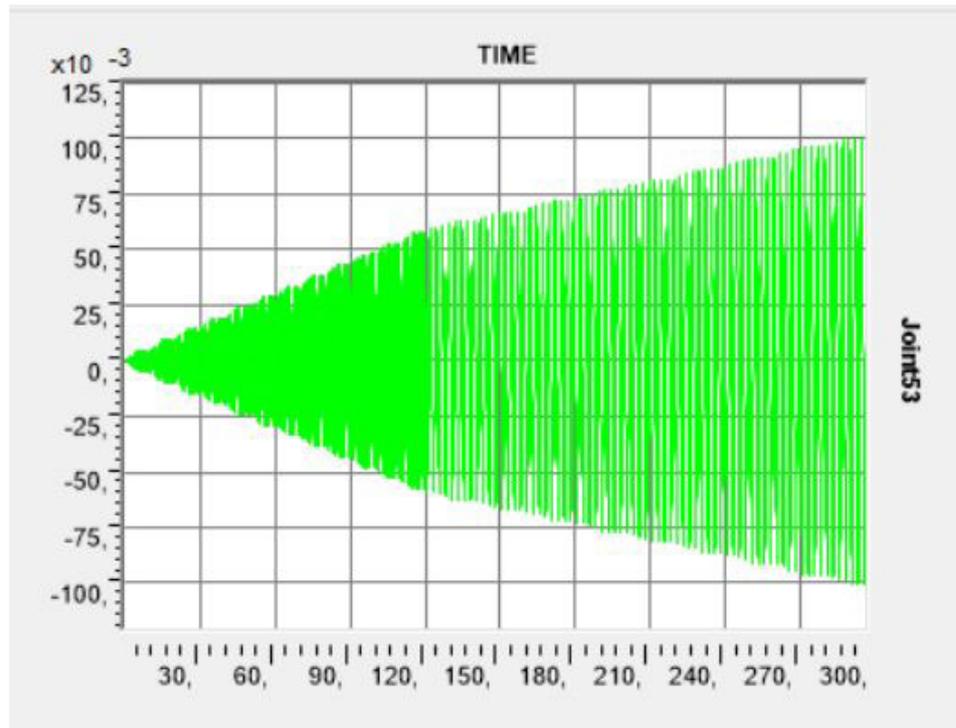


Fig. 5.5 Spostamenti trave superiore caso 1.

Scenario 2 - Simulazioni e verifiche prestazionali digitali dell'esistente

Il secondo scenario riguarda la facciata Poliedra Sky 50 del lato sud del plesso di Architettura dell'Università Mediterranea di Reggio Calabria. L'involucro è stato sottoposto digitalmente alla prova sismica dinamica secondo normativa Americana. Analogamente al primo caso, sono stati attenzionati i seguenti risultati:

1. Spostamenti trasversi
2. Drift di piano
3. Rottura del vetro
4. Spostamento trave centrale

1. Spostamenti trasversi

Numero traverso	Spostamento massimo (m)	Spostamento minimo (m)
1	7.526×10^{-14}	-7.441×10^{-14}
2	0.013153	-0.013316
3	0.061443	-0.060466
4	0.097158	-0.097671
5	0.117645	-0.118683
6	0.201416	-0.200710
7	0.308563	-0.309350

2. Drift di piano

Drift di piano = |Spostamento trasverso superiore - spostamento trasverso inferiore|

Numero piano	Drift di piano (spostamento massimo)	Drift di piano (spostamento minimo)
1	0.013153	0.013316
2	0.047313	0.048127
3	0.036692	0.036228
4	0.020487	0.021012
5	0.083771	0.082027
6	0.107147	0.108640

Il drift di piano deve risultare minore del 10% dell'altezza del pannello. Il primo pannello è alto 1.01 m, il secondo ed il terzo 1.27 m, mentre gli ultimi tre hanno un'altezza di 1.19 m. Tutte i drift di piano risultano essere minore del 10% dell'altezza del rispettivo pannello, per cui la verifica è soddisfatta.

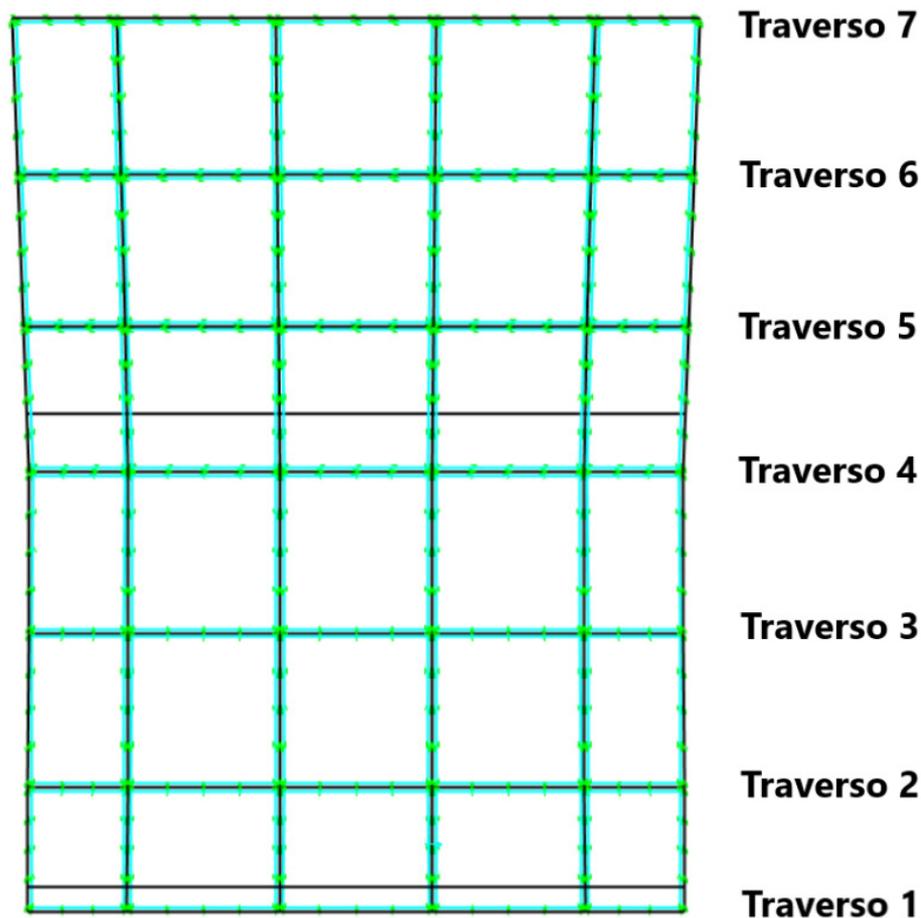


Fig. 5.6 Numero traversi caso 2 Sap2000.

3. Rottura del vetro

Anche in questo caso risulta indispensabile valutare se i pannelli in vetro della facciata, applicata la prova sismica secondo normativa americana, garantiscono o meno una determinata resistenza a trazione. La verifica consiste nel provare se il valore massimo di resistenza a trazione viene superato o meno.

I valori della sollecitazione a trazione più elevati nei pannelli di vetro, come è possibile vedere dalla figura 5.7, si verificano al di sotto del quinto traverso e al di sopra del quarto, in corrispondenza della trave sottoposta agli spostamenti della storia temporale. I valori ricavati rientrano nel range di ammissibilità riportato nella tabella 3.6 sulle caratteristiche meccaniche del vetro.

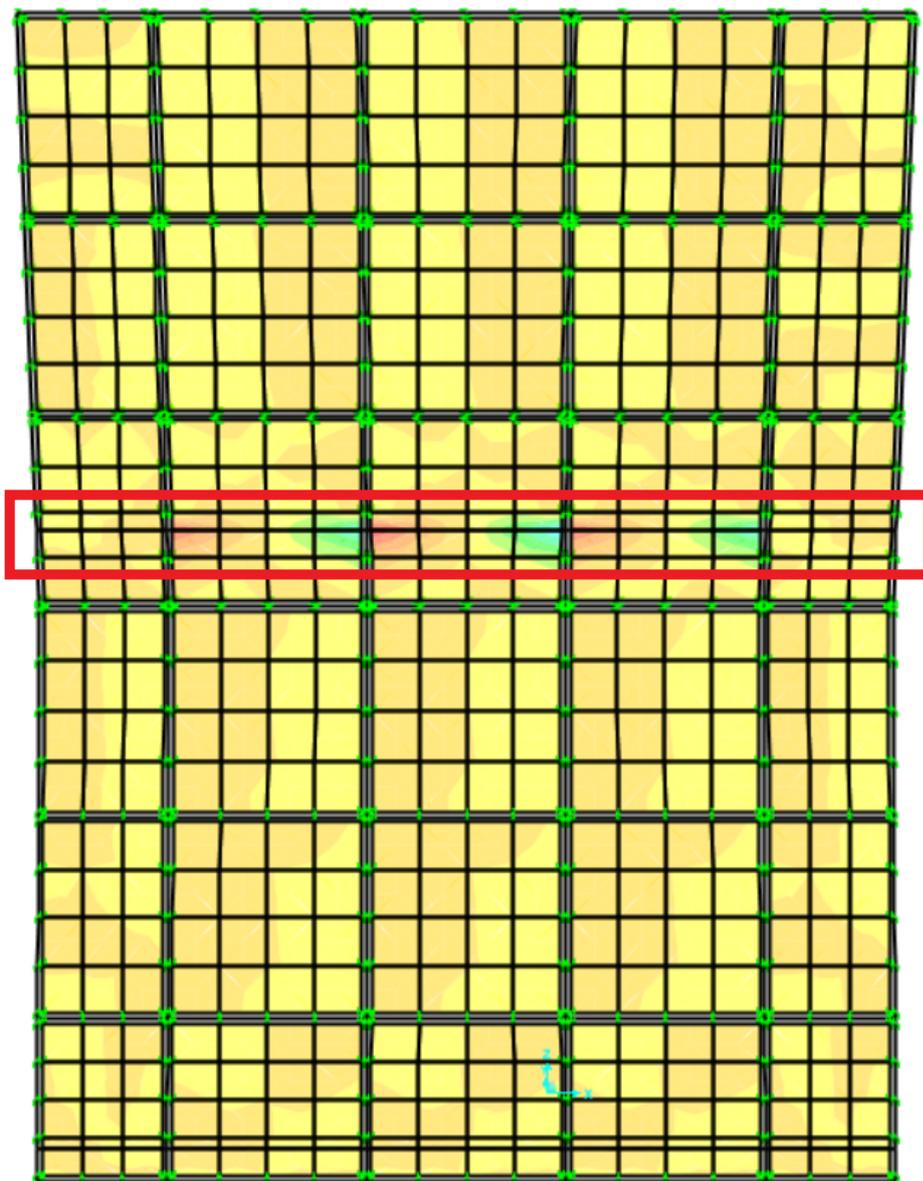


Fig. 5.7 Crisi pannelli di vetro caso 2.

4. Spostamento trave centrale

Altri utili risultati da visionare riguardano gli spostamenti che si vanno a creare, in questo caso, esclusivamente nella trave centrale, essendo assente quella superiore. In particolare nella figura 5.8 viene riportato lo spostamento ottenuto nella trave centrale per il caso 2. Anche in questo caso l'andamento degli spostamenti è molto simile alla storia temporale a cui sono sottoposti.

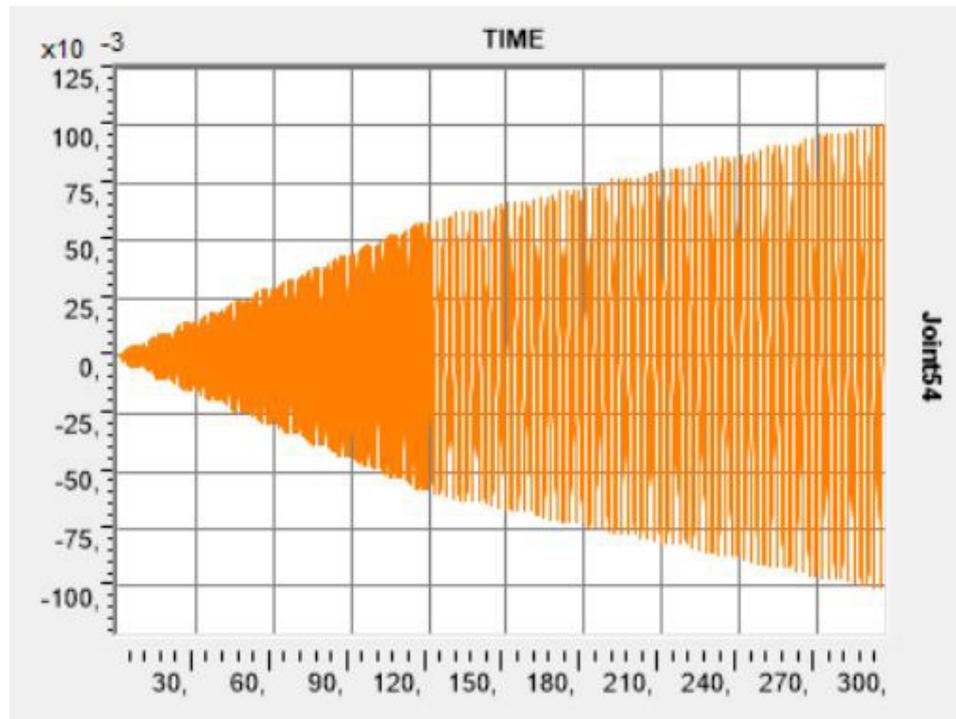


Fig. 5.8 Spostamenti trave centrale caso 2.

Scenario 3 - Simulazioni e verifiche prestazionali di laboratorio

Il terzo caso riguarda la simulazione della prova AAMA 501.6-09 effettuata presso il laboratorio ITC del CNR su una facciata Poliedra Sky 50. Tale involucro ha le stesse caratteristiche e geometrie di quello digitalizzato nel caso 1.

I risultati qui di seguito riportati sono stati forniti dalla Metra.

La figura 5.9 mostra i pannelli di vetro che vanno in crisi (cerchio rosso); la loro posizione coincide con quella ricavata dalla digitalizzazione della medesima prova sulla stessa facciata (scenario 1).

Nelle figure 5.10 e 5.11 sono stati invece raffigurati gli spostamenti nel tempo della trave centrale e di quella superiore.

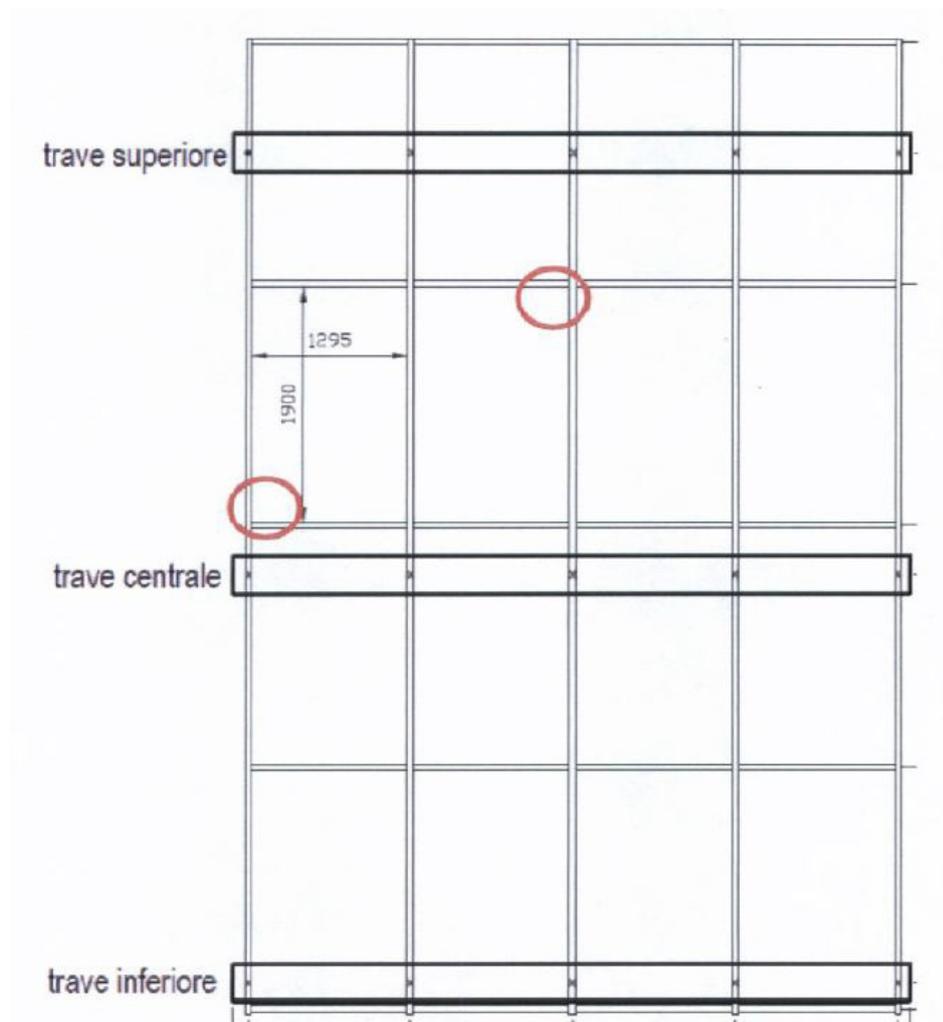


Fig. 5.9 Crisi pannelli di vetro caso 3.
Fonte: Relazione tecnica Metra.

Fig. 5.10 Spostamenti trave centrale caso 3.
Fonte: Relazione tecnica Metra.

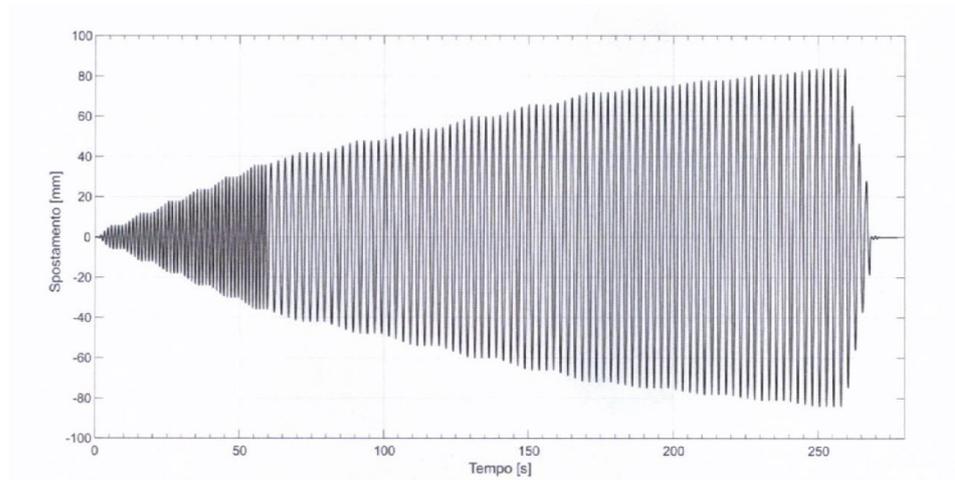


Fig. 5.11 Spostamenti trave superiore caso 30.
Fonte: Relazione tecnica Metra.

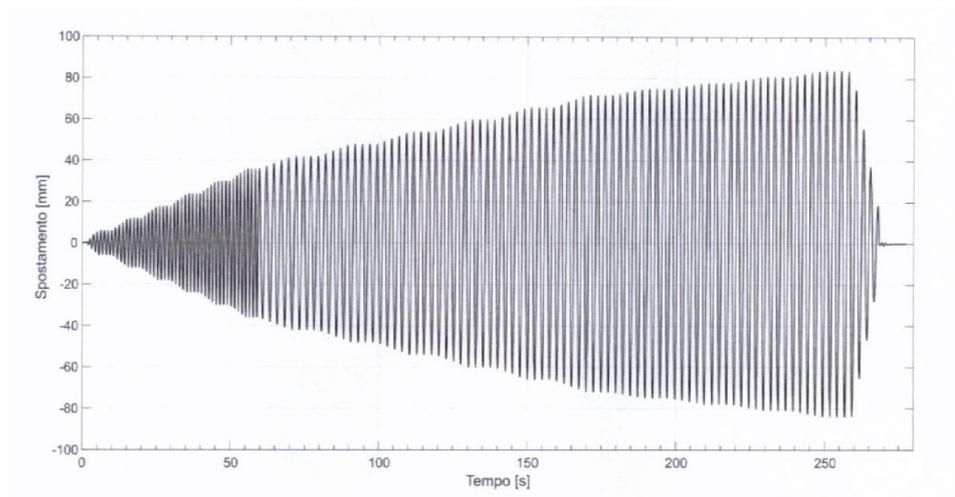


Fig. 5.12 Fotografia rottura vetro.
Fonte: Relazione tecnica Metra.

Confronto tra i risultati

L'applicazione della prova sismica sulla facciata Poliedra Sky 50, caso studio della ricerca, è stato replicato su più situazioni: (i) digitalizzazione del test che emula il laboratorio; (ii) digitalizzazione del test su un involucro reale; (iii) test in laboratorio in scala 1:1. Questa scelta ha permesso di confrontare e analizzare i risultati trovati in una visione più ampia, offrendo maggiori vantaggi rispetto ad una singola analisi.

In questa sezione del capitolo 5, i risultati dei tre scenari descritti precedentemente sono stati messi a confronto tra loro al fine di restituire una verifica sulle analisi effettuate maggiormente attendibile. Si prevedono dei risultati analoghi tra il test digitalizzato ed applicato al primo scenario, con quello della stessa prova applicata invece in scala 1:1 in laboratorio (terzo scenario). L'aspetto innovativo risiede principalmente nel confronto tra questi due casi con l'applicazione del medesimo test digitalizzato su una facciata esistente (secondo scenario). Lo scopo è stato quello di verificare se i risultati del test realizzato in laboratorio sono effettivamente confermati se applicati ad un caso esistente.

Il confronto è stato effettuato inizialmente in termini di spostamenti.

1. Confronto spostamenti tra il primo ed il secondo scenario

- Spostamenti del traverso posizionato sopra la trave mobile centrale:

Nel grafico in figura 5.13 è rappresentata la storia temporale degli spostamenti del traverso posizionato sopra la trave mobile centrale per il primo ed il secondo scenario. Si evince che gli spostamenti per il caso 2 sono maggiori rispetto a quelli del caso 1.

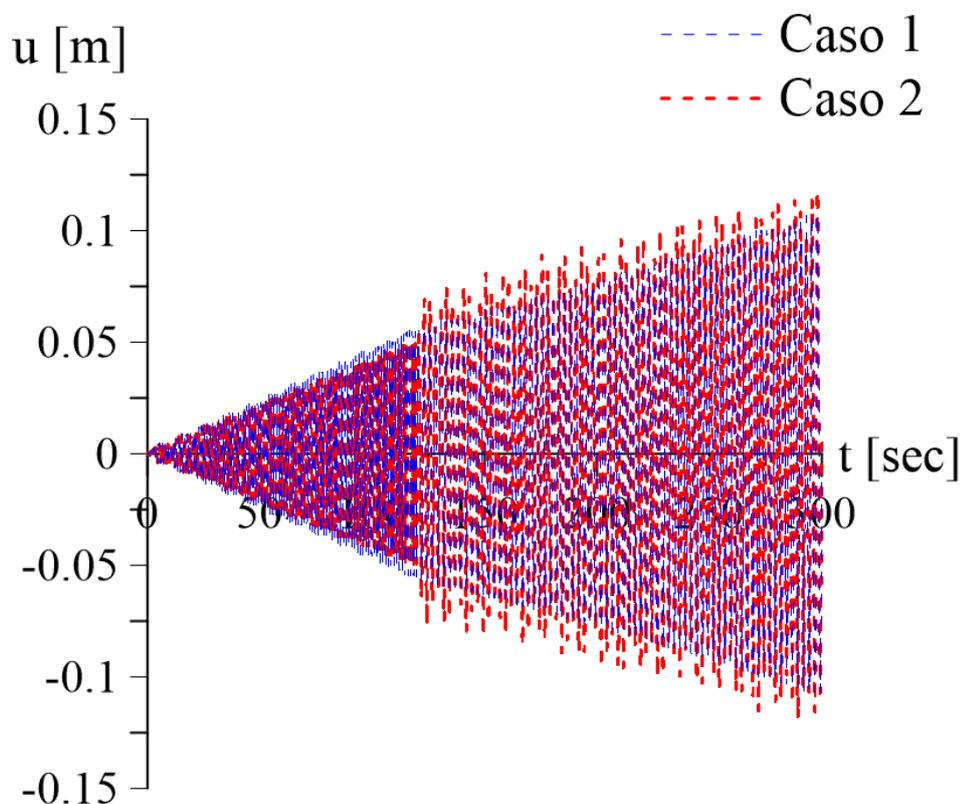


Fig. 5.13 Storia temporale degli spostamenti del traverso posizionato sopra la trave mobile centrale per lo scenario 1 e 2.

- **Spostamenti del traverso superiore:**

Nel grafico in figura 5.14 è rappresentata la storia temporale degli spostamenti del traverso superiore per il primo ed il secondo scenario. Si evince, anche in questo caso, che gli spostamenti per il caso 2 sono maggiori rispetto a quelli del caso 1. In particolare, per lo scenario reale, si nota un elevato incremento degli spostamenti e un discostamento dal regolare andamento della storia temporale applicata all'involucro, in quanto rispetto al caso 1 è assente la seconda trave mobile superiore.

Per completezza, è stata anche rappresentata, in figura 5.15, la storia temporale degli spostamenti del quarto traverso per il primo caso e del sesto traverso per il secondo. Anche in questa occasione gli spostamenti per il secondo scenario sono notevolmente più elevati.

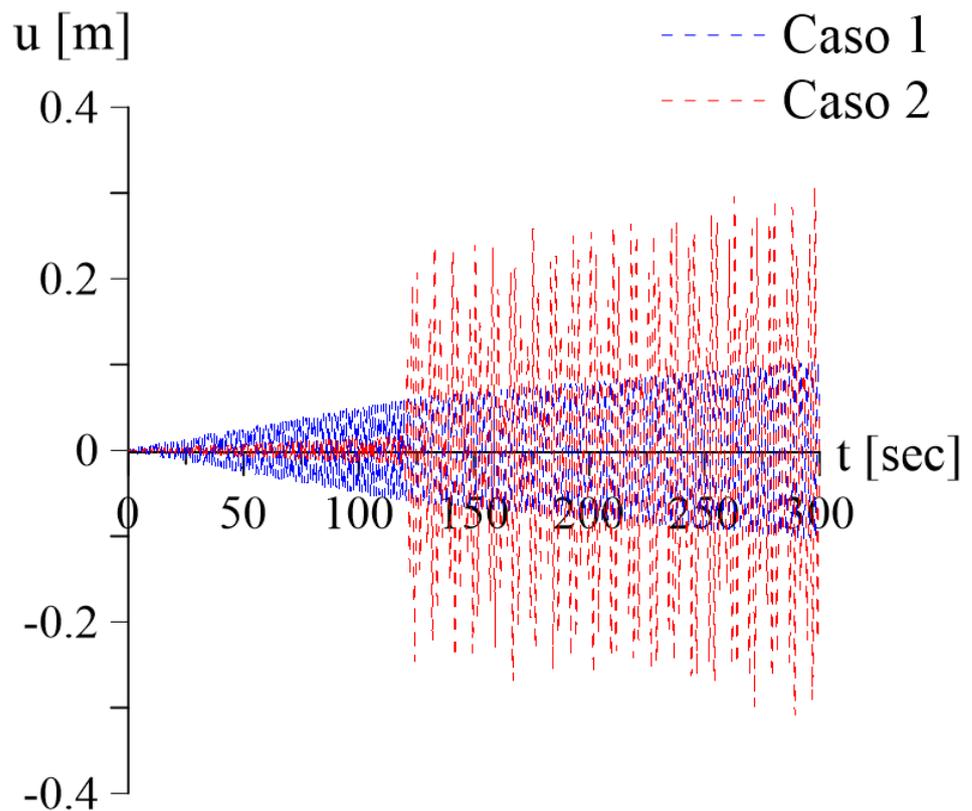


Fig. 5.14 Storia temporale degli spostamenti del traverso superiore per lo scenario 1 e 2.

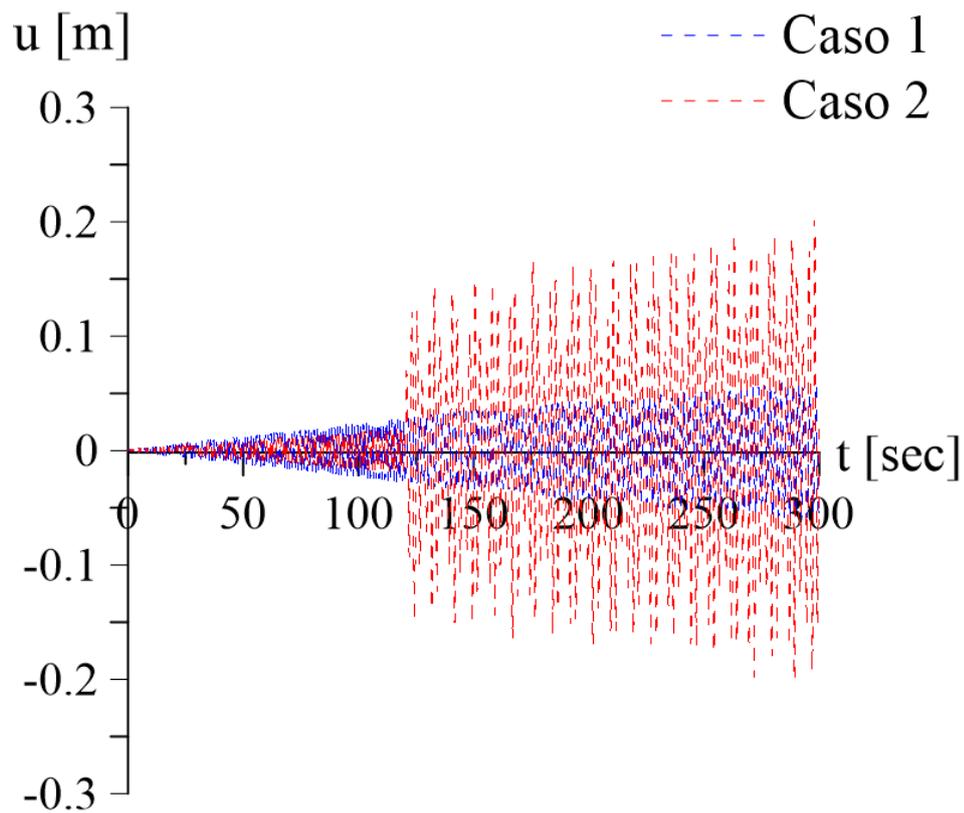


Fig. 5.15 Storia temporale degli spostamenti del quarto traverso per il primo caso e sesto per il secondo caso.

2. Confronto spostamenti tra il primo ed il secondo scenario

- Spostamenti trave mobile centrale:

Nelle figure 5.16 e 5.17 sono state rappresentate la storia temporale degli spostamenti rispettivamente della trave mobile centrale e superiore per il caso 1 (in rosso) e il caso 3 (in grigio). Si nota come, in entrambi i grafici, i due diagrammi sono quasi del tutto sovrapponibili, il che conferma la correttezza del test digitalizzato nei confronti della prova realizzata in scala 1:1 presso il laboratorio ITC del CNR.

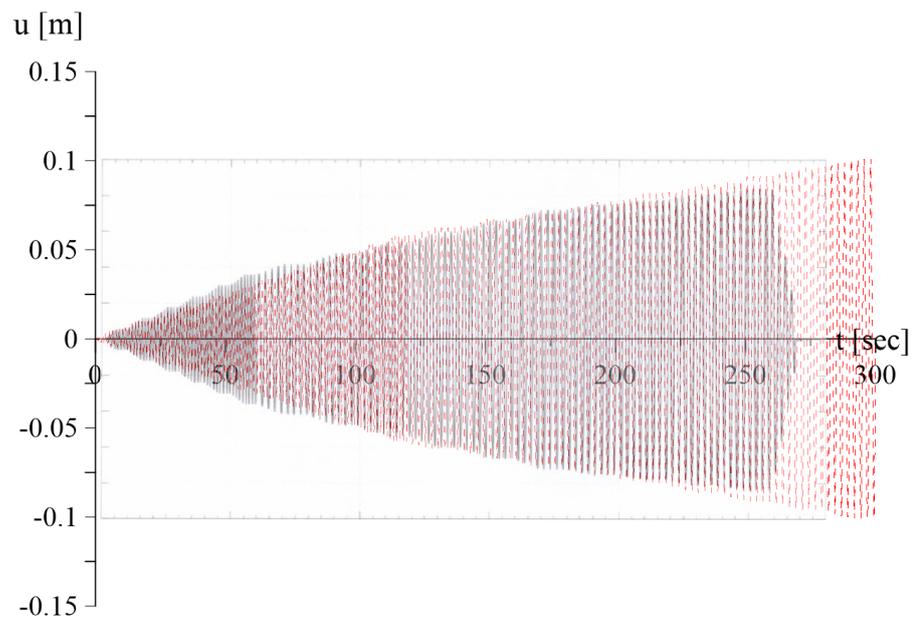


Fig. 5.16 Storia temporale degli spostamenti della trave mobile centrale per il primo (rosso) e il terzo caso (grigio).

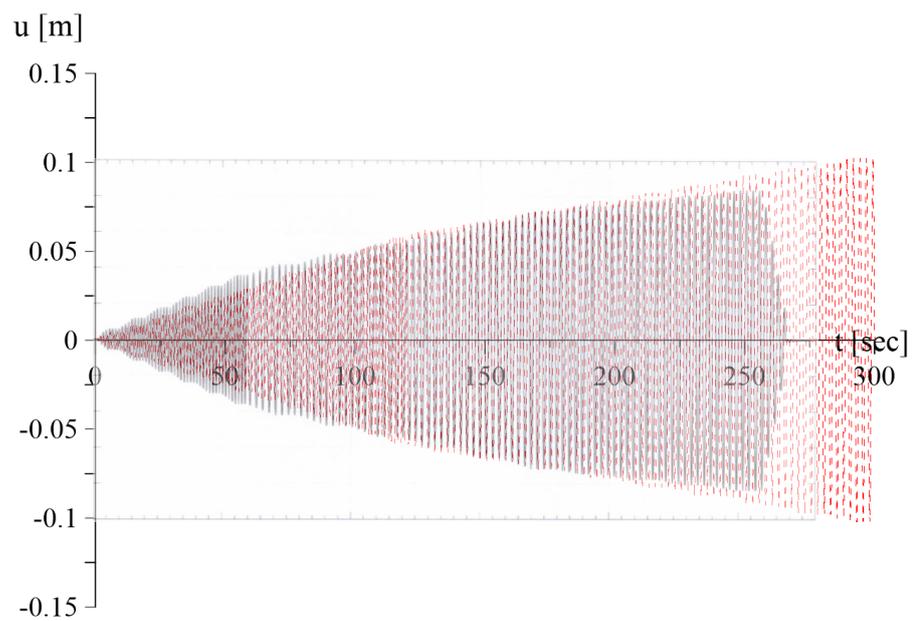


Fig. 5.17 Storia temporale degli spostamenti della trave mobile superiore per il primo (rosso) e il terzo caso (grigio).

5.2 Considerazioni conclusive

La ricerca ha portato alla realizzazione di modelli tridimensionali digitalizzati di involucro edilizio in BIM su Autodesk Revit; e alla digitalizzazione della prova sismica dinamica secondo normativa americana AAMA 501.6-09 su un software di analisi strutturale, Sap2000. Inoltre il confronto tra i tre scenari ha portato ad una visione più ampia dei risultati, validando i risultati del test in laboratorio anche per lo scenario dell'involucro esistente.

Da un'analisi sull'**interoperabilità** si evince che il trasferimento delle informazioni tra il software BIM e quello dedicato all'analisi strutturale ha ancora forti limitazioni. Infatti, in seguito ad ogni trasferimento è necessario fare molta attenzione agli avvisi che si presentano e porre rimedio dove possibile. Successivamente si deve effettuare un controllo sistematico delle informazioni effettivamente trasferite considerando geometria degli elementi, caratteristiche fisiche e meccaniche dei materiali, ecc. La metodologia alla quale si aspira in futuro è quella di uno **scambio continuo** tra i software di progettazione, dalla modellazione architettonica all'analisi strutturale e viceversa, senza perdita di informazioni e senza la necessità di un controllo manuale sugli elementi.

Dalle analisi effettuate sull'applicazione della prova sismica secondo normativa Americana AAMA 501.6-09 sui tre scenari è emerso che:

1. per tutti i casi analizzati la prova sismica dinamica è stata superata;
2. i risultati del test in laboratorio coincidono con quelli della prova digitalizzata;
3. l'applicazione della prova digitalizzata sul caso esistente causa degli spostamenti più elevati, rispetto agli altri scenari, dovuti alla presenza di un'unica trave mobile.

Con lo scopo di rendere sempre più veritieri i risultati ricavati per il caso esistente, potrebbe essere interessante assumere, prima dell'applicazione del test dinamico, degli spostamenti all'involucro (che rientrano nei limiti forniti dalla normativa di riferimento); e valutare se in queste condizioni il test digitalizzato è ancora funzionale e se di conseguenza restituisce gli stessi risultati ricavati in laboratorio. Questa verifica potrebbe essere una via da percorrere per **sviluppi futuri**, associata alla digitalizzazione delle altre prove strutturali o ambientali e tecnologiche.

In conclusione, è chiaro che la simulazione digitalizzata del test in laboratorio porta vantaggi sia di **riduzione dei tempi** del processo di progettazione e sia di **riduzione dei costi** delle prove sperimentali. Infatti ricavare dei risultati in maniera digitale prima di effettuare le prove in scala 1:1 in laboratorio offre vantaggi in termini economici e di tempo sia all'istituto incaricato della realizzazione dei test e sia al progettista dell'involucro. Con tale procedura, il rischio di non superamento delle prove, con un conseguente risparmio economico, su una determinata facciata si riduce notevolmente.

Riferimenti bibliografici

- AAMA 501.1-17, *Standard Test Method for Water Penetration of Windows, Curtain Walls and Doors Using Dynamic Pressure*
- AAMA-501.5, *Test Method for Thermal Cycling of Exterior Walls*, (2007)
- Airoldi Metalli S.P.A., Scheda prodotto alluminio lega EN AW 6060.
- Amann, J., Singer, D., and Borrmann, A., *Extension of the upcoming IFC alignment standard with cross sections for road design*, (2015).
- American Architectural Manufacturers Association, *AAMA 501.4-00 Recommended Static Test Method For Evaluating Curtain Wall and Storefront Systems Subjected to Seismic And Wind Induced Interstory Drifts, AAMA 501.6-01 Recommended Dynamic Test Method For Determining The Seismic Drift Causing Glass Fallout From A Wall System*, (2001), 20 pages.
- ARUP, *Digital twin*. london. www.arup.com, 2019.
- Ascione, F., Bianco, N., Iovane, T., Mastellone, M., & Mauro, G. M., *The evolution of building energy retrofit via double-skin and responsive façades: A review*. *Solar Energy*, 224, pp. 703-717, (2021).
- Asl, M. R., Bergin, M., Menter, A., Yan, W., *BIM-based Parametric Building Energy Performance Multi-Objective Optimization*, International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 32, Newcastle upon Tyne, (2014) 455-464.
- Asl, M. R., Stoupine, A., Zarrinmehr, S., *Optimo: A BIM-based Multi-Objective Optimization Tool Utilizing Visual Programming for High Performance Building Design*, International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 33, Vienna, (2015) 673-682.
- ASTM E283-04, *Standard Test Method for Determining Rate of Air Leakage Through Exterior Windows, Curtain Walls, and Doors Under Specified Pressure Differences Across the Specimen*, (2012)
- ASTM E331-00, *Standard Test Method for Water Penetration of Exterior Windows, Skylights, Doors, and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference*, (2009)
- ASTM E330, *Standard Test Method for Structural Performance of Exterior Windows, Doors, Skylights and Curtain Walls by Uniform Static Air Pressure Difference*
- Autodesk, *Integrating Autodesk Revit, Revit Structure, and Robot Structural Analysis Professional*, 2014 (29 pages).
- Banham, R., *Architecture of the Well Tempered Environment*. The Architectural Press, London The University of Chicago Press, Chicago. ISBN: 0 85139 074 9, (1969).
- Barbosa, S., Ip, K., *Perspectives of double skin façade for naturally ventilated buildings: A review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40 (2014) 1019–1029.
- Bedon, C., Zhang, X., Santos, F., Honfi, D., Kozłowski, M., Arrigoni, M., ... & Lange, D., *Performance of structural glass façades under extreme loads—Design methods, existing research, current issues and trends*. *Construction and Building Materials*, 163, pp. 921-937, (2018).
- Behr, R. A., *Architectural Glass to Resist Seismic and Extreme Climatic Events*, Woodhead Publishing Limited, (2009).
- Bhusad, A. A., Akhare, A. R., *Application of BIM in Structural Engineering*, SSRG International Journal of Civil Engineering, volume 1 Issue 5 October 2014, (7 pages).
- Böke, J., Knaack, U., Hemmerling, M., *State-of-the-art of intelligent building envelopes in the context of intelligent technical systems*, *Intelligent Buildings International*, Vol 11, n°1 (2019) 27-45.

- Bonham, M.B., *Bioclimatic Double-Skin Façades*, Routledge (2020) (350 pages).
- Bouchard, J., *Digital Twins: Identical, But Different Partner*, Oliver Wyman, Report (2016).
- Brock, L., *Designing the exterior wall: an architectural guide to the vertical envelope*, N.J., John Wiley, Hoboken (2005).
- Bui, N., Merschbrock, C., Munkvold, B. E., *A review of Building Information Modelling for construction in developing countries*, *Procedia Engineering* 164, (2016) 487-494.
- Butera, F., "La trasparenza è sostenibile?", *Modulo* 318, (2006) 4 pages.
- Cardani, G., Angjeliu, G., *Considerazioni sull'interoperabilità tra modelli BIM e l'analisi strutturale degli edifici storici*, *Built Heritage Information Modelling/Management BHIMM PRIN 2010-2011*, (7 pages).
- Cascone, S., *Analysis and design of unitized curtain walls*, In *Colloqui.AT.e 2016 Convegno Ar.Tec – Matera*. [a cura di Guida, A., Pagliuca, A.]. pp. 1-10. Gangemi Editore, Roma, (2016).
- Chen, J., Huang, S., *Adaptive Building Facade Optimisation: An integrated BIM-green approach, Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing*, *Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRIA*, (2016) 259-268.
- Compagno, A., *Intelligent Glass Facades - Material, Pratiche, Design*, Artemis Verlags, Switzerland, Basilea, 1995.
- 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).
- Dawkins, O., Dennett, A., Hudson-Smith, A., *Living with a Digital Twin: Operational management and engagement using IoT and Mixed Realities at UCL's Here East Campus on the Queen Elizabeth Olympic Park*, *Conference Paper*, (2018) 7 pages.
- Dawood, N., Kassem, M., *BIM for facility management: a review and a case study investigating the value and challenges*, *Proceedings of the 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality*, 30-31 October 2013.
- De Gaetani, C. I, Mert, M., Migliaccio, F., *Interoperability Analyses of BIM Platforms for Construction Management*, *applied sciences*, 27 June 2020, (15 pages).
- Di Ruocco, G., *Oltre la facciata. L'evoluzione tecnologica dell'involucro edilizio tra tradizione e innovazione*, CUES Edizioni, Luglio 2012 (294 pages).
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K., Wiley, J. et al, *A guide to Building Information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*, *Bim Handbook*, Secondaz Edizione 2011.
- Elder, KE., *Building Envelope*. In: *Turner, WC., Doy, S., Energy management handbook*, 5th ed., pp. xviii, 856, Lilburn, GA., Fairmont Press; Marcel Dekker, New York (2007) 221-46.
- EU, *Industry 5.0: Towards more sustainable, resilient and human-centric industry*, Report, 2021.
- Faheem, M., Shah, S.B.H, Butt, R.A., et al., *Smart grid communication and information technologies in the perspective of Industry 4.0: Opportunities and challenges*, *Computer Science Review*, 30 (2018) 1-30.
- Fedorko, G., Molnar, V., Vasil, M., Salai, R, *Proposal of digital twin for testing and measuring of transport belts for pipe conveyors within the concept Industry 4.0*, *Measurement* 174 (2021), 14 pages.
- Gerbino, S., Cieri, L., Rainieri, C., Fabbrocino, G., *On BIM Interoperability via the IFC Standard: An Assessment from the Structural Engineering and Design Viewpoint*, *Applied Sciences*, 2021, 11, 11430 (25 pages).
- Gerrish, T., Ruikar, K., Cook, M., Johnson, M., Phillip, M., Lowry, C., *BIM application to building energy performance visualization and management: Challenges and potential*. *Energy and Buildings*, 144 (2017) 218-222.
- Giedion, S., *Spazio, tempo, architettura*, Seconda edizione Hoepli, (1979) 770 pages.
- Haag, S., Anderl, R., *Digital twin – Proof of concept*, *Manufacturing Letters*, 15 (2018) 64-66.
- Huang, C., *Application of BIM Technology Based on Autodesk Revit in Construction and Installation Engineering*, *Avances in Social Science, Education and Humanities Research*, volume 119 (4 pages).
- Ilter, E., Tavil, A., Celik, O. C., *Full-scale performance testing and evaluation of unitized curtain walls*, *Journal of Facade Design and Engineering* 3 (2015) 39-47.
- Istituto per le Tecnologie della Costruzione, *Relazione tecnica, Facciata continua in alluminio a montanti e traversi, denominata "Poliedra SKY 50"*, 2017.
- Kamel, E., Memari, A. M., *Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions*, *Automation in Construction* 97 (2019) 164-180.

- Kazmierczak, K., *Review of curtain walls, focusing on design problems and solutions, Design and Rehabilitation*, Session EE4-1 (2010), 20 pages.
- Kim, H., Asl, M. R., Yan, W., *Parametric BIM-based Energy Simulation for Buildings with Complex Kinetic Façades Leave empty if you require no subtitle*, International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, (2015) 9 pages.
- Kumar, G., Raheja, G., *Design Determinants of Building Envelope for Sustainable Built Environment: A Review*, International Journal of Built Environment and Sustainability, (2016), 111-118.
- Lang, H.K., *Atlante delle Facciate*, Grande Atlante di Architettura (2005).
- Lauria, M., Trombetta, C., Building Future Lab, *Experimental Research for Sustainability in the Building Sector*, Maggioni Ed., 2016.
- Lee, S. H., and Kim, B. G., *IFC extension for road structure and digital modeling*, Procedia Engineering, 14(2011), 1037-1042.
- Legislazione Tecnica, *Norme tecniche per le costruzioni (NTC 2018)*. D. Min. Infrastrutture e Trasporti 17 gennaio 2018. Malik, P. K., Sharma, R., et al. "Industrial Internet of Things and its Applications in Industry 4.0: State of The Art", Computer Communications 166, (2021) 125-139.
- Lim, Y. W., Majid, H. A., Samah, A. A., Ahmad, M. H., BIM and Genetic Algorithm optimisation for sustainable building envelope design, International Journal of Sustainable Development and Planning, (2018) 12 pages.
- Malik, P. K., Sharma, R., et al. "Industrial Internet of Things and its Applications in Industry 4.0: State of The Art", Computer Communications 166, (2021) 125-139.
- Mariano, R. Q., *Responsive Building Envelope Solutions*, DeCivil, Instituto Superior Técnico, Lisbon University, (2018) 11 pages.
- Markova, S., Dieckmann, A., and Russell, P., *Custom IFC material extension*, Proc., 18th Int. Conf. on Comput.-Aided Archi. Desi. Research in Asia, Hong Kong. p13-22 (2013).
- Matthews, R.S., Bury M.R.C., & Redfearn D., *Investigation of dynamic water penetration tests for curtain walling*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 60, pp. 1-16, (1996).
- McFarquhar, D., *The Role of the Building Facade - Curtain Walls*, Building Enclosure Technology & Environment Council (National Institute of Building Sciences), (2012), 11 pages.
- Metra Building, *Catalogo facciate continue*, 2022.
- Ministero dell'Università e della Ricerca, *Programma Nazionale per la ricerca 2021-2027*, Delibera n.74/2020 182 pages.
- Modin, H., *Adaptive building envelopes*, Master's Thesis, (2014), 147.
- Mohtashami, N., Fuchs, N., Fotopoulou, M., Drosatos, P., Streblov, R., Osterhage, T., & Müller, D., *State of the Art of Technologies in Adaptive Dynamic Building Envelopes (ADBEs)*, Energies, 15(3), 829-, (2022).
- Najafi, E., Faizi, M., *Evolution of Building Envelopes through Creating Living Characteristics*, Journal of Civil Engineering and Architecture 11 (2017) 1186-1202.
- Nataphra, W., Yabuki, N., Fukuda, T., *Optimizing the evaluation of building envelope design for thermal performance using a BIM-based overall thermal transfer value calculation*, Building and Environment, 136 (2018) 128-145.
- Ren, R., Zhang, J., Dib, H. N., *Bim interoperability for structural analysis*, Proc., ASCE Construction Research Congress, ASCE, Reston, VA, 470-479 (2018).
- Romano, R., *Evoluzione delle prestazioni energetiche dell'involucro architettonico - Energy performance evolution of the building envelope*, Recupero bioclimatico edilizio e urbano. Strumenti, tecniche e casi studio, (2010) pp.95-103.
- Romano, R., Aelenei, L., Aelenei, D., & Mazzucchelli, E. S., *What is an adaptive façade? Analysis of Recent Terms and definitions from an international perspective*, Journal of Facade Design and Engineering, 6(3), pp. 65-76, (2018).
- Sadineni, S. B., Madala, S., Boehm, R. F., *Passive building energy savings: A review of building envelope components*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011) 3617-3631.
- Samir H., Shahin M., *Adaptive building envelopes of multistory buildings as an example of high performance buildings skin*, Alexandria Engineering Journal, (2019) 58 345-352.
- Sanders, R. M., & Craig, A., *Preventing and Treating Failure in Glazed Curtain Wall Systems*. Journal of architectural technology ISSUE 2/2012, Vol. 29, pp. 1-8. Hoffmann Architects, Inc., (2012).

Shen, Y. T., Lu, P. W., *The development of kinetic façade units with BIM-based active control system for the adaptive building energy performance service*, *Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing*, Proceedings of the 21st International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia CAADRRIA, (2016) 517-526.

Tatano V., Rossetti, M., *Le facciate continue*, G-Day, 25 ottobre 2007 (70 pages).

Taveres-Cachat, E., Grynning, S., Thomsen, J., Selkowitz, S., *Responsive building envelope concepts in zero emission neighborhoods and smart cities - A roadmap to implementation*, *Building and Environment* 149 (2019) 446-457.

Tuhus-Dubrow, D., Krarti, M., *Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings*, *Building and Environmental* 45, (2010) 1574-1581.

Wael Salah, M. A.R., *Thermal performance optimization of parametric building envelope based on bio-mimetic inspiration*, *Ain Shams Engineering Journal*, (2020) 10 pages.

Wan, C., Chen, P., and Tiong, R. L. K., *Assessment of IFCs for structural analysis domain*, *J., Information Technology in Construction*, 9 (2004).

Warner, S. A., *Test methods for performance of glazing systems and exterior walls during earthquakes and extreme climatic events*, *Civil and Structural Engineering*, (2009) pages 232-251.

William, F., *The Importance of BIM in Structural in Structural Engineering*, *The Greatest Change in Over a Century*, *Structure magazine*, (2008).

William J. R. Curtis, *L'architettura moderna dal 1900*, terza edizione Phaidon, (2006) 736 pages.

Wyckmans, A., *Intelligent Building Envelopes. Architectural Concept & Applications for Daylighting Quality*, Norwegian University of Science and Technology – Faculty of Architecture and Fine Art, Trondheim, Norway, PhD Thesis, (2005).

Yaik-Wah, L., Azurah, A.S., Hairudin, A. M., Mohd, H., A., et al., *BIM and Genetic Algorithm optimization for sustainable building envelope design*, *International Journal of Sustainable Development and Planning*, (2018) 151-159.

Zhang, J., and El-Gohary, N., *Extending building information models semi-automatically using natural language processing techniques*, *J. Comput. in Civ. Eng.*, 30(5), 2016.

Zotkin, S. P., Ignatova, E. V., Zotkina, I. A., *The Organization of Autodesk Revit Software Interaction with Applications for Structural Analysis*, *Procedia Engineering* 153, (2016) 915-919.

Riferimenti sitografici

ArchiExpo, <https://www.archiexpo.it/prod/focchi/product-149696-1712551.html>

Autodesk, *Recap*, <https://www.autodesk.com/products/recap/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Autodesk, *Revit: software BIM per progettisti, costruttori e responsabili*, <https://www.autodesk.it/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

Autodesk, *Robot Structural Analysis*, <https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>

BibLusBIM, [www. https://bim.acca.it/legame-bim-ifc/](http://www.bim.acca.it/legame-bim-ifc/)

Caneva serramenti, <https://www.canevasrl.it/project/facciate-continue/>

CSI italia srl, *Sap2000 software di analisi strutturale*, <https://www.csi-italia.eu/software/sap2000/>

Falar, <https://www.falar.it/facciate-continue/facciata-continua-strutturale/>

IDEA StatiCa, *Sap2000 Steel*, <https://www.ideastatica.com/it/bim/sap2000steel>

Istituto per le tecnologie della costruzione, *Missione*, <https://www.cnr.it/istituto/101/istituto-per-le-tecnologie-della-costruzione-itc>

Leica BLK 360, *Laser scanner*, <https://shop.leica-geosystems.com/it-IT/leica-blk/blk360>

Leica Cyclone, *Elaborazione nuvole di punti 3D*, <https://leica-geosystems.com/it-it/products/laser-scanners/software/leica-cyclone>

Metallbau Bühlmann, <https://www.buehlmann-ag.ch/it/facciate/sistema/facciata-a-montanti-e-traversi/>