



POLITECNICO DI TORINO

DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA E DESIGN

CORSO DI LAUREA IN ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE

TESI DI LAUREA MAGISTRALE:

PROCESSI INTEROPERABILI PER LE VERIFICHE
STRUTTURALI SUL COSTRUITO STORICO

IL CASO STUDIO DEL PALAZZO DEL LAVORO DI PIER LUIGI NERVI

Candidato:

Andrea Trovato

Relatore:

Prof. Massimiliano Lo Turco

Correlatore:

Prof. Emiliano Matta

Dicembre 2019

ABSTRACT

L'obiettivo principale di questo lavoro di tesi è valutare come la modellazione in ambiente BIM, sempre più presente ed in continuo sviluppo in ambito progettuale, possa portare benefici e facilitare il calcolo strutturale sia di edifici dalle semplici forme, sia di edifici con strutture più complesse attraverso software di calcolo a elementi finiti (FEM), facilitando la comunicazione tra ambiti progettuali che lavorano, molte volte, parallelamente senza interagire tra loro nel modo più funzionale.

Il caso studio preso in considerazione è il Palazzo del Lavoro di Pier Luigi Nervi, che presenta una struttura formale solo apparentemente semplice (perché modulare) e che ha permesso di sperimentare appieno le potenzialità e le criticità dei processi di scambio di informazioni tra discipline differenti.

Attualmente, l'edificio risulta in condizioni di evidente decadenza a causa del perdurato abbandono, di atti di vandalismo e di scarsa manutenzione. Nonostante sia inutilizzato, sono in corso le trattative per un progetto di riqualificazione che prevede la trasformazione dell'impianto in una galleria commerciale. Questo ha risvegliato l'interesse nel verificare se la struttura esistente sia conforme non solo alle normative presenti all'epoca della sua costruzione, ma che essa continui a soddisfare i requisiti minimi richiesti dalle normative vigenti affinché sia considerata sicura anche in caso di eventuali azioni sismiche.

La tesi si concentra dapprima sull'analisi degli elementi che compongono la struttura, attraverso sopralluoghi e approfondite ricerche di dati di archivio, in modo da poter essere successivamente riprodotti in maniera accurata e in ambiente BIM. Particolare attenzione è stata dedicata ai pilastri che sorreggono la copertura, sui quali sono state reperite le maggiori informazioni in ambito strutturale.

Successivamente alla modellazione geometrica, il lavoro di tesi si è concentrato dapprima sull'interoperabilità tra i due ambienti digitali di lavoro e successivamente sull'analisi dei dati trasferiti e sul loro affinamento e correzione, laddove è risultato necessario, per poter considerare il modello trasferito idoneo all'analisi strutturale. In seguito, è stato necessario scomporre ulteriormente il modello, in quanto l'edificio è composto da due sistemi strutturali disgiunti tra loro, in maniera tale da alleggerire e velocizzare la fase di calcolo.

Il lavoro di tesi si è concluso con l'analisi strutturale delle parti di struttura più significative, evidenziando che la struttura che sorregge la copertura soddisfa i requisiti minimi di sicurezza anche in caso di sisma. A causa della mancata reperibilità delle informazioni sulle armature presenti nei pilastri, non è stato possibile stabilire se la parte di struttura che sorregge la balconata, progettata per resistere alle sole azioni statiche, sia in grado di sopportare alle azioni causate dal sisma previste dalla attuale normativa.

INDICE

ABSTRACT	2
APPROCCI ALLA PROGETTAZIONE PARAMETRICA IN AMBITO EDILIZIO	
Building Information Modeling: definizione e campi di utilizzo	7
Le differenze tra BIM e CAD	10
Le dimensioni del BIM	14
Lo stato dell'arte	15
APPROCCI AL CALCOLO STRUTTURALE	
Finite Element Method: definizione	21
Le basi del FEM	22
IL CASO STUDIO: IL PALAZZO DEL LAVORO	
Torino nel 1961	27
Il Palazzo del Lavoro	31
L'esposizione internazionale del lavoro	33
Le altre strutture	35
Il destino di Italia '61	38
STRUTTURA PORTANTE DEL PALAZZO DEL LAVORO	
Il pilastro in C.A.	43
La copertura metallica	45
Il solaio nervato	47
Il curtain wall	49
INTEROPERABILITA' IN AMBITO BIM	
Problema odierno	53
Definizione dei formati univoci	54
Industry Foundation Classes (IFC)	56
Lo stato attuale	58
MODELLAZIONE IN AMBIENTE BIM	
Strumenti	61
Modellazione "Pilastro Strutturale"	62
Modellazione "Trave in Acciaio Principale"	65
Modellazione "Trave di Bordo"	67
Modellazione "Tamburo di ancoraggio"	67
Modellazione "Fondazione Strutturale"	69
Modellazione "Nervature Solaio"	69
Modellazione "Ritto Perimetrale"	70
Realizzazione del modello completo	72
Inserimento delle armature	73
MODELLAZIONE IN AMBIENTE FEM	
Strumenti	77
Preparazione del modello BIM in funzione del software di analisi strutturale	77
Affinamento del modello analitico	78
Analisi dei carichi	80
Inserimento dei carichi	86

Trasferimento del modello	87
Correzione del modello FEM	90
ANALISI STRUTTURALE	
Combinazioni di carico	95
Analisi copertura	98
Confronto dei risultati copertura con calcoli di Nervi	102
Confronto Vento e Sisma agenti sulla copertura	103
Verifica della sezione resistente	104
Analisi balconata	106
Confronto Vento e Sisma agenti sulla balconata	112
Valutazione effetto martellamento	116
CONCLUSIONI	125
BIBLIOGRAFIA	129
SITOGRAFIA	130
ALLEGATI	132

APPROCCI ALLA PROGETTAZIONE PARAMETRICA IN AMBITO EDILIZIO

In collaborazione con Andrea Tomalini

Building Information Modeling: definizione e campi di utilizzo

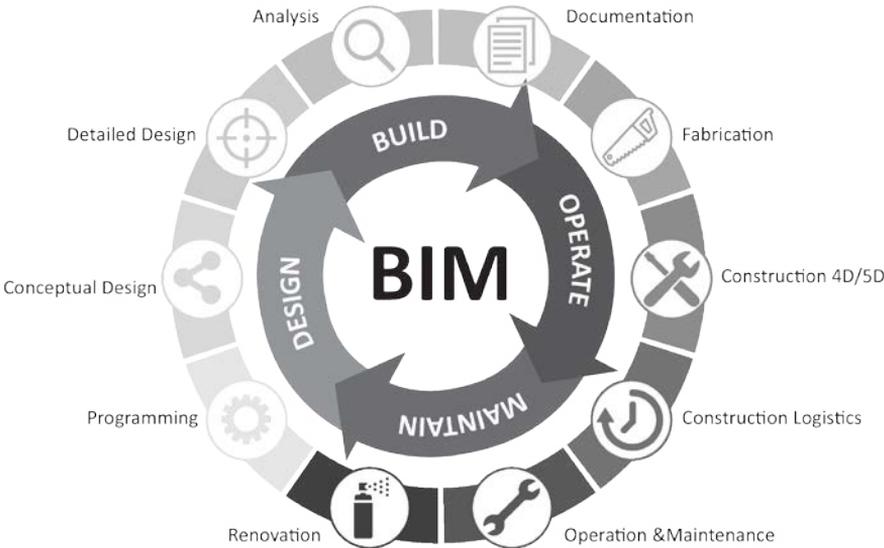
Spesso nel campo della progettazione e in quello dell'edilizia più in generale si sente nominare il BIM, viene associato ai modelli 3D, ai software, ai database e usato spesso in modo erroneo; quindi che cos'è il BIM?

Il termine BIM è l'acronimo di Building Information Modelling ed è stato coniato da Charles Eastman nel 1975. Si parte da un modello tridimensionale del manufatto edilizio, forse anche per questo viene erroneamente confuso con il modello 3D. La differenza è che il modello BIM, oltre ad esprimere la geometria dell'edificio, ricostruisce l'intero processo edilizio utilizzando componenti che equivalgono a quelli usati nella realtà, sono in grado di relazionarsi tra di loro e contengono informazioni che esulano dalla semplice rappresentazione¹.

Le informazioni contenute permettono analisi approfondite sull'edificio influenzandone le scelte progettuali. Inoltre, le informazioni contenute possono essere utilizzate non solo in fase di costruzione, ma anche nelle fasi di gestione e manutenzione.

Quindi il termine BIM non indica solo un modello 3D contenente tutte le informazioni utili, ma un nuovo metodo di progettazione a cui ci stiamo avvicinando per le necessità di unire tutti

¹ (Eastman, The use of computers instead of drawings in building design, 1975)



Integrazione tra BIM e ambiti progettuali

i dati provenienti da attori differenti, per un progetto più sostenibile economicamente ed energeticamente, per ridurre così gli errori in fase di progettazione diminuendo aumenti di costi o ritardi.

Il CAD ha cambiato il modo di disegnare, il BIM invece le modalità di progetto.

Da sempre progettista e produttore hanno utilizzato rappresentazioni figurative, plastiche e testuali per comunicare i dati che descrivono il manufatto da realizzare. Fino a non troppi decenni fa ci si è sempre basati sullo scambio di documenti cartacei, indispensabili ancora oggi, ma spesso con errori dovuti a mancati aggiornamenti o alla loro organizzazione/catalogazione.

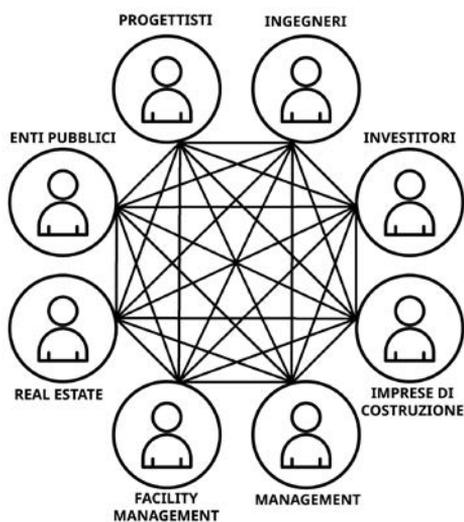
Con l'arrivo delle nuove tecnologie digitali si conferisce alla rappresentazione la possibilità di scomporre i modelli e raffigurare le forme che compongono il progetto in modo indipendente dalla loro complessità. Inoltre, con la diffusione dei personal computer e la loro diminuzione dei prezzi alla fine degli anni 70, il mondo business ha adottato sempre di più questi sistemi per la modellazione.

Già negli anni 60 si erano vista l'introduzione dei primi strumenti innovativi per la rappresentazione, un esempio è lo SKETCHPAD, sviluppato dal MIT di Boston nel 1962. Era un software molto primitivo confrontato con quelli di adesso, che dava la possibilità di riprodurre le primitive geometriche con l'ausilio di una penna ottica.

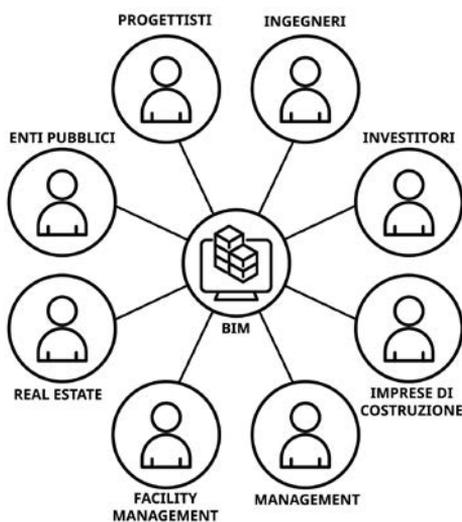
I principali settori che hanno favorito la diffusione di tali software sono quello dell'industria aeronautica e manifatturiera, in quanto settori che potevano affrontare l'investimento economico iniziale del software e dell'hardware adeguato. L'evoluzione iniziata in questo periodo non si è ancora arrestata e i tradizionali CAD hanno implementato funzioni di rappresentazione non solo di elementi geometrici ma anche annotazioni, simboli, testi, tabelle ed hanno perfezionato le modalità di modellazione di geometrie spaziali che possono es-

Confronto tra i tradizionali flussi di progetto (sinistra) e un flusso di lavoro coordinato da un modello BIM (destra).

PROGETTAZIONE TRADIZIONALE



PROGETTAZIONE INTEGRATA



sere gestite dal calcolatore.

Gli approcci su cui si basano i nuovi software si dividono in due categorie: la prima calcola le superfici secondo un approccio b-rep, basato sugli studi di Coon De Casteljau, Bèzier, De Boor; studi nati dal bisogno di utilizzare con macchine a controllo numerico per la creazione di stampi adatti all'industria dell'automotive e aeronautica². La seconda invece detta CSG (Constructive Solid Geometry) unisce, sottrae e interseca con logiche booleane oggetti vuoti o pieni in grado di approssimare elementi costruttivi reali³.

2 (Dimas & Briassoulis, 1999)

3 (Duff, 1992)

Questo tipo di strumenti costituiscono le fondamenta di quella che è l'attuale modellazione BIM.

Charles Eastman, nel 1974, assieme ad altri ricercatori della Carnegie-Mellon University di Pittsburg, con la ricerca "An Outline of the Building Description System"⁴ gettò le basi di un software che partendo da singoli elementi, successivamente uniti in un modello, possono descrivere un edificio completo e si possono anche estrapolare viste assonometriche e viste ortogonali. I singoli elementi usati per creare il modello contengono informazioni che descrivono il materiale che lo compone e le sue caratteristiche tecniche. L'articolo scritto nel 1975 sul A.I.A. Journal da Eastman è il resoconto dell'utilizzo di questo software e successive sue sperimentazioni, in questo articolo si introduce per la prima volta il concetto il Building Information Model. Non si riferisce al BIM come a un oggetto informatico ma come un processo per coordinare attività e informazioni riguardati il mondo delle costruzioni.

4 (Eastman, An Outline of the Building Description System, 1974)

Il BIM così viene definito come l'insieme delle azioni necessarie per realizzare e gestire flussi di informazioni provenienti da soggetti differenti per garantire qualità ed efficienza durante tutto il processo edilizio.

Da allora la complessità dei modelli, dei dati e delle operazioni possibili ad essi collegati si è evoluta in modo direttamente proporzionale con l'hardware a disposizione dei professionisti.

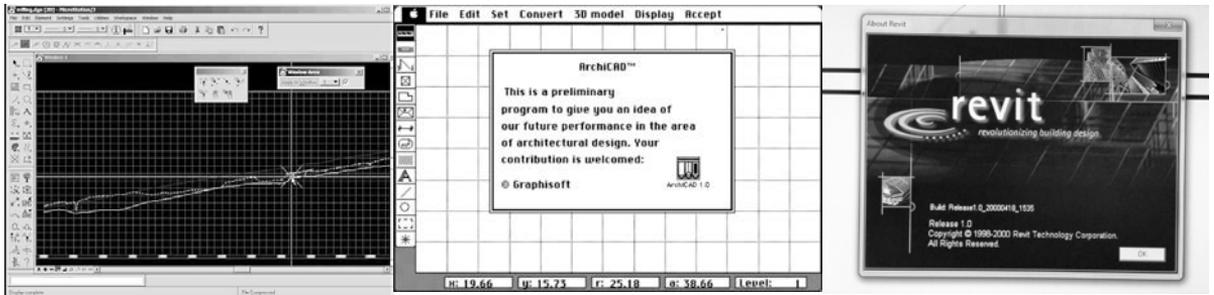
Ad oggi l'interoperabilità e la condivisione delle informazioni non è ancora perfetta, ci sono ancora diverse criticità dovute all'utilizzo di modellatori BIM, in grado di generare delle costruzioni virtuali dell'edificio, che unendo una grande varietà di informazioni nello stesso modello non sono in grado di generare file di interscambio leggibili in modo universale e si hanno sempre delle perdite di informazioni.

I modellatori BIM più diffusi, in ordine di uscita, sono:

La Nemetschek Group era già sul mercato dal 1963 ma solo nel 1984 inizia lo sviluppo di AllPlan, alla fine del decennio inizia la sua espansione internazionale.

ArchiCAD, scritto nel 1985 dal fisico Gábor Bojár: è il primo software per PC per la costruzione di modelli architettonici che si avvalgono di programmi parametrici che descrivono i componenti dell'edificio.

MicroStation 1.0, era già presente sul mercato ma da CAD 2D ma si evolse velocemente, venduto e scritto dalla società Bentley Inc. Nel 2004 la Bentley System lancia Bentley Architecture, evoluzione di Triforma. Questo insieme a Bentley Structural, Bentley Building Mechanical Facilities, Bentley Building Electrical Systems, Bentley Facilities, Bentley Power



Da destra: interfaccia Microstation 1.0, interfaccia ArchiCAD1.0, interfaccia Revit1.0

Civil e Bentley Generative Components sono i moduli applicativi che vanno ad interpretare la metodologia BIM.

Nel 1993, realizzato nel Lawrence National Laboratory di Berkley (USA), si introduce il Building Design Advisor, un sistema che al variare dell'esposizione solare, della longitudine e latitudine, o dei materiali che definiscono i componenti poteva portare a termine simulazioni analitiche sul comportamento dell'edificio.

Nel 2000, la Charles River Software, crea un software completamente dedicato alla costruzione di modelli architettonici. Il software viene battezzato Revit. Solo due anni dopo viene acquisita dal colosso Autodesk, la quale in 12 anni farà di Revit il software BIM più diffuso al mondo.

In molti programmi BIM i componenti edilizi sono detti "oggetti intelligenti" questo per la loro autoconsapevolezza: per esempio un oggetto definito muro è un elemento con la capacità di raccordarsi con tetti o solai e può automaticamente ospitare oggetti come porte o finestre. Grazie alla capacità degli oggetti intelligenti di comprendere l'elemento che rappresentano si limiteranno errori come finestre scollegate dai muri, favorendo la creazione di un modello coerente con quello che sarà il prodotto finale.

Non è da sottovalutare che negli ultimi anni, oltre ai software di modellazione BIM, si sono diffusi numerosi applicativi che interagendo con il modello possono effettuare analisi più specifiche o migliorare la coerenza del modello generando nuovi oggetti. Le informazioni ricavate attraverso l'uso di questi applicativi andranno ad implementare le informazioni già presenti nel modello.

Le differenze tra BIM e CAD

Il principale scopo dei software CAD era quello di automatizzare il modo di disegnare, quindi utilizzando linee e retini era possibile disegnare un elemento che convenzionalmente veniva inteso come muro. Per velocizzare il processo tutte le linee che utilizzate per rappresentare la stessa categoria, esempio le linee che indicano muri sezionati, vengono racchiuse all'interno dello stesso layer. Processo analogo si ha per il CAD 3D, al posto di utilizzare linee, archi o retini si creano solidi o superfici ai quali si applicano texture o effetti di luci per avere render realistici, anche in questo caso gli elementi che rappresentano lo stesso elemento vengono raggruppati all'interno dello stesso layer. In entrambi i casi con i modelli geometrici si potevano chiarire problemi di tipo geometrico e da esso partire con

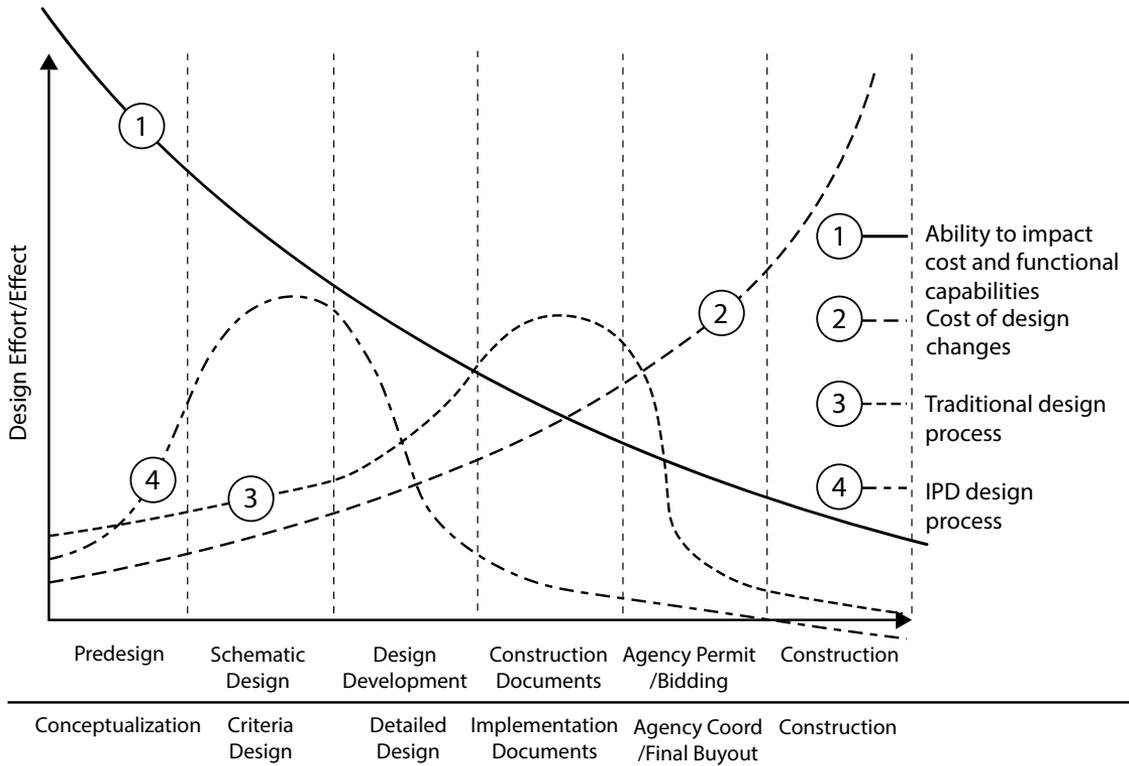


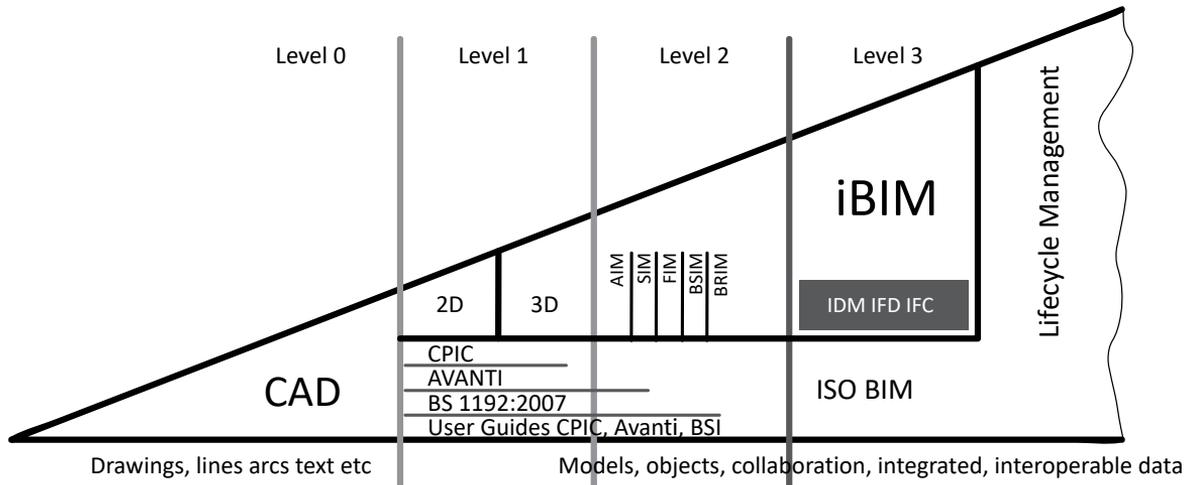
Diagramma che relaziona l'andamento dell'attuale processo di progettazione con gli effetti derivati dalle metodologie BIM. Fonte: MacLeamy, 2005

la costruzione di un modello analitico. Questo tipo di modello è molto facile da scambiare grazie al basso contenuto informatico che hanno al loro interno⁵.

5 (MacLeamy, 2004)

L'evoluzione del CAD 3D, il CAD Object-Oriented, aggiunge, oltre alle linee, archi e retini anche elementi in grado di rappresentare componenti edilizi. Questi possono essere visualizzati su viste differenti, adattabili a seconda della scala di rappresentazione e gli possono essere associati non solo texture, ma anche impostare variabili parametriche che ne descrivono la dimensione, gli si può associare una specifica stratigrafia con il relativo valore che ne descrive la trasmittanza. Alcuni componenti possono unirsi a degli altri (muri con solai) o possono essere posizionati solo all'interno di altri (porte e finestre possono essere contenute solo all'interno dei muri). Si possono delimitare degli spazi con componenti fisiche e gli si possono assegnare delle caratteristiche.

Il BIM è l'ulteriore upgrade di questi sistemi OOCAD, è una metodologia dove oltre a poter rappresentare in modo più accurato il manufatto può essere integrato con database e informazioni riguardanti tutta la vita dell'edificio. Le informazioni provenienti dai numerosi attori che partecipano al processo edilizio possono comprendere le specifiche degli elementi che compongono l'edificio, i dati economici, gli estremi dei fornitori, i piani di lavoro e la descrizione del luogo in cui l'edificio si colloca. Il BIM ovviamente è ancora in grado di esportare i disegni tradizionali, ma si possono ottenere altri tipi di output di informazioni aggiuntive per differenti scopi o per automatizzare dei processi. È anche per l'elevata complessità dei modelli che il requisito dell'interoperabilità non è ancora stato raggiunto.



Definizione grafica del significato di Level of Detail. Fonte: Bew-Richards, 2008

In breve, il BIM è uno flusso che può essere utilizzato ed offre molteplici miglioramenti rispetto al CAD, ci vogliono ancora numerosi investimenti perché diventi strumento comune.

In breve, l'Arch. Erez Levin sostiene che:

“La necessità di sviluppare progetti complessi, dalla fase concettuale fino al completamento, richiede una particolare attenzione sul valore del progetto, soprattutto quando si vogliono aggiungere servizi specifici [...]. In quest’ottica il BIM rappresenta certamente una opportunità da sfruttare, poiché grazie alla modellazione tridimensionale integrata si ha la possibilità di controllare meglio l’intero processo, comprese le eventuali interferenze tra le scelte architettoniche, strutturali ed impiantistiche prima di arrivare in cantiere...”¹⁶

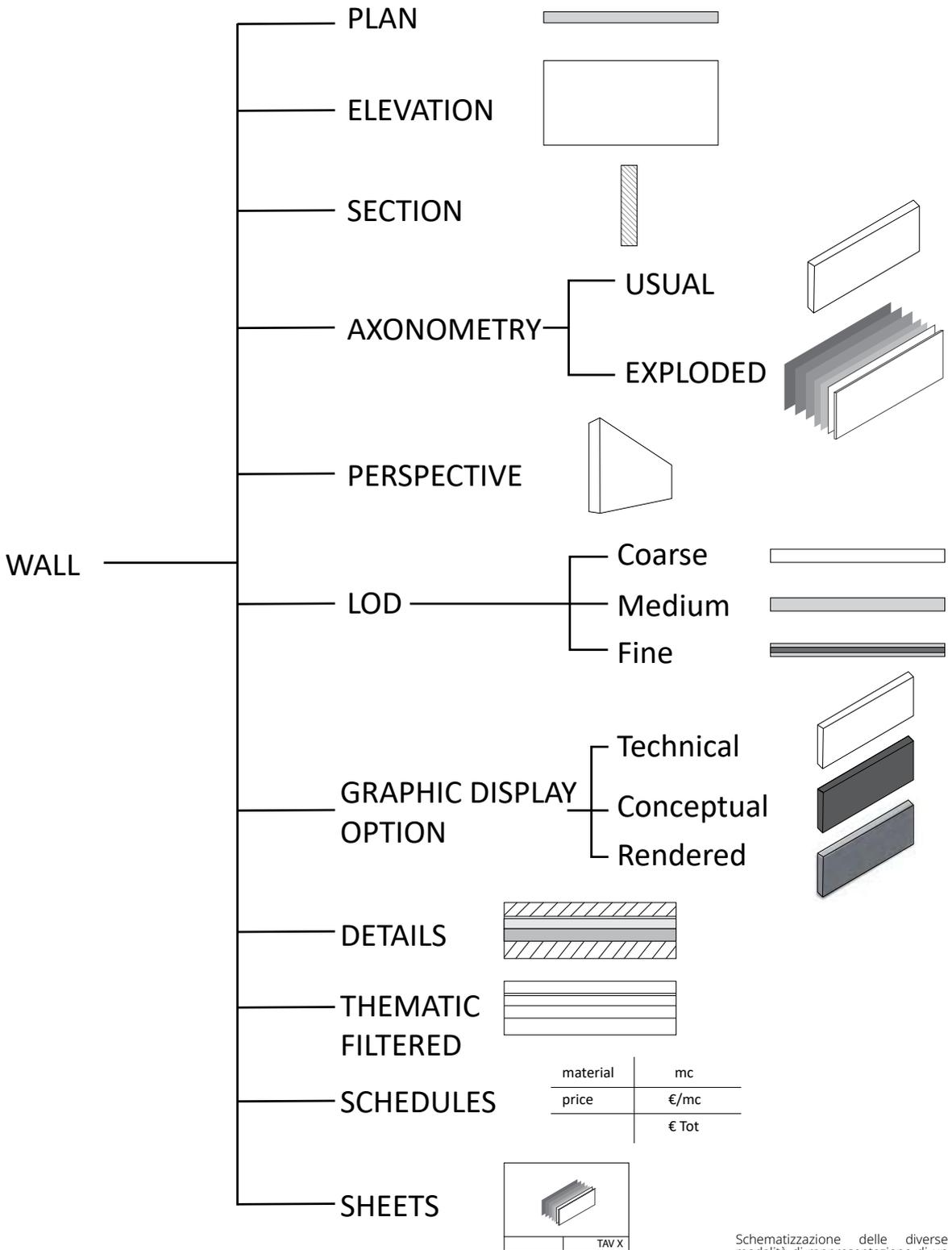
6 (Osello, et al., 2012)

Molto importante è il discorso della collaborazione all’interno dello stesso progetto, collaborazione impensabile con i sistemi CAD, durante la quale si possono identificare tre stadi principali:

Nel primo stadio si parla di interscambio lineare dove finita la progettazione inizia la costruzione. La collaborazione tra le parti in questa fase è minima e anche i dati scambiati, si tratta di disegni 2D o dei semplici modelli 3D.

Nel secondo stadio l’integrazione è migliore e la collaborazione si fonda sul modello, quindi i modelli contengono delle informazioni provenienti da diverse discipline e comunicano tra loro. La collaborazione può avvenire simultaneamente tra attori (architetto, impiantista, strutturista) e/o fasi differenti, quindi si riesce ad introdurre il fattore tempo e costi della costruzione; aggiornandosi simultaneamente si ha la possibilità di effettuare delle analisi prima di finire il progetto.

Nell’ultimo stadio i processi edilizi si vanno a sovrapporre e l’integrazione dei dati avviene trasversalmente tra tutti gli attori che partecipano al processo. Nessuna informazione viene perduta durante gli scambi e si riesce ad ottenere un modello multidisciplinare. Questo tipo di collaborazione detta Integrated Project Delivery (IPD) consente di utilizzare il model-



Schematizzazione delle diverse modalità di rappresentazione di un componente muro in ambiente BIM

Fonte: Lo Turco, 2015

lo anche per la gestione e manutenzione del manufatto costruito.

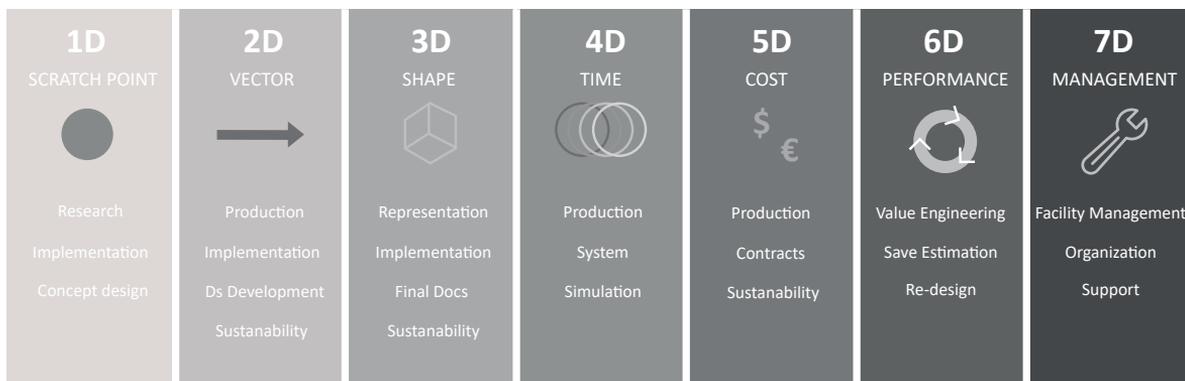
Però bisogna riflettere anche sulle parole del Prof. Arto Kiviniemi, il quale rammenta che nonostante le grandi potenzialità e la forte innovazione di questo metodo di lavoro:

“Il BIM non è una panacea che risolve tutti i problemi del nostro settore, non è una pietra filosofale che trasforma il piombo in oro, e non è un pacchetto di software che si può acquistare. Il BIM è, per esempio, un cambiamento fondamentale del processo edilizio, un mezzo di comunicazione efficiente, una tecnologia che consente una migliore integrazione, una collaborazione della gestione delle informazioni, una tecnologia che rende la prototipazione virtuale degli edifici finanziariamente fattibile. Il BIM non riguarda solo la tecnologia, ma coinvolge anche le persone ed i processi...”⁷

7 (Kiviniemi, 2012)

Le dimensioni del BIM

L'arricchimento di informazioni durante la fase progettuale crea dimensioni diverse del BIM superando la semplice rappresentazione grafica.



Rappresentazione schematica delle dimensioni del BIM

BIM 2D: alcuni modellatori che si collocano a metà tra il CAD e il BIM si basano sull'utilizzo del disegno bidimensionale che genera parallelamente un modello 3D intelligente dal quale si estrapolano poi le diverse rappresentazioni grafiche. Le informazioni contenute in questi modelli sono minime, come pro si ha la possibilità di scambiare i propri modelli con estrema facilità.

BIM 3D: il BIM, come avevamo già detto, viene associato al modello 3D dell'edificio. Da questo modello si possono facilmente estrapolare viste tridimensionali e piane del progetto o render. Il modello 3D è la base da cui si ottengono tutti i tipi di output e, per ottenere le sole piante, se si confronta con il CAD, la costruzione del modello è quasi sicuramente più lenta, si avranno maggiori vantaggi nelle fasi successive di creazione di viste, prospetti o sezioni, o di modifica, dato che ogni vista viene aggiornata automaticamente. Altre funzioni sono strettamente collegate al livello di dettaglio del modello, per esempio: con solo il volume-

trico dell'edificio e del contesto, la localizzazione e l'orientamento si possono ottenere dalle analisi sugli ombreggiamenti. Un'analisi strutturale invece necessita di un modello molto più dettagliato con maggiori informazioni, ad esempio la resistenza a compressione dei materiali, la resistenza del suolo su cui il progetto è situato, etc. Spesso per non appesantire il modello si disegnano dei sotto-modelli per effettuare le singole analisi. Altre funzioni sono il code checking, per poter verificare e convalidare un progetto seguendo le norme edilizie, o la clash detection, che dà l'opportunità di individuare le sovrapposizioni ed errori tra parte architettonica, strutturale ed impiantistica.

BIM 4D: la quarta dimensione rappresentata all'interno del modello è quella del tempo, i dati temporali infatti, collegati all'elemento costruttivo, possono essere esportati in modo da poter programmare, attraverso l'ausilio di software di project management, la cantierizzazione dell'edificio. Questa programmazione riduce i tempi morti e di conseguenza riduce anche i costi, inoltre si possono effettuare ulteriori analisi per verificare la sicurezza del cantiere durante l'avanzamento di quest'ultimo e di conseguenza riduce i rischi di incidenti.

BIM 5D: la quinta dimensione è quella dei costi, infatti il BIM riesce a quantificare e catalogare gli elementi che compongono l'edificio. La stima dei costi così diventa molto più accurata e rapida rispetto ai metodi tradizionali. Non si devono dimenticare nemmeno i costi di manutenzione ordinaria e straordinaria. Con software specifici si possono calcolare anche i guadagni che un edificio può produrre a seconda delle funzioni che vi andremo a collocare, verificando così se un investimento può essere vantaggioso.

BIM 6D: la sesta dimensione è quella della sostenibilità ambientale. Essa viene calcolata principalmente tenendo conto del fabbisogno energetico, delle ore di utilizzo e della funzione inserita. Con alcuni software BIM, come funzione nativa, è possibile verificare anche l'embodied energy dell'intera costruzione. Queste verifiche semplificano il procedimento per ottenere le certificazioni ambientali.

BIM 7D: la settima dimensione ha come obiettivo quello di gestire i servizi e di mantenere attiva la struttura. Infatti il modello BIM ha al suo interno le liste delle apparecchiature e dei componenti, esportandole diventano la base per i software di Facility Management.

Lo stato dell'arte

Paesi come Australia, Danimarca, Finlandia, Norvegia, Regno Unito, Stati Uniti d'America, Canada, e Singapore sono i paesi dove l'approccio BIM è più diffuso. Questi paesi sono la dimostrazione che la metodologia BIM è possibile solo dove governi e pubbliche amministrazioni investono risorse in questo settore di ricerca.⁸

8 (Wooyoung & Ghan, 2015)

La sua sempre maggior espansione come strumento di lavoro è dovuta dalle sue capacità di modellazione, analisi e simulazione che rivoluzionerà il mondo dell'edilizia, sfortunatamente molte amministrazioni locali difettano di professionalità e strumenti per accettare modelli così ricchi di informazioni. Nonostante esistano degli standard come l'IFCs, e siano in continuo sviluppo, non sono ancora ad un livello accettabile per permettere un interscambio di informazioni in modo sufficiente per far sì che la metodologia BIM possa essere applicata in modo universale nel mondo. Inoltre, non tutti gli utenti sono consapevoli dello

strumento che stanno utilizzando.

Nonostante questi impedimenti l'impiego di tecnologie BIM si sta ampliando, soprattutto associato a progetti importati dove le sue qualità permettono una riduzione dei costi, tempistiche più certe e qualità delle analisi sul prodotto edilizio migliori. Inoltre, il futuro dove l'uomo dovrà preoccuparsi riguardo all'approvvigionamento e al consumo energetico, è ormai iniziato, effettuare scelte ponderate è fondamentale, il modello è sempre più strumento per verificare le proprie scelte.

In Italia mancano ancora normative e standard chiari in materia. Questa mancanza può tramutarsi in risorsa e si potrebbe prendere spunto dagli esempi internazionali ad oggi più evoluti. Inoltre, c'è da considerare come il sistema edile italiano sia assai frammentato, dove circa l'80% delle imprese abbia meno di cinque dipendenti.⁹ Nelle parole del Geom. Franco Osegna si vede nel BIM l'opportunità per migliorare la competitività e che si vedono già i primi passi per l'adozione di questa metodologia:

“La conoscenza e la richiesta di soluzioni BIM è in aumento e sempre più spesso enti pubblici e statali rendono obbligatorio l'utilizzo del BIM per grandi progetti. Anche le grandi aziende hanno compreso il potenziale e hanno adottato questo processo di lavoro per favorire la crescita rapida ed efficiente. Anche l'agenda per la salvaguardia dell'ambiente incoraggia l'adozione del BIM...”¹⁰

9 (UNI 11337-7, 2018)

10 (Osello, et al., 2012)

Regno Unito

Ricerca preliminare, progetti pilota e riconoscimento istituzionale

Finlandia

Progetti pilota e linee guida

Spagna

Introduzione graduale di normativa e introduzione di un formato di interscambio comune

Danimarca

Creazione di una piattaforma digitale e casi studio

Estonia

Manuale che esplicita i vantaggi e la tecnologia BIM

Olanda

Fase di ricerca, introduzione graduale di una normativa

Irlanda

Progetti di ricerca e task group per analizzare e monitorare le esperienze estere

Portogallo

Creazione di una piattaforma digitale e digitalizzazione degli appalti

Australia

Progetti pilota, sviluppo di un'industria di tecnologie digitali

Argentina

Promozione universitaria

Brasile

Manuale di buone pratiche per la costruzione, aiuto ai progettisti che intraprendono il processo BIM

Cina

Appaltatori come categoria primaria interessata al BIM

Islanda

Promozione con seminari e conferenze e definizione di linee guida

Norvegia

Definizione requisiti necessari al BIM e attenzione alle opere pubbliche

Svezia

Guida per introdurre il BIM nelle imprese

Germania

Progetto di ricerca e creazione di una strategia nazionale con casi studio

Lituania

Simulazione e progetti pilota, promozione del comparto pubblico

Belgio

Ricerca preliminare e accademica e promozione di linee guida nazionali

Nuova Zelanda

Sperimentazione e definizione di linee guida

Stati Uniti

Guide metodologiche, promozione tra progettisti e nel settore delle costruzioni

Canada

Protocollo sulla base di quello Inglese, definizione di standard

Hong Kong

Progetti pilota, standard CAD come punto di partenza

Singapore

Promozione da parte delle istituzioni, creazione di un database accessibile, formazione e casi studio

Italia

Progetto Innovance per la creazione di una banca dati unitaria: normativa in corso di approvazione

APPROCCI AL CALCOLO STRUTTURALE

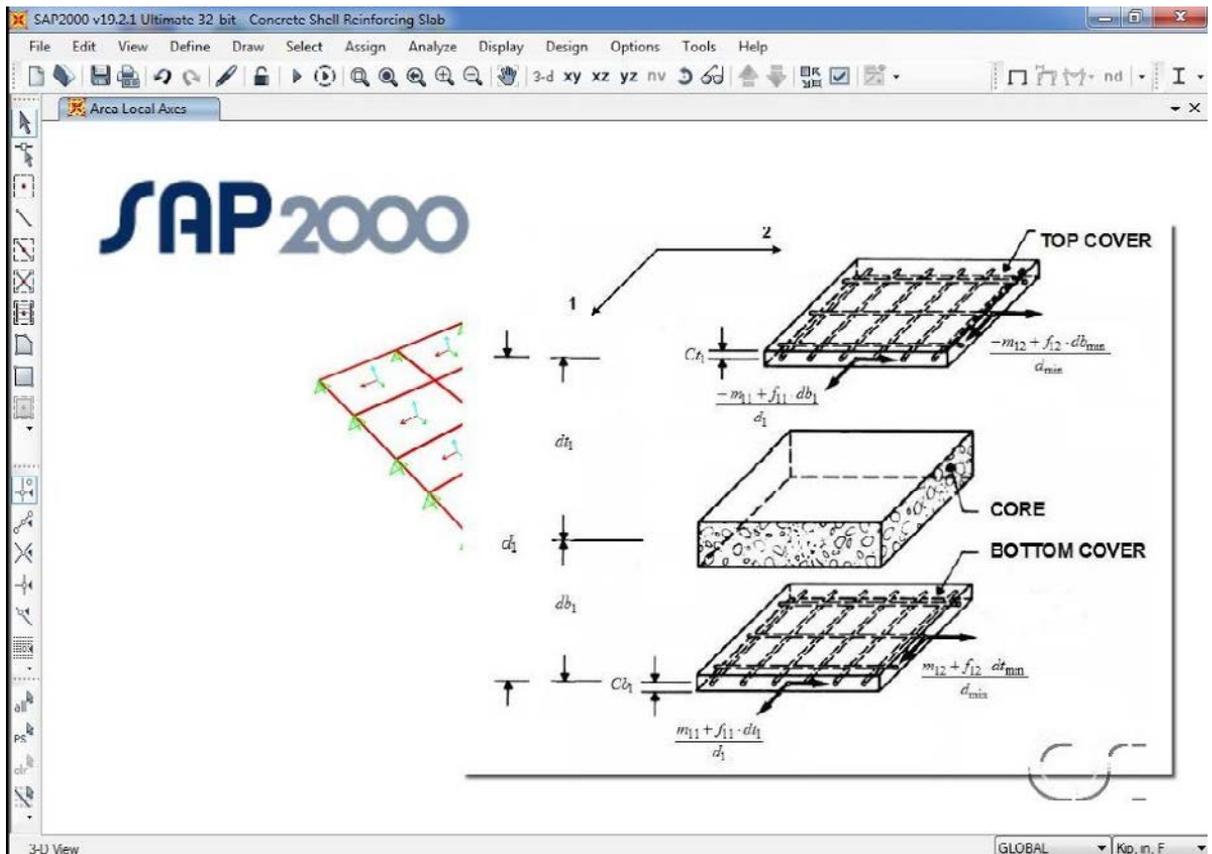
Finite Element Method: definizione

Il FEM, o Metodo degli Elementi Finiti, è un sistema di calcolo strutturale nato negli anni '50 come sviluppo del metodo degli spostamenti e utilizzando il Principio del Minimo dell'Energia Potenziale Totale e il Principio del Lavoro Virtuale.

Il FEM è una procedura che discretizza l'oggetto preso in analisi in elementi di forma semplice e connessi tra di loro da punti nodali. Questo processo avviene mediante delle funzioni di forma e spostamento che permettono di descrivere come si comporta una struttura analizzando il comportamento delle parti finite in cui è stata suddivisa la struttura. Così facendo, è possibile ridurre ad un numero determinato gli infiniti gradi di libertà degli elementi strutturali presi in considerazione. Essendo un processo di discretizzazione, più piccoli saranno gli elementi finiti in relazione alle dimensioni della struttura, più il modello sarà corrispondente alla realtà.

Questa metodologia di calcolo si è sviluppata dapprima nel campo dell'ingegneria aerospaziale e, con il progredire della tecnologia informatica, si è diffuso in molteplici campi grazie alla sua versatilità e praticità. La sua diffusione iniziò negli anni '70 con il primo

Interfaccia SAP2000



software ad utilizzare questa metodologia di calcolo, ovvero SAP (Structural Analysis Program) che fu dall'università di Berkeley, in California.

Nonostante le sue potenzialità, la diffusione del FEM fu abbastanza limitata dalla sua difficoltà d'uso, dato che esso si basa su calcoli matriciali complessi, e dalla scarsa potenza di calcolo che era reperibile al di fuori delle strutture universitarie. Inoltre, in quegli anni, le normative e le committenze, se non in casi molto specifici, non richiedevano relazioni di calcolo contenenti elaborati derivanti da calcoli agli elementi finiti.

Con la nascita del Personal Computer, la richiesta di software di calcolo più complessi ebbe una progressiva crescita, comportando un'evoluzione delle normative che, oggi, richiedono calcoli sofisticati sempre meno affrontabili manualmente e che necessitano di un sempre maggiore supporto di calcolo.

Sebbene il Metodo degli Elementi Finiti sia oggi sempre più richiesto e diffuso, spesso manca all'utente finale una conoscenza base dei principi e delle regole che stanno dietro a questo sistema di calcolo, complice il fatto che per la sua distribuzione in ambito professionale non ci sia stato il tempo di istruire l'utente finale nella maggior parte dei casi.

Le basi del FEM

Con il Metodo degli Elementi Finiti, come in astrologia¹¹, si vuole arrivare a conoscere nel dettaglio una condizione complicata, cioè quello che succede all'interno di una porzione della struttura, basandosi sul moto relativo di pochi punti, detti nodi, interni dell'elemento finito. Tale previsione di comportamento si basa su un arbitrio, ovvero che tutti i punti interni dell'elemento finito si muovano rispettando una determinata legge matematica, un esempio può essere che gli spostamenti subiscono una variazione lineare oppure una variazione parabolica. Si potrebbe, dunque, chiamare questa assunzione "*principio astrologico*"¹².

Differentemente dall'astrologia, con il FEM è possibile risolvere un sistema di equazioni differenziali di forma conosciuta, sapendone valutare l'efficienza e l'esattezza. È possibile dimostrare, infatti, che aumentando il numero degli elementi, rendendoli inevitabilmente sempre più piccoli, la soluzione approssimata converge verso quella esatta. Si potrebbe, inoltre, avere lo stesso effetto se, invece di modificare numero e dimensione degli elementi, si aumentasse la complessità delle funzioni.

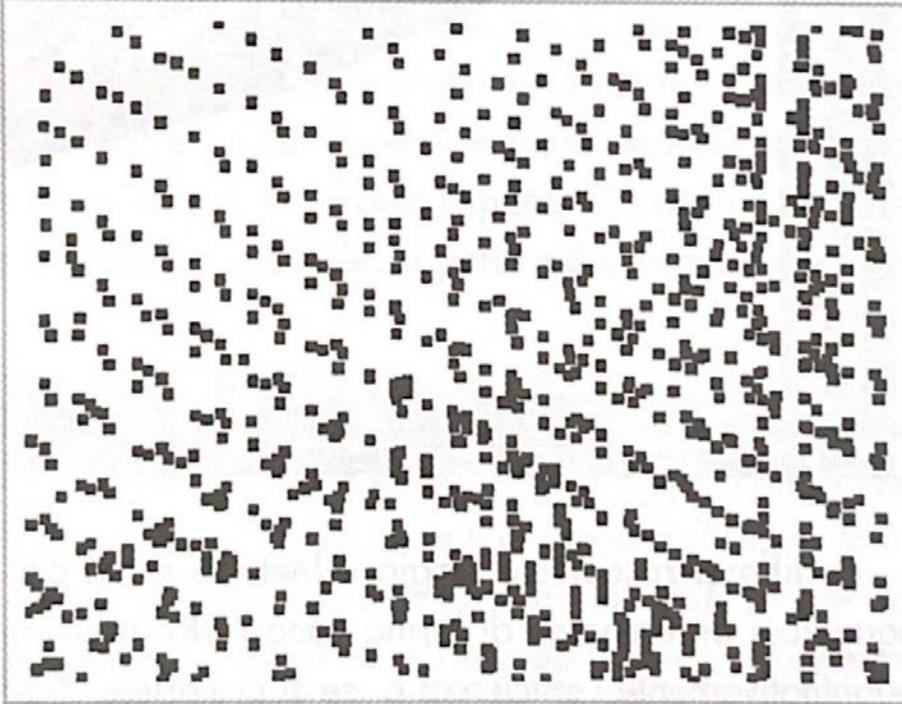
Si può quindi dire che il metodo funziona, nonostante esso parta da un arbitrio. A supportare quest'affermazione è il fatto che gli elementi finiti possono essere rimpiccioliti quanto si vuole, in modo tale che la soluzione ottenuta sia sufficientemente paragonabile al campo di spostamenti la cui forma è stata arbitrariamente ipotizzata. Come principio, è simile a quello che c'è dietro ad un'immagine digitale di tipo raster¹³: maggiore è il numero di pixel presenti nell'immagine, maggiore sarà la definizione di essa e non si noterà la metodologia di creazione digitale; se, invece, i punti sono talmente pochi da risultare insufficienti a ricostruire correttamente l'immagine, essa risulterà visibilmente "seghettata", rendendo visibile la composizione di pixel nell'immagine.

11 *"Alla base dell'astrologia v'è la convinzione di poter prevedere ed interpretare i destini di un individuo (o di un gruppo di individui), sulla base del moto relativo di un certo insieme di corpi astronomici come le stelle, i pianeti, nello spazio"* (Rugarli, 2003)

12 (Rugarli, 2003)

13 Le immagini di tipo raster che vengono suddivise attraverso un reticolo in un numero definito di punti, chiamati pixel, al quale viene attribuito uno specifico colore.

Vista parziale dei nodi di una struttura senza la rappresentazione degli elementi finiti. Fonte: Rugarli, 2003



Questa tipologia di approccio è molto simile all'interpolazione, dove però non si ha la possibilità di scegliere in quali punti attribuire la funzione incognita. Questi punti prendono il nome di nodi ed è possibile decidere la loro posizione all'interno della struttura.

È necessario, prima di tutto, chiarire quali siano le caratteristiche generali del Metodo degli Elementi Finiti. Esso consiste nel suddividere in parti la struttura, presupponendo di poter descrivere attraverso regole semplificate sforzi, spostamenti e deformazioni presenti in ciascun elemento finito. Per poter fare ciò, è necessario analizzare gli spostamenti in pochi e determinati punti dell'elemento, chiamati nodi, ai quali vengono applicate le forze e le coppie ricavate dai carichi agenti sull'intera struttura. È necessario, una volta applicate le azioni dei carichi, imporre l'equilibrio a tutti i nodi della struttura presa in analisi.

Detto ciò, bisogna tenere conto di due cose:

- tutte le forze esterne vengono applicate ai nodi e devono essere equilibrate da reazioni provenienti dagli elementi distorti in corrispondenza dei nodi stessi;
- tali reazioni dipendono dagli spostamenti relativi che si verifica tra i nodi dell'elemento finito, valutati tenendo conto del "principio astrologico".

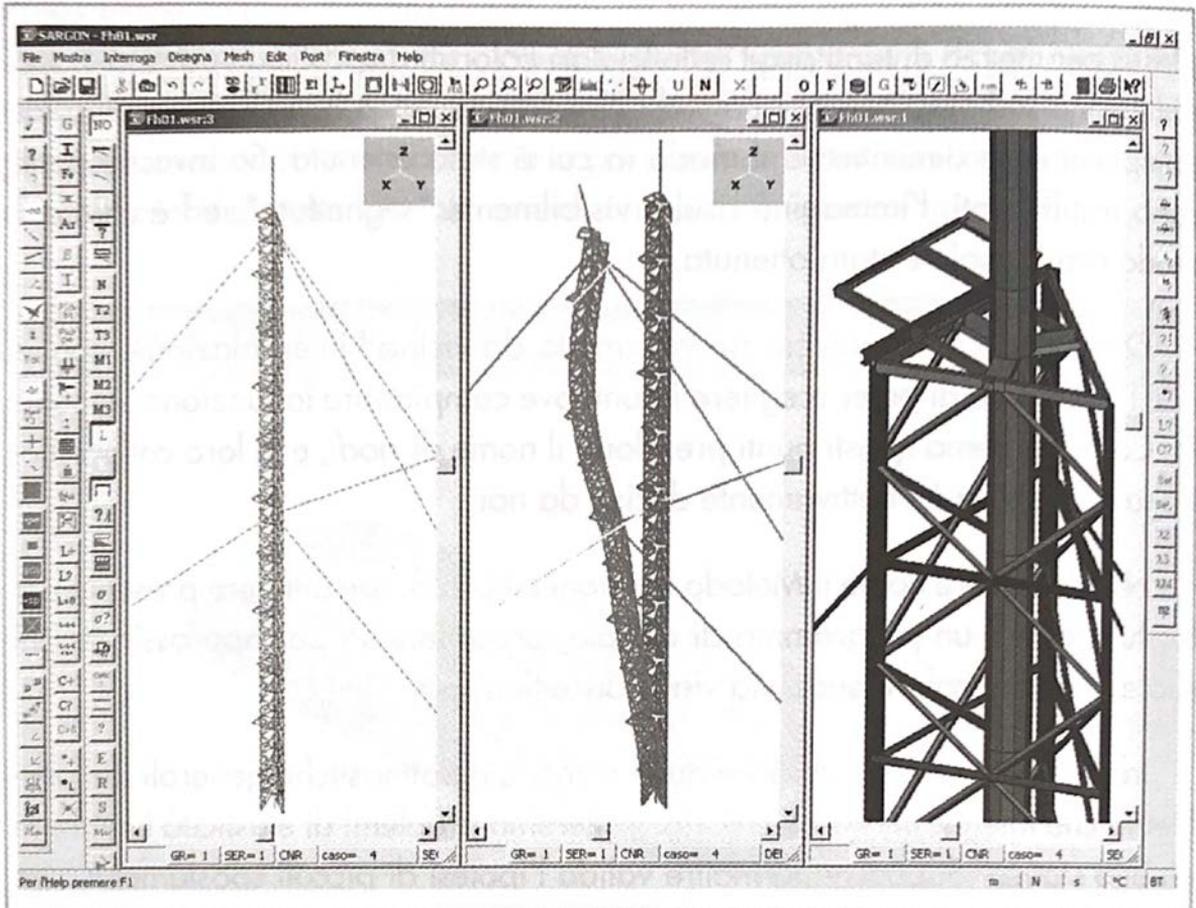
Per soddisfare l'equilibrio imposto a tutti i nodi, oltre a tenere conto di quanto detto, "è necessario risolvere un sistema che ha come termine noto il valore delle forze e coppie applicate ai nodi (p), e come vettore incognito l'insieme delle traslazioni e delle rotazioni dei nodi (u). La matrice dei coefficienti di questo sistema (K) prende il nome di matrice di rigidezza globale"¹⁴ e viene espressa dalla seguente equazione: 14 (Rugarli, 2003)

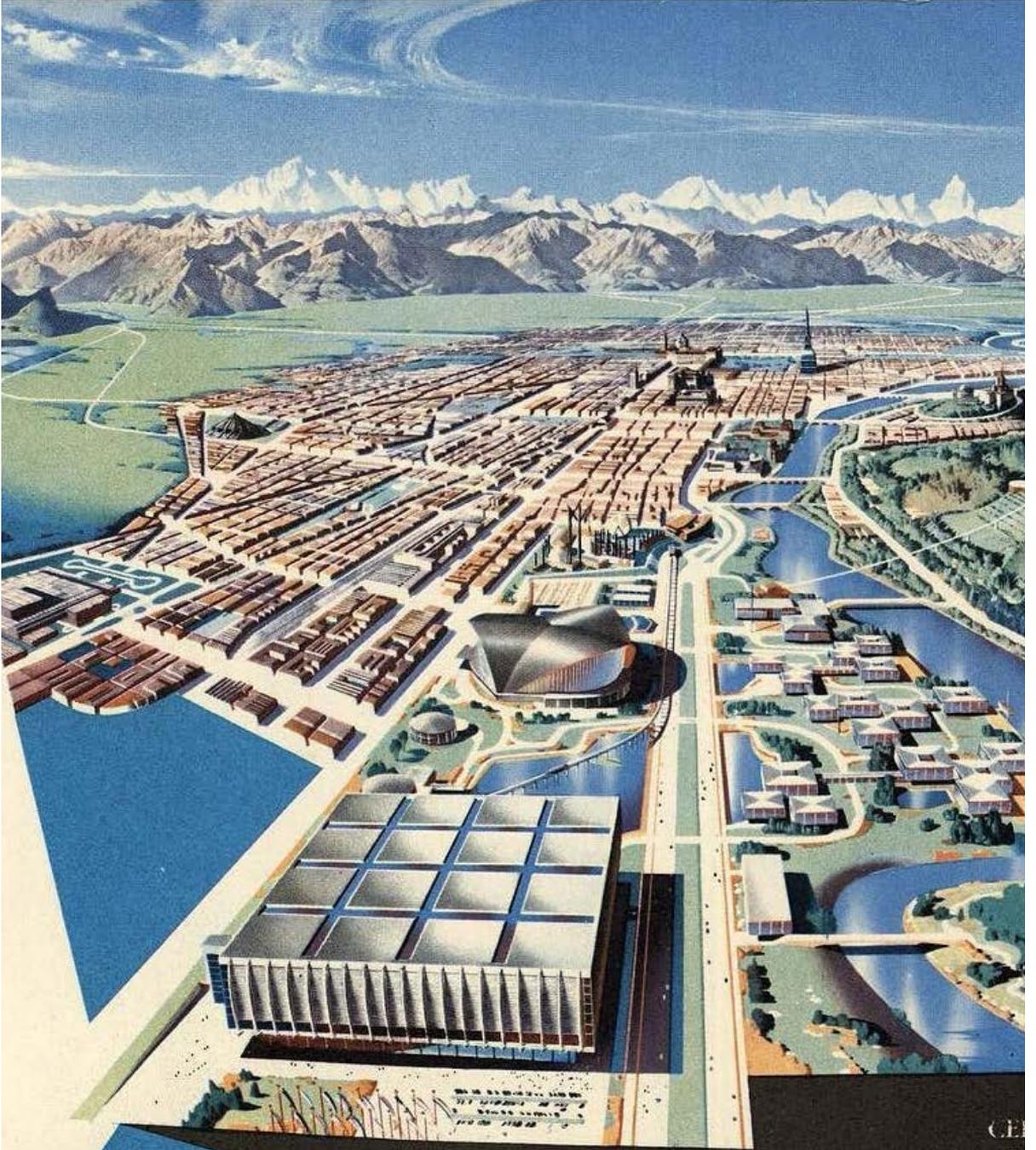
$$K_u = p$$

Una volta che il sistema è stato risolto, è noto ciò che avviene in termini di spostamenti, deformazioni e sforzi all'interno dei singoli elementi, non resta, quindi, che trascrivere questi risultati in appositi file per tutti gli elementi che compongono la struttura.

Quanto detto, è necessario per comprendere che se viene spostato un qualsiasi nodo, questo influirà su nodi anche molto distanti grazie alle reazioni trasmesse dagli elementi che li collegano.

Rappresentazione unifiare, deformata e vista solida di una struttura strallata Fonte: Rugarli, 2003





torino

M A G G I O - O T T O B R E 1 9 6 1

CE
CE
MC
MC
ES
MC
ES

IL CASO STUDIO: IL PALAZZO DEL LAVORO

In collaborazione con Andrea Tomalini

Torino nel 1961

Nel 1961, a Torino, venne organizzata l'Esposizione Internazionale del Lavoro, come celebrazione del centenario dell'Unità d'Italia. In questi anni, si registrò una crescita demografica della città, dai 719.300 abitanti del 1951 si arrivò ai 1.124.714 nel 1967, oltre che un notevole incremento di posti di lavoro. Un esempio fu la crescita dei dipendenti della FIAT che, nel corso del 1960, passarono da 92.000 a 107.000. Ciò fu probabilmente una conseguenza dell'aumento della produzione, infatti in quell'anno la FIAT superò il mezzo milione di vetture prodotte, cosa che gli fece conquistare il secondo posto tra le aziende automobilistiche dopo la Volkswagen.¹⁵

15 (Fofi, 1964)

Tuttavia, dietro alla prosperità economica che caratterizzava Torino in quegli anni, erano presenti malessere e disagio sociale, causati dal flusso sempre più numeroso di immigranti che necessitavano di ogni servizio e bene. Ciò ha portato ad un aumento del ritmo con il quale si costruivano edifici residenziali, portando la città a densificarsi sempre di più. Le imprese dovevano quindi sopperire velocemente ad una domanda di tipo quantitativo, dovendo rinunciare alla qualità del costruito. Nacquero così i quartieri di estrema periferia, come Mirafiori e Falchera, che risultavano essere delle città dentro la città, in quanto non sembravano avere nessun tipo di connessione con Torino se non quello di tipo lavorativo. Nel caso della Falchera, da un punto di vista architettonico, il complesso fu un'opera di rilievo: infatti, in quegli anni, il quartiere della Falchera poteva essere preso come esempio architettonico che proponeva diversi tipi abitativi. Veniva risolta la necessità di sopperire urgentemente alla richiesta abitativa tramite interventi settoriali e spesso di tipo privato, per evitare i fenomeni che si riscontrarono spesso nelle periferie delle altre grandi città italiane, mantenendo così un decoro urbanistico della città. Altro insediamento di natura popolare, caratterizzato però da un'impostazione monoculturale, composto quindi interamente da immigranti, fu il quartiere Le Vallette (1959). Esso rappresentava un modello di architettura per le sue caratteristiche innovative; venne utilizzato, anche se inizialmente sprovvisto di servizi e di ogni collegamento, per accogliere i visitatori delle manifestazioni del 1961. Questo era il clima che caratterizzava la nascita del complesso delle celebrazioni del Centenario dell'Unità d'Italia.

Già in precedenza, la città aveva accolto una delle prime Esposizioni Internazionali per la celebrazione del Cinquantenario dell'Unità d'Italia, nel 1911. L'idea di ospitare nuovamente questa celebrazione trovò subito molti sostenitori, come il sindaco, l'avvocato Amedeo Peyron, che nell'autunno del 1956 affidò l'incarico di preparare tutti gli elementi necessari alla realizzazione di un progetto di massima ad alcuni assessori municipali. Due anni dopo, successivamente alla nomina del comitato ordinatore composto da 32 membri e presieduto dal prof. Alessandro De Magistris, venne riconosciuto alla città di Torino il diritto di



L'on. Gronchi si intrattiene con l'avv. Agnelli, il prof. A. M. Dogliotti e l'avv. Casati. Fonte: la Celebrazione del Centenario, a cura del Comitato nazionale pe la celebrazione del primo centenario dell'unità d'Italia



Giovanni Agnelli di fronte al master-plan di Italia '61, Torino, Walter Mori, 1961

celebrare l'evento.¹⁶

16 (Buscioni, 1990)

Nel 1958, vennero presentati il bilancio preventivo, la bozza di statuto e il programma della manifestazione. In quest'ultimo, erano espressi il periodo nel quale si doveva tenere l'esposizione, che sarebbe iniziata il 1 maggio 1961 e si sarebbe conclusa il 31 ottobre dello stesso anno, l'elenco delle attività proposte, 3 mostre e 18 manifestazioni collaterali. Le mostre in programmazione erano: la Mostra Storica dell'Unità d'Italia, la Mostra delle Regioni e la Mostra Internazionale del Lavoro. Fu, inoltre, presentato lo statuto, dove erano definiti due enti preposti allo svolgimento della manifestazione:

Il comitato nazionale "Italia 61", presieduto dall'onorevole Giuseppe Pella, che aveva il compito di organizzare la mostra storica, la mostra delle regioni e l'Esposizione Internazionale del Lavoro, oltre alle altre manifestazioni su piano nazionale della Celebrazione del Centenario, presentate con lo slogan "Torino vi chiama".

Il comitato locale "Torino 61", presieduto dall'avvocato Giovanni Agnelli, avente lo scopo di organizzare e migliorare la ricettività cittadina, organizzare mostre ed esposizioni varie, programmare spettacoli e festeggiamenti, finanziare congressi di carattere nazionale ed enti cittadini per le opere connesse con le manifestazioni, pubblicizzare l'evento tramite il suo ufficio stampa, assumere a proprio carico spese generali e di personale.

La costruzione di palazzi e strutture accessorie alla manifestazione fu localizzata nel quartiere di Millefonti, situato in prossimità del polo ospedaliero torinese nonché nella zona periferica della città. A curare la mostra fu, invece, Gino Pestelli, capo della direzione stampa e propaganda della Fiat. Pestelli definì la mostra come "il palcoscenico ideale in cui ribadire l'identità dell'Italia quale nazione moderna, economicamente e socialmente progredita, ricca e orgogliosa della sua specifica tradizione culturale"¹⁷, ma la vedeva anche come un modo per dare a Torino, ormai ex-capitale, un nuovo volto, quello di metropoli della produzione industriale. Fu, inoltre, Pestelli ad affidare nel 1959 all'architetto milanese Gio Ponti l'incarico di progettare l'allestimento dell'Esposizione Internazionale del Lavoro, oltre all'incarico di progettazione urbanistica dell'area destinata alla mostra. Ponti iniziò già nel luglio dello stesso anno a studiare l'impostazione della mostra, senza però poter avere un quadro completo prima di sapere come sarà il "contenitore" dove verrà allestita la mostra.

17 (Pace, Chiorino, & Rosso, 2005)

Infatti, per la progettazione del palazzo che avrebbe ospitato l'Esposizione Internazionale del Lavoro, venne indetto un concorso d'appalto dal Comitato Generale Nazionale per la celebrazione del Centenario dell'Unità d'Italia nel luglio del 1959, al quale parteciparono, sotto invito, le seguenti imprese:

Nervi & Bartoli;

Ing. Guerrini & C.;

Ing. Guffanti, Borini padana spa;

Ing. E. Recchi & soc. Savigliano;

Soc. Dalmine, Ilva e Terni.

Venne scelto all'unanimità il progetto dell'Ing. Pier Luigi Nervi, in quanto, anche se non rispecchiava precisamente le richieste del bando, rispondeva ai requisiti economici e ga-



Fase di costruzione del Palazzo del Lavoro, Sergio Piretti, Roma

rantiva la realizzazione nei tempi stretti richiesti dal bando. Quest'ultimo fattore fu forse quello che più influenzò la scelta del progetto vincitore.

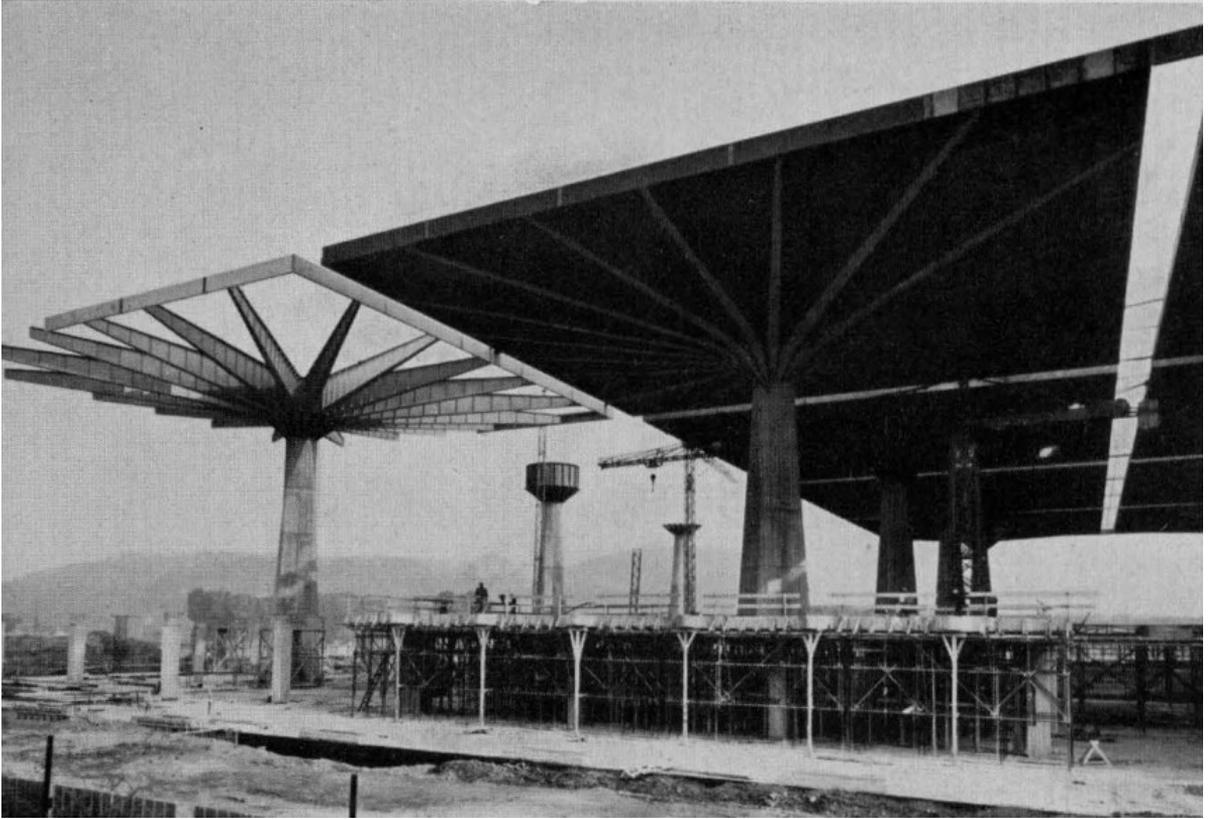
Palazzo del Lavoro. Fonte: la Celebrazione del Centenario, a cura del Comitato nazionale pe la celebrazione del primo centenario dell'unità d'Italia



Il Palazzo del Lavoro

Il Palazzo del Lavoro, progettato e realizzato da Nervi, era unico per dimensione e forma. Esso si estendeva per 25000 mq e doveva essere realizzato in dieci mesi. Per rispettare i tempi, si dovette ricorrere ad un sistema che ne semplificasse la costruzione e che fosse realizzabile in serie, utilizzando elementi singoli autosufficienti, in modo tale, una volta ultimato un determinato numero di essi, da poter gettare il solaio perimetrale e collocare le vetrate. La soluzione adottata fu la divisione dello spazio di copertura in un determinato numero di solai autoportanti ed eseguibili autonomamente, sorretti da enormi pilastri a forma di fungo, ottenendo così un grandioso risultato.

Tuttavia, nonostante fosse stato accettato, il progetto originario del concorso subì delle variazioni, studiate da Nervi in accordo con Ponti, prima di essere presentato nel maggio del 1960 come definitivo. Il salone, da seminterrato, viene sollevato al piano di campagna e la balconata fu ridotta dai 60 metri inizialmente previsti ad una decina di metri, in modo da



Fase della costruzione. Fonte: la Celebrazione del Centenario, a cura del Comitato nazionale per la celebrazione del primo centenario dell'unità d'Italia

18 (Nervi P. L., 2011)

poter eliminare, come definita da Ponti, la “selva di 182 pilastrini che lasciava in vista solo le 4 colonne centrali e chiudeva la vista alle altre”¹⁸. Persino durante il cantiere, Ponti suggerisce dei cambiamenti; come per esempio la provenienza dell'illuminazione della grande sala che, secondo Ponti, doveva provenire solamente dal basso per fare risaltare meglio le colonne e la raggiera di travi. In seguito, a più riprese, Ponti rivendicò le modifiche apportate al progetto di concorso e Nervi non mancò di riconoscere il merito all'amico.

Il Palazzo venne completato in soli diciassette mesi, contemporaneamente allo studio per gli allestimenti, organizzati oltre che da Giò Ponti anche da Giancarlo Pozzi, quando fu completato l'allestimento era in parte già stato realizzato. Ciò ha comportato l'impossibilità di comprendere, da parte di Ponti e dei suoi collaboratori, la reale percezione spaziale del Palazzo, se non quando furono completati sia il cantiere del palazzo stesso sia l'impostazione dell'allestimento.



Paolo Monti allestimenti interni al Palazzo del Lavoro per l'esposizione di Italia '61

L'esposizione internazionale del lavoro

L'esposizione del lavoro aveva come tema "l'uomo al lavoro. 100 anni di sviluppo tecnologico e sociale: conquiste e prospettive" e vi parteciparono 19 nazioni e 5 organismi internazionali. Era suddivisa in due sezioni principali: quella perimetrale dedicata alle nazioni ed organismi internazionali partecipanti e quella centrale riservata all'Italia. Tra le due zone vi era un corridoio di passaggio per i visitatori che consentiva la vista dell'intero edificio. Fu premura di Ponti progettare le strutture temporanee all'interno del Palazzo del Lavoro in modo tale da mostrare il più possibile gli imponenti pilastri e la copertura, a volte isolandole con l'utilizzo di alte pareti. Era inoltre accentuato il fattore di temporaneità delle strutture interne della mostra grazie anche ai materiali utilizzati: alluminio e plexiglass per la suddivisione degli spazi perimetrali e acciaio inossidabile riflettente per le barriere della sezione italiana. Era tuttavia evidente dall'allestimento la difficoltà che ha riscontrato Ponti a studiare un percorso espositivo all'interno del palazzo di Nervi, che era affascinante ma al tempo stesso gigantesco e privo di proporzione e ritmo spaziale.¹⁹

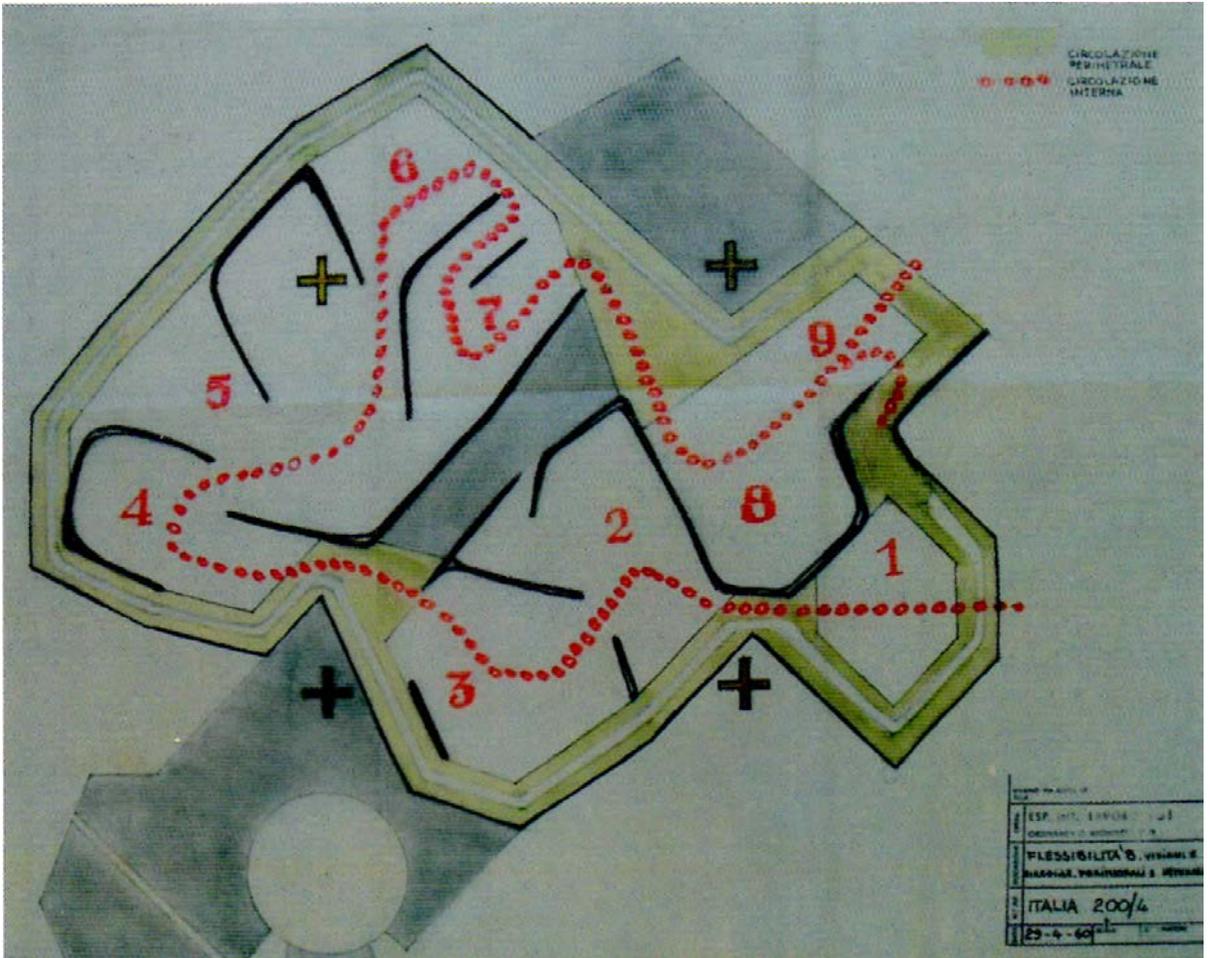
¹⁹ (Zevi, 1971)



Locandina di presentazione dell'evento. Fonte: museotorino.it

Per la sezione dell'Italia, delimitata da mura che riproducevano l'andamento del bastione fortificato della città di Lucca, si è optato per la suddivisione dello spazio in nove ambienti in successione. Per ciascuno dei temi contenuti nella mostra italiana fu appaltata alle grandi società industriali italiane dell'epoca che incaricarono, a loro volta, architetti e artisti italiani di realizzare spazi e volumi, giocando con luci naturali e artificiali, colori e materiali per raggiungere un'armonia ambientale.

Per la sezione estera, Ponti aveva inizialmente pensato di coinvolgere architetti di leva internazionale, come Paul Rudolph e Kenzo Tange, oltre ad aver tentato senza successo di contattare Carlo Mollino. Decise infine, in accordo con il Comitato Ordinatore, di affidare parte della progettazione dei padiglioni stranieri agli architetti torinesi che furono esclusi dai concorsi per la costruzione dei palazzi realizzati per l'evento.



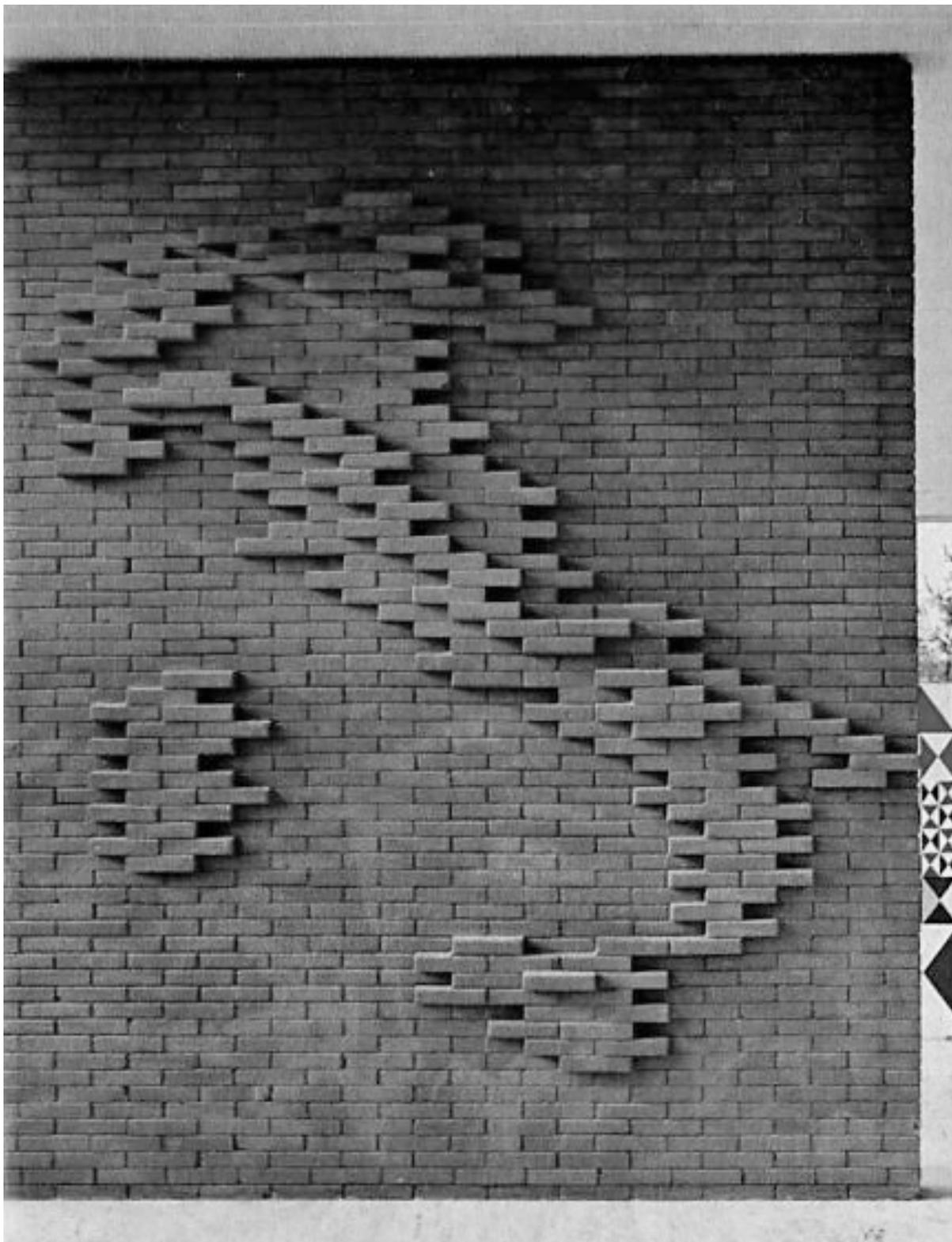
Gio Ponti, Palazzo del Lavoro a Torino, pianta schematica del nucleo centrale destinato alla sintesi storica

Le altre strutture

Altre costruzioni hanno avuto grande importanza durante l'esposizione, uno dei più importanti fu quello dedicato alle mostre: il Palazzo a Vela, detto anche Palavela, chiamato così per la forma della sua struttura, realizzata con un sistema a cupola formata dall'intersezione a crociera di tre volte. In questa sede venne accolta la mostra della moda, a cura del cavaliere Pininfarina, dal titolo "Moda, stile e costume", che aveva come obiettivo quello di rappresentare i vari aspetti della vita contemporanea.

Di rilevante importanza furono anche le costruzioni che ospitarono la mostra delle regioni, sviluppata in 19 singoli padiglioni disposti lungo la riva del Po. Questi padiglioni, 11 dei quali di vaste dimensioni, si integravano ed armonizzavano in un unico comprensorio che rispecchiava in tutto l'integrazione logica delle grandi mostre.

Non meno importanti furono le altre costruzioni accessorie, come la fontana luminosa, il



Mostra delle Regioni, Ingresso al padiglione unitario. Fonte: la Celebrazione del Centenario, a cura del Comitato nazionale per la celebrazione del primo centenario dell'unità d'Italia

circarama, realizzato da Walt Disney, l'ovovia diretta al parco Europa di Cavoretto, la cappella realizzata dagli architetti Romano e Rizzotti, il ponte sul Po e la monorotaia, che collegava i due ingressi dell'area dedicata all'Esposizione: il Museo dell'Automobile (Ingresso Nord) e il Palazzo del Lavoro (Ingresso Sud).

Ultima, non per importanza ma per collocazione, era la Mostra Storica, che venne allestita all'interno di Palazzo Carignano. In questa mostra, vennero esposti i più importanti cimeli provenienti dai musei del Risorgimento di Torino e di Milano, oltre che da quelli provenienti dalle altre città italiane che furono luogo fulcro del risorgimento italiano: Firenze, Venezia, Roma, Napoli, Palermo, Vicenza, Perugia e Brescia.

Vennero inoltre organizzati due ricevimenti che si tennero a Palazzo Madama e nella Palazzina di Caccia di Stupinigi, oltre che una serie di festeggiamenti che ebbero come scenario l'area del parco del Valentino e il comprensorio espositivo.²⁰

20 (Mostra delle regioni, 1961)

Palazzo a Vela, 1984 Fonte: museo-torino.it



Il destino di Italia '61

Rimaneva però un problema: come riutilizzare le strutture, compresi i due enormi palazzi, una volta terminati i festeggiamenti, purtroppo non si riuscì a trovare una funzione che potesse essere ospitata a tempo pieno dal Palazzo a Vela. Esso accolse, infatti, sporadicamente mostre ed esposizioni, in alternanza con l'edificio non molto lontano di Torino Esposizioni, fino a quando nel 2003, in occasione dei Giochi Olimpici Invernali che si tennero a Torino nel 2006, venne completamente riqualificato su progetto dell'architetto Gae Aulenti, che prevedeva la demolizione quasi completa dell'edificio originario del quale venne mantenuta soltanto la caratteristica copertura a forma di vela. Fu convertito in palazzetto del ghiaccio dove, durante i Giochi Olimpici, si tennero le gare di pattinaggio di figura e short track. Attualmente, la pista di pattinaggio è aperta al pubblico durante i periodi invernali.

Non fu altrettanto fortunata la sorte del Palazzo del Lavoro. Come già detto, uno dei requisiti della gara d'appalto per la costruzione del Palazzo del Lavoro, era garantire la possibilità che potesse essere utilizzato come sede del Centro Nazionale per l'Istruzione Professionale una volta che le manifestazioni fossero finite. Sfortunatamente, non fu utilizzato né come previsto nel bando di costruzione né come proposto in fase di progettazione da Nervi: utilizzato come Palazzetto dello Sport. Purtroppo, non si riuscì a trovare nessuna funzione che potesse essere ospitata dall'enorme struttura, che rimase quindi pressoché inutilizzata, salvo alcune manifestazioni, fino al completo abbandono. La struttura, attualmente, risulta fatiscente, conseguenza dell'evidente abbandono e degli incendi di origine dolosa che ha subito nel corso del 2015. Attualmente sono in corso le trattative riguardo ad una riqua-

Incendio al Palazzo del Lavoro.

Fonte: Il Corriere, 2015



lificazione dell'edificio. Nel 2007 infatti la società Gefim ha acquistato, insieme a Fintecna, dal demanio pubblico la proprietà della ormai fatiscente struttura. Il progetto di riqualificazione, in accordo con il colosso olandese Córío, prevede la trasformazione dell'imponente edificio in una galleria commerciale.

Il progetto per la trasformazione di Palazzo del Lavoro in un enorme centro commerciale è a cura dell'architetto Alberto Rolla.

Render interno della proposta di rifunzionalizzazione in centro commerciale. Fonte: Studio Rolla, 2014



La proposta per la riqualificazione prevede la realizzazione di una galleria commerciale all'interno dell'edificio, ispirata a quelle già presenti in centro a Torino (San Federico e Subalpina), quattro piazze pubbliche ed un'area verde situata di fronte all'edificio.

Per la galleria commerciale sarebbero riservati il piano terra e il primo piano, mentre verrà riservato il secondo piano alla ristorazione. Una grande piazza centrale interna, sulla quale si affacceranno i negozi, permetterà di ammirare le grandi colonne preesistenti realizzate da Nervi. Saranno, inoltre, realizzati un ascensore panoramico che porterebbe ad una piazza situata sul tetto, un impianto fotovoltaico di ultima generazione che si estenderebbe per due dei moduli che compongono la copertura dell'edificio e una passerella pedonale

che collegherebbe la monorotaia con il centro commerciale. Nel progetto sono comprese la realizzazione di una nuova rotonda su via Ventimiglia ed un parcheggio interrato di due piani che ospiterebbero 1800 posti auto. Per la realizzazione del parcheggio, però, saranno abbattuti i 260 alberi presenti nell'area del parco limitrofa al Palazzo del Lavoro, con la promessa di "compensare" la loro rimozione e al loro posto sarà realizzato, con molta probabilità, un prato pubblico che sovrasterà l'area del parcheggio coperto.

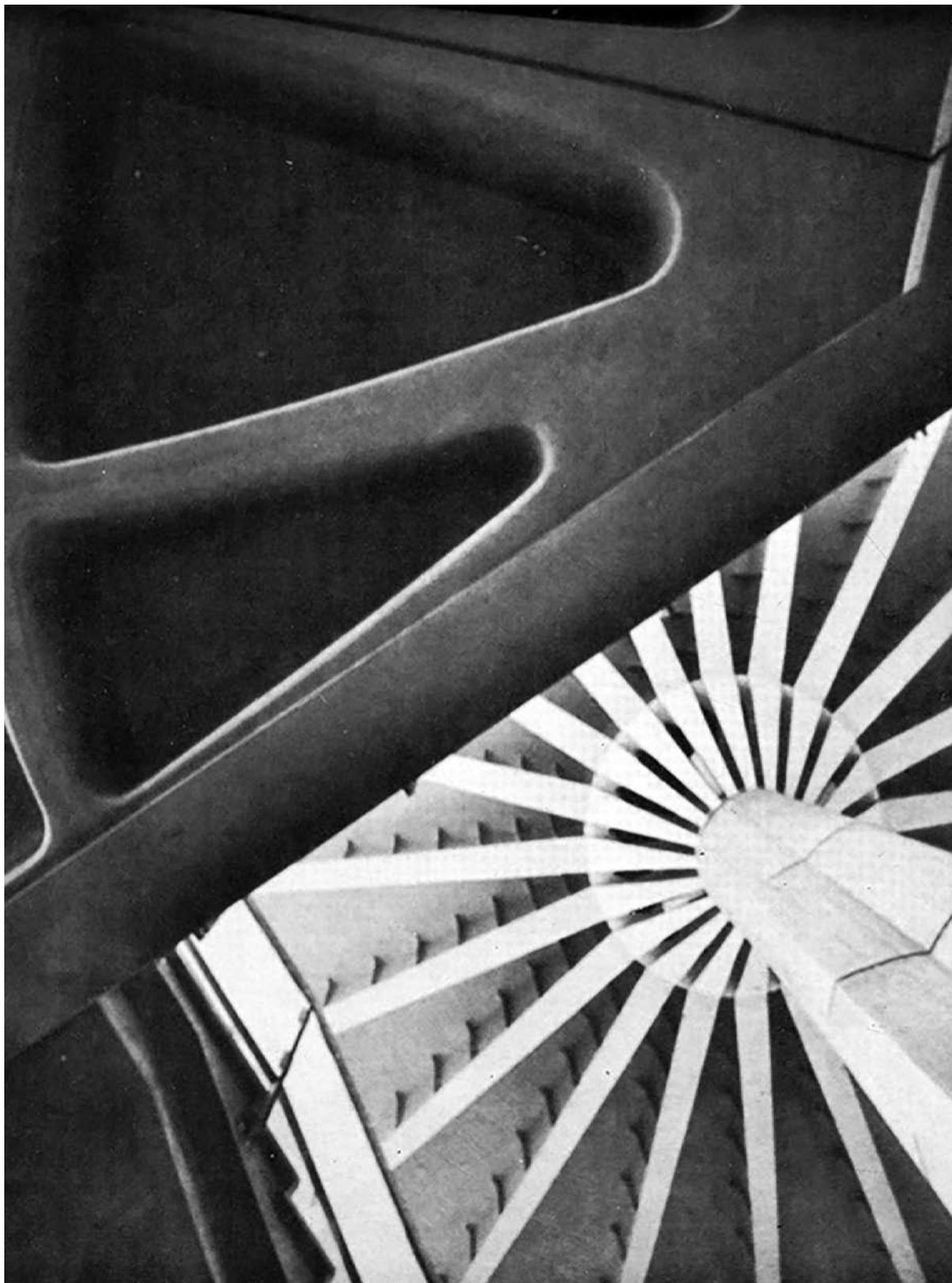
Per la progettazione degli spazi verdi, la società olandese Cório ha incaricato il paesaggista tedesco Andreas O. Kipar, già noto per la mutazione della Ruhr in parco naturale. Il progettista trasformerà il giardino antistante al Palazzo del Lavoro in uno spazio composto da due piazze pubbliche e fontane. Il suo compito sarà aggiungere degli spazi verde di qualità che potranno essere vissuti anche durante la sera.

Il progetto per la trasformazione del fatiscente edificio in un centro commerciale è stato però bloccato, nonostante fosse stato approvato dalla soprintendenza, a causa del ricorso presentato al Tar dalla società immobiliare 8 Gallery del Lingotto. Il Tribunale amministrativo regionale ha, infatti, accolto il ricorso annullando la delibera del Comune che avrebbe avviato la realizzazione del progetto di riqualificazione principalmente per due motivi: il primo è che il Comune ha optato una variazione parziale al piano regolatore anziché una strutturale per velocizzare la procedura ed imporre meno vincoli. Una variazione strutturale avrebbe, infatti, richiesto il coinvolgimento di un maggior numero di enti e di un maggior numero di accorgimenti. Il secondo motivo è stato il fatto che il Comune ha approvato la realizzazione del centro commerciale con un'estensione di 13 mila metri quadri quando sarebbe stato possibile fare edificare non più di 6 mila metri quadri, considerando il nuovo complesso come un centro commerciale naturale, cioè un agglomerato di singoli negozi, anziché considerarlo come il progetto di un unico complesso.

Fotoinserimento della proposta di rifunzionalizzazione in centro commerciale.

Fonte: Studio Rolla, 2014





Struttura portante del Palazzo del Lavoro. Fonte: atlasofplaces.com

STRUTTURA PORTANTE DEL PALAZZO DEL LAVORO

Una delle cose che caratterizzano di più il Palazzo del Lavoro di Nervi, è proprio la sua struttura portante. In questo capitolo si vuole mettere in evidenza come sono stati concepiti gli elementi che la compongono.

Il pilastro in C.A.

Il pilastro è forse l'elemento più caratterizzante del Palazzo del Lavoro. Oltre che dal punto di vista strutturale, questi 16 pilastri, posti ad un interasse di 40 m e che si innalzano per 20 m, sono l'elemento più rilevante presente nell'ampio spazio interno. Riguardo a ciò, Nervi commenta: *"Il problema ci è parso subito importante dal punto di vista architettonico, [...] un pilastrone abbastanza eccezionale, diverso da quanto mai fatto"*²¹. Grazie al suggerimento del figlio Antonio di realizzare elementi isolati e all'utilizzo combinato del calcestruzzo armato e dell'acciaio, fu inoltre in grado di realizzare una copertura di dimensioni così elevate nel poco tempo a disposizione.

²¹ (Comitato nazionale per la celebrazione del primo centenario dell'Unità d'Italia, 1961)

Ognuno di questi "pilastroni", riceve una sollecitazione dovuta all'azione del vento di parecchie tonnellate, che, grazie ad un braccio di 25 m, che genera un momento alla base di migliaia tonnellate per metro. Per poter sopperire a tali carichi, inizialmente si pensò ad un pilastro a tronco di cono rovesciato, ma, dato che la sezione alla base sarebbe risultata troppo tozza, era necessario utilizzare una sezione alla base che riducesse l'utilizzo di materiale mantenendo la resistenza agli sforzi necessaria. Vennero, perciò, realizzati pilastri a sezione orizzontale variabile, partendo da una sezione cruciforme di 5 m di larghezza alla base fino a raggiungere una sezione circolare in cima.

Il problema nel realizzare un pilastro di questo tipo, era raccordare in maniera graduale e corretta la sezione cruciforme con quella circolare, per poter fare ciò venne utilizzata una superficie geometrica rigata in modo da garantire la continuità di sezione per tutta la sua altezza.

Riguardo alla forma del pilastro, Nervi disse: *"Per la definizione della sua forma, ho fatto come penso sia opportuno fare: lasciarsi guidare cioè dalle necessità imposte ed accettare i suggerimenti che i fatti tecnici e costruttivi propongono"*²².

²² ibid

Un'altra particolarità di questi pilastri, è che al loro interno è presente un sistema di scolo delle acque meteoriche che vengono raccolte in copertura ispezionabile, grazie alla presenza di una scala metallica che consente di scendere fino alle fondazioni del pilastro in modo da poter effettuare eventuali manutenzioni.

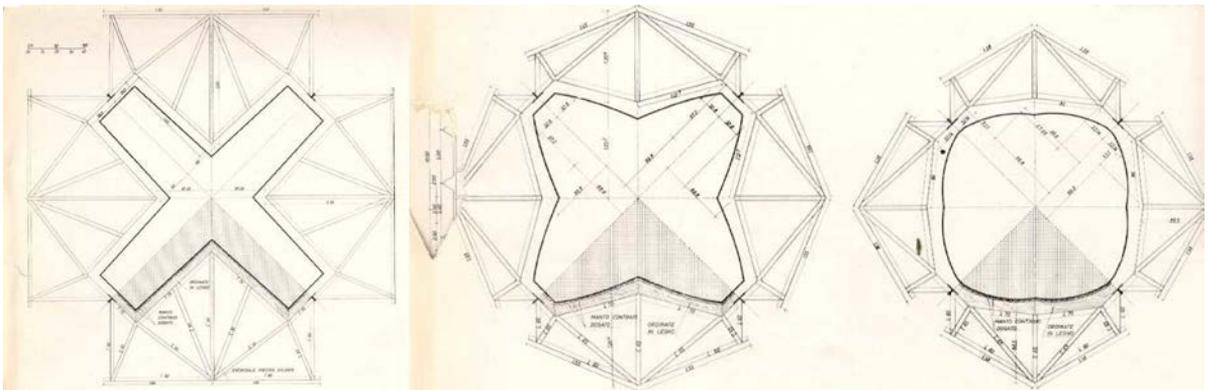
Un altro problema che è stato necessario affrontare durante la costruzione, quello relativo alla cassaforma. Non essendo possibile utilizzare una unica cassaforma alta 20 m a causa della mancanza di tempo e della complessità nella sua realizzazione, essa è stata suddivisa



Fase di costruzione di un pilastro principale cruciforme.
Fonte: Nervi P., 1954

in parti sei parti auto-stabili ed auto-centrabili aventi peso tale che fosse possibile sollevarle con le gru e con un volume tale che fosse possibile terminare il getto entro la giornata. Per assorbire l'inevitabile differenza cromatica che si sarebbe presentata nei getti fatti in tempi diversi, è stato previsto, su suggerimento dei costruttori, uno scuretto di 2x2 cm in corrispondenza dello stacco dei due getti consecutivi.

Un'altra peculiarità delle casseforme, realizzate in metallo, era il fatto di essere rivestita internamente da due strati di tavole di legno, il primo fatto senza particolari attenzioni e il secondo, quello più interno che avrebbe lasciato l'impronta sul pilastro una volta solidificato il calcestruzzo, composto da doghe di legno di larghezza non superiore a 12 cm fissate tra loro ad incastro di tipo "maschio-femmina" e inchiodate al primo strato, poi levigate e rifinite. Dopo ogni getto, le casseforme venivano ripulite per poter eseguire il getto del pilastro successivo. A Nervi piaceva sottolineare il fatto che si sarebbero potuti realizzare



Casseforme in metallo utilizzate per la realizzazione del pilastro principale.

Fonte: Archivio edilizio di Torino

160 pilastri, anziché 16, con le stesse casseforme, in quanto risultavano come nuove al termine di ogni getto.

Le armature sono state realizzate con barre perimetrali da 26 mm di diametro disposte in verticale seguendo la variazione di sezione e con staffe orizzontali disposte con un passo di 30 cm. Tra il montaggio e fissaggio dell'armatura, che richiedevano 7 giorni, e il getto di tutti i 6 settori del pilastro, che richiedeva ulteriori 3 giorni, per ogni pilastro sono stati necessari 10 giorni in totale per essere ultimato.

La copertura metallica

È l'elemento che, insieme al pilastro, completa il singolo "fungo". Da progetto iniziale, la copertura doveva essere realizzata anch'essa in calcestruzzo armato, ma, a causa della scarsità di tempo, Nervi decise di realizzarla in carpenteria metallica, in quanto, con questa tipologia costruttiva, una gran parte dell'opera poteva essere realizzata in officina mentre venivano gettati i pilastri in cantiere, riducendo così i tempi di costruzione.

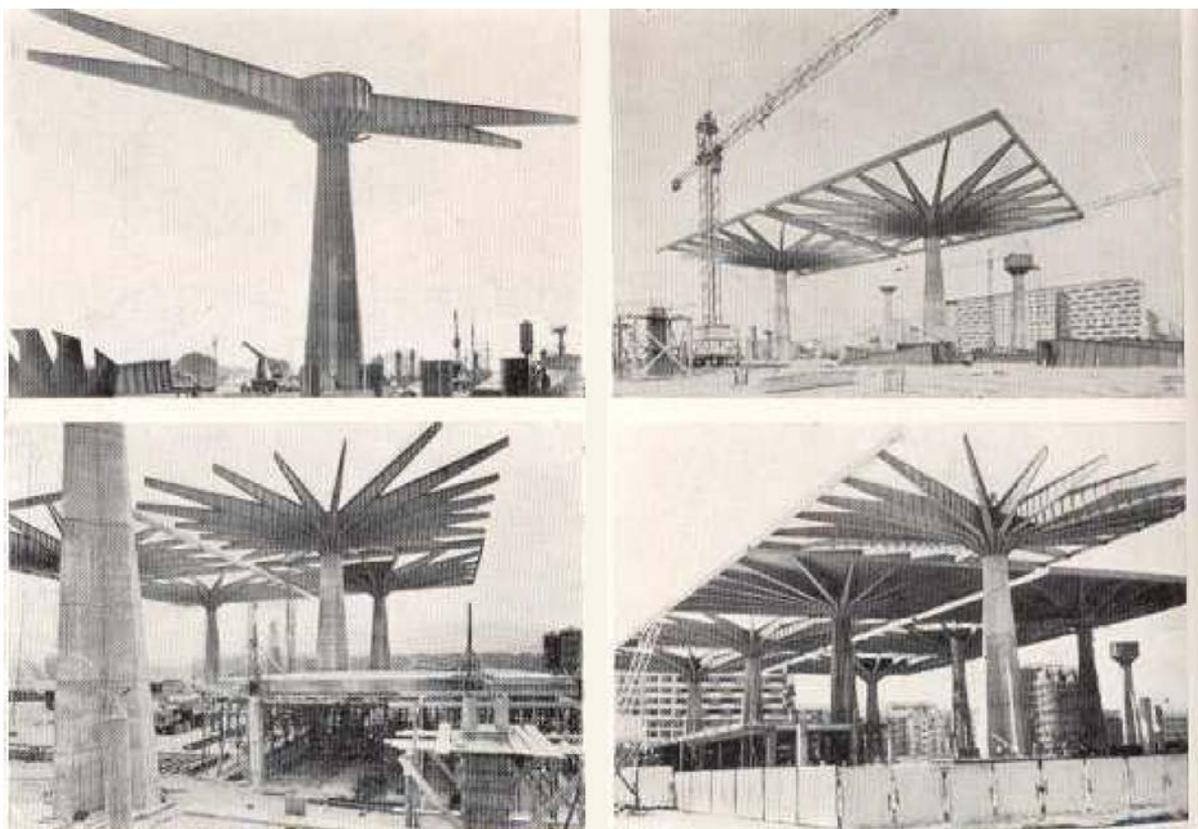
La progettazione di tutta la parte riguardante la carpenteria metallica fu affidata all'inge-

gnere Gino Covre, supportato dall'impresa Badoni di Lecco.

La superficie totale di copertura venne suddivisa in 16 elementi quadrati di dimensione 40x40 m, separati tra loro da una fascia di lucernari di 2 m di larghezza, che garantiscono una maggiore illuminazione nella parte più centrale della zona espositiva. Ogni elemento è sorretto da una raggiera di 20 mensole, anch'esse in carpenteria metallica, che dovevano rispondere alla necessità di posare l'elemento di copertura orizzontale realizzato in acciaio, avente superficie di 16 mq, sopra un piano di posa circolare e dovevano lasciare in vista l'intradosso della copertura e le nervature metalliche portanti. Vennero quindi proposte due

Fasi di assemblaggio della copertura in acciaio

Fonte: la Celebrazione del Centenario, a cura del Comitato nazionale per la celebrazione del primo centenario dell'unità d'Italia



soluzioni di realizzazione: una prima che prevedeva la realizzazione di queste mensole ad anima piena con sezione variabile ad "I", con nervature verticali di irrigidimento con l'anima aperta ed una seconda che prevedeva una struttura a telaio a nodi alleggeriti e punti di momento secondario nullo prestabiliti. Venne scelta dalla commissione la prima soluzione anche se era quella più pesante e meno economica. Le travi erano di 3 dimensioni differenti: 20 m, 16,5 m e 15,6 m.

Data la scelta progettuale delle 20 mensole, è stato necessario prevedere un sistema di giunzione centrale con il pilastro, che si è rivelato di rilevante importanza anche dal punto di vista architettonico. Tale sistema, è composto da un capitello a tronco di cono con costo-

lature radiali fissato al pilastro tramite tirafondi, che continuano verticalmente all'interno del capitello stesso e irrigidita grazie ad una staffatura circolare preventivamente saldata alla parete interna del capitello, e un tamburo circolare, realizzato tramite saldatura in opera di quattro elementi prefabbricati e fissato mediante bullonatura al capitello. Tale elemento arrivò a pesare in totale 13 tonnellate circa. Al tamburo venne fissata la raggiera di travi mediante bullonatura.

La copertura, fu concepita come un sistema autoportante di pannelli in acciaio, realizzati mediante chiodatura elettrica di particolari elementi sagomati a "C" e rivestiti da uno strato impermeabilizzante di bitume con finitura a graniglia. Ogni elemento di copertura è completato con quattro travi perimetrali, con sezione a "C" ad anima piena, disposte con l'anima in verticale, in modo da generare un sistema irrigidente per la raggiera di travi a sbalzo, necessario a contrastare dannosi effetti torsionali, e da limitare le deformazioni finali per flessione, ripartendo parte del carico dalla trave con il maggiore oggetto a quella con il minore oggetto.

A dare continuità ai solai, come già accennato prima, sono presenti delle strisce continue di lucernai. Questi lucernai sono costituiti da un unico telaio due falde studiato in modo da assorbire le dilatazioni termiche che potrebbe avere la struttura del solaio di copertura. I vetri impiegati sono quelli retinati di 5-6 mm di spessore.

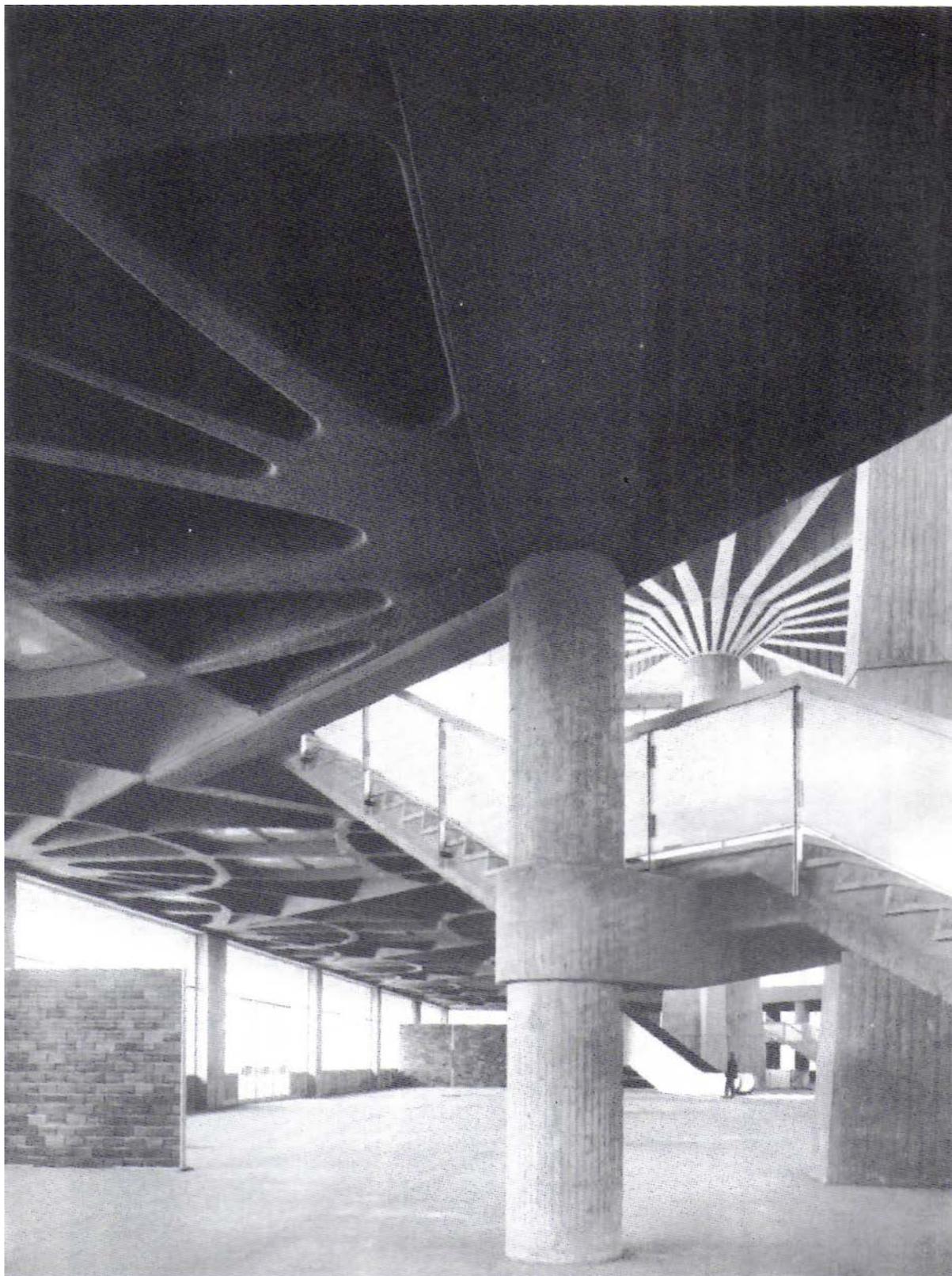
Il solaio nervato

La balconata perimetrale presente al primo piano è stata realizzata mediante un solaio nervato. Questa tipologia di solaio è sintesi di massima resistenza meccanica combinata all'ottimizzazione del materiale e di assoluta leggerezza. Questa tecnica costruttiva, si basa sulla teoria secondo la quale le tensioni principali, ovvero trazione e compressione, si sviluppano lungo delle linee chiamate linee isostatiche. La forma risultante che ne deriva è straordinaria sia dal punto di vista compositivo, sia da quello strutturale: le nervature curvilinee seguono quindi le linee isostatiche, concentrando il materiale nelle zone che maggiormente vengono sollecitate, sfruttando le caratteristiche di resistenza al meglio: le

(A sinistra) Fase di realizzazione solaio nervato, (A destra) Vista dall'alto cassaforma nervature del solaio.

Fonte: la Celebrazione del Centenario, a cura del Comitato nazionale per la celebrazione del primo centenario dell'unità d'Italia





Solaio nervato della balconata perimetrale.

armature metalliche seguono le isostatiche di trazione, mentre il calcestruzzo è posto in corrispondenza di quelle di compressione.

Nervi riteneva la resistenza per forma la più efficace ed efficiente tra tutte: "l'efficienza delle strutture è frutto più della forma e di una diffusa attitudine resistente, che non di concentramenti di azioni agenti e di sezioni resistenti lungo singoli elementi, come si ha nei più usuali sistemi a nervature principali e secondarie"²³.

23 (Nervi P. , 1954)

Per la realizzazione dei solai nervati, è stato necessario utilizzare delle casseforme in ferro-cemento, avente forma in negativo rispetto a quella desiderata per il solaio, prefabbricate con l'ausilio di stampi in gesso. Una delle caratteristiche più importanti di questa tipologia di cassero era la possibilità di essere riutilizzato, come è avvenuto per le casseforme utilizzate per i pilastri, permettendo la realizzazione di un solaio modulare. Ciò poteva avvenire grazie ad un sistema di ponteggio realizzato in tubi innocenti che permetteva alla cassaforma di scorrere orizzontalmente su dei binari e di spostarsi verticalmente, grazie a dei martinetti idraulici, per posizionarsi alla quota desiderata. "Questo sistema è risultato economicamente convenienti per solai di una certa dimensione e con sostegni uniformemente distanziati."²⁴

24 (Nervi P. , 1954)

Una volta posizionato, all'interno del cassero venivano inserite le armature e, prima di effettuare il getto, veniva spennellato con una sostanza oleosa avente la funzione di facilitare il disarmo dalla cassaforma una volta terminata la stagionatura del conglomerato cementizio. Grazie a questa tipologia di cassero, si ottiene una superficie a vista del solaio levigata a tal punto da non essere necessario alcuna rifinitura ad intonaco.

Il curtain wall

Ultimati i solai isostatici della balconata laterale si è passati al montaggio del curtain wall presente in facciata. Esso è l'elemento che colpisce maggiormente vedendo dall'esterno il Palazzo del Lavoro, sia per le sue dimensioni (19 metri di altezza per un'estensione lineare di oltre 600 metri) sia per l'ingegnosità con la quale è stato concepito: la tecnica con il quale venne costruito, permise una veloce realizzazione grazie alla sua struttura modulare che poteva essere ripetuta in modo da adattarsi all'esigenza del progetto mantenendo allo stesso tempo dei costi di realizzazione contenuti. Nel progetto di Nervi per la realizzazione delle pareti vetrate perimetrali sono presenti tutte le linee guida per poterle definire curtain wall nonostante esse non racchiudessero tutti i principi.

Il progetto del curtain wall fu diviso in due parti grazie alla particolare conformazione dell'edificio. La balconata perimetrale presente al primo piano, che si estende con uno sbalzo della soletta all'esterno, permise di elaborare due soluzioni di vetrata differenti: la prima, più semplice, fu adottata per tutto il perimetro al livello del piano terra, la seconda, più complessa ed innovativa, adottata per il resto delle facciate sovrastanti la balconata.

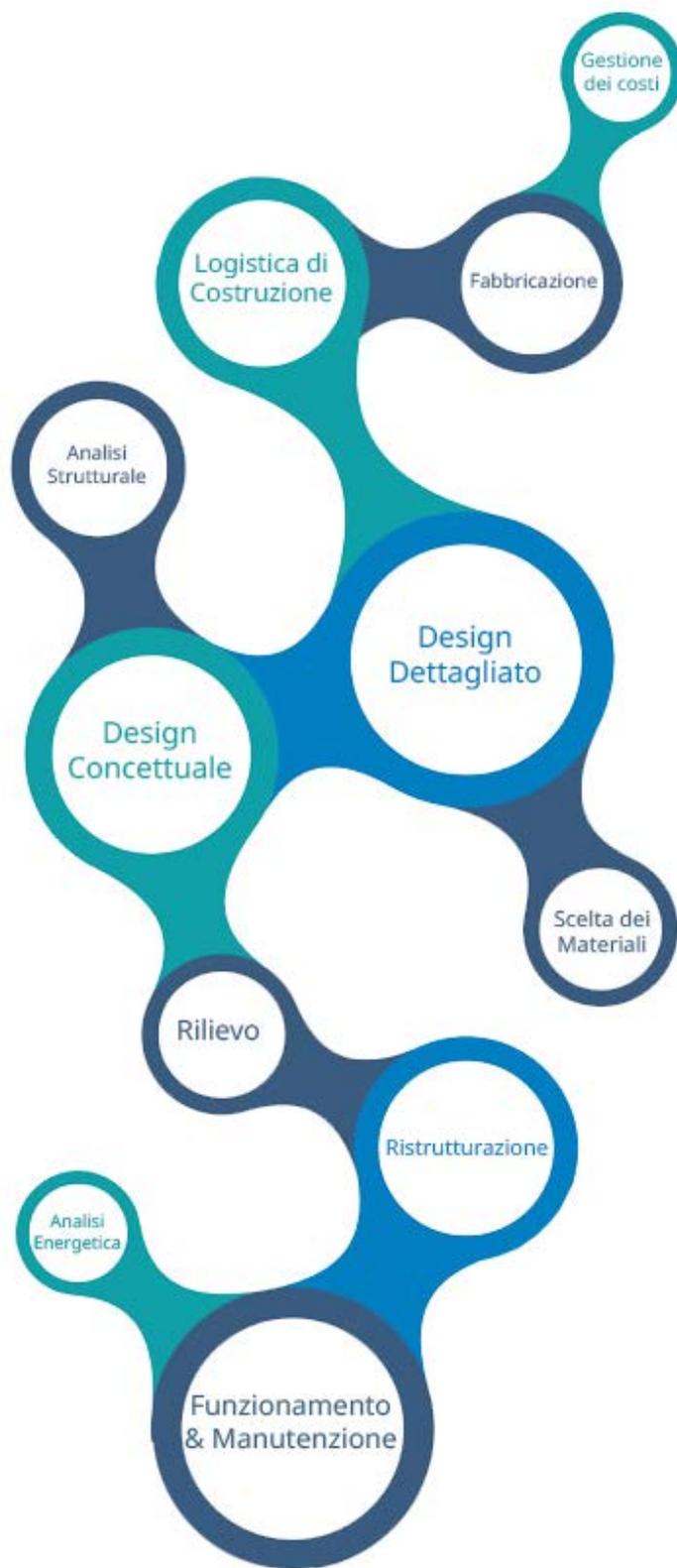
La fascia presente al piano terra è realizzata con una chiusura in parte vetrata ed in parte opaca inserita all'interno della maglia strutturale di pilastri in calcestruzzo realizzati per sostenere la balconata perimetrale, mentre la parte superiore della chiusura verticale fu realizzata interamente da superfici vetrate, interrotte solamente dalla sua struttura.

Ogni parete vetrata è stata progettata, per quanto riguarda la ripartizione dei carichi verticali dovuti al peso proprio, come struttura autoportante indipendente dal resto dell'edificio, essendo appoggiata alla balconata perimetrale situata al primo piano e al tempo stesso l'estremità superiore è indipendente dalla copertura. Ogni facciata, è collegata a 32 ritti verticali esterni, detti anche "fusi", attraverso elementi di ancoraggio puntuali che hanno la funzione di resistere agli sforzi orizzontali dovuti all'azione del vento sulla facciata. La forma che essi avrebbero avuto, fu pensata in modo tale da riprodurre il solido di uniforme resistenza che riproduce l'andamento degli sforzi del momento.

La struttura dei ritti è costituita da uno scheletro in acciaio composto da un'orditura principale longitudinale ed una secondaria trasversale, rivestita da lastre in acciaio saldate tra loro. Alla base, il fuso venne giuntato in officina ad un particolare appoggio cardanico, mentre all'estremità superiore furono collegate due bielle che fungevano da collegamento con le travi di bordo della copertura.

Da Sinistra: Scheletro interno dei fusi, Saldatura della struttura interna dei fusi, Rivestimento in lamiera.
Fonte: Rivista costruzioni metalliche n°3, 1961





INTEROPERABILITA' IN AMBITO BIM

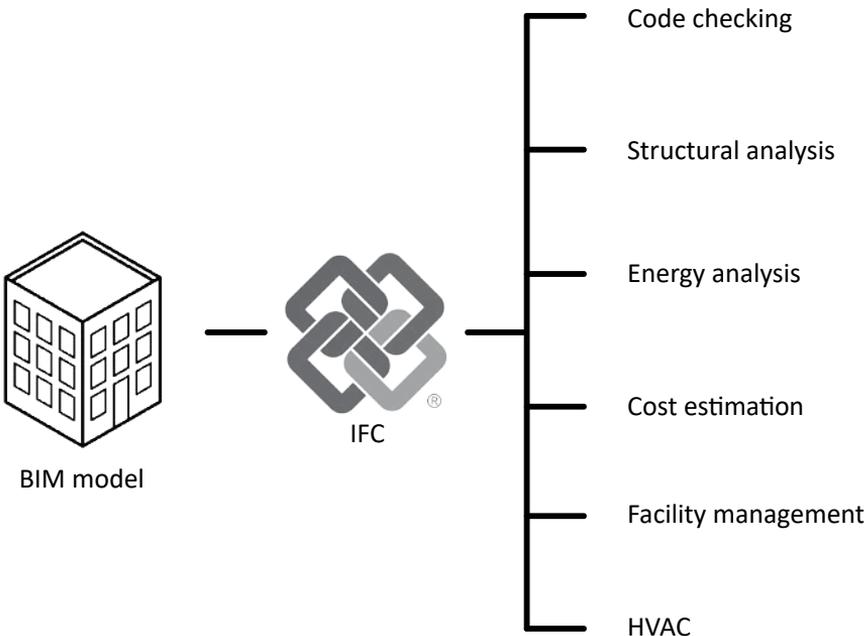
Problema odierno

In collaborazione con Andrea Tomalini

Nel mondo dell'edilizia si hanno molteplici attività che devono collaborare tra loro e non esiste un programma in grado di portare a termine tutte queste attività. Così nasce l'esigenza di far comunicare professionisti differenti che lavorano con applicazioni differenti. Per far in modo che il BIM non si limiti solo alla fase della progettazione, ma che diventi effettivamente un flusso di informazioni che iniziano durante la progettazione e finiscono con la demolizione dell'edificio, è necessario che lo scambio di dati e modelli tra le diverse applicazioni sia possibile.

I software oggi in commercio però oltre a progettare e risolvere problemi isolati sono anche sistemi proprietari, quindi chiusi che impediscono la comunicazione con programmi di produttori differenti. Per rispettare la logica del flusso di lavoro BIM oggi tutte le parti coinvolte devono essere consapevoli degli standard di scambio che caratterizzano il proprio software, ed inoltre adottare un protocollo di scambio predefinito. Questo tipo di azione è reso difficile anche dal fatto che i modelli sono sempre più ricchi di informazioni e questa loro elevata complessità non permette l'identificazione di standard universali.

Per risolvere questo problema di comunicazione nel 2001 è stata fondata l'International Alliance for Interoperability (IAI), rinominata nel 2007 buildingSMART™, è una organizzazione



Gracifizzazione del processo di trasformazione da modello proprietario a modello condivisibile attraverso protocollo IFC

senza scopo di lucro ed ha come missioni: quella di pubblicare le norme per le Industry Foundation Classes (IFCs) come base per condividere informazioni di progetto; la stesura e aggiornamento dell'International Framework Dictionaries (IFD) Library, cioè una libreria che fornisce la descrizione dei parametri necessari affinché il'emissione e la ricezione dei dati avvenga senza difficoltà; specificare attraverso l'Information Delivery Manual (IDM) quando certe informazioni potrebbero essere richieste durante la fase di progettazione o durante la vita dell'edificio stesso, la stesura dell'IDM spesso può essere difficoltosa nelle situazioni in cui manchi un processo ben delineato e le informazioni vengono così a mancare. Quello dell'interoperabilità sarà un requisito raggiunto solo nel momento in cui: siano state redatte le normative necessarie per la definizione degli standard tecnici che definiscono il flusso BIM; tutti i modellatori conterranno al loro interno tutti gli standard necessari per la creazione di file che mantengano, in modo inequivocabile, al loro interno le stesse informazioni del modello originale; le problematiche legate all'operazione saranno nascoste all'utilizzatore del software e saranno eseguite automaticamente dal modellatore; i progettisti, una volta aggiornati e consapevoli dello strumento che stanno utilizzando, struttureranno le informazioni e la progettazione in modo tale da non avere perdite di informazioni.²⁵

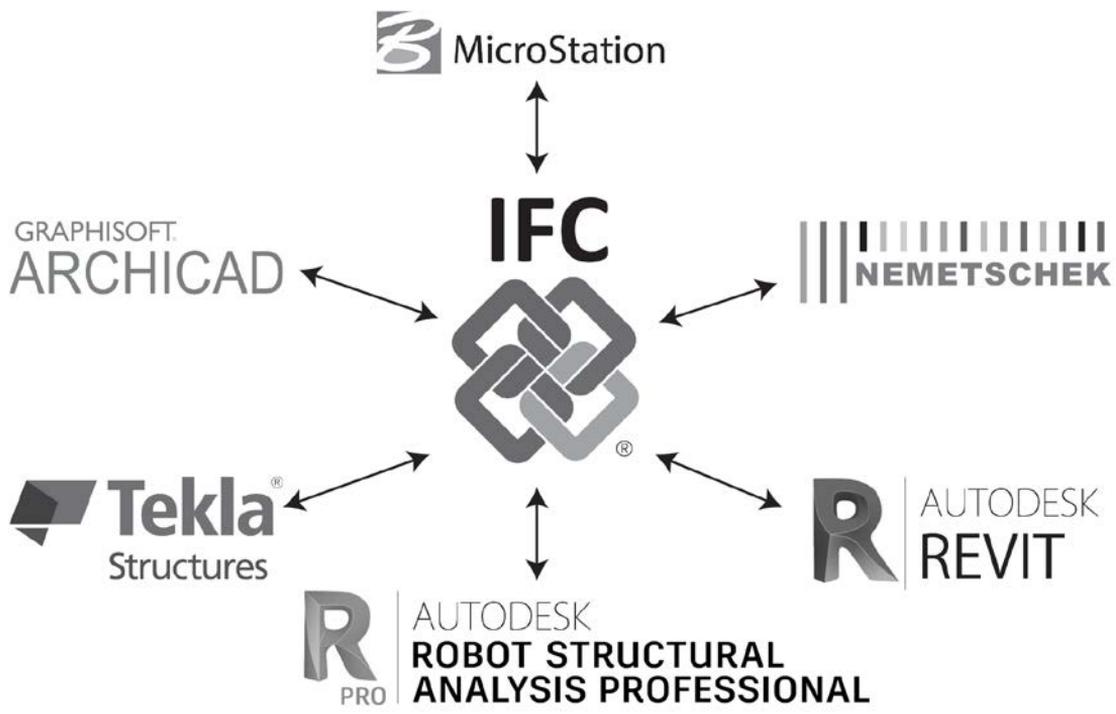
25 (Meossi, 2007; Calvano, 2019)

Definizione dei formati univoci

Il problema di trasferimento di informazioni tra software esiste sin dalla diffusione dei primi programmi CAD 2D tra il 1970 e il 1980, quando il software più diffuso tra i professionisti era Intergraph. In quel periodo, alcune aziende iniziarono a cercare un modo per tradurre i dati provenienti dai file di progetto di Intergraph convertendoli in altri formati. Fu quando ci si rese conto che venivano spese moltissime risorse alla conversione di dati tra i vari sistemi CAD esistenti che nacque la necessità di sviluppare un linguaggio univoco per lo scambio. Nacque così il formato IGES (Initial Graphics Exchange Specification) dall'unione delle ricerche di General Electric e Boeing. Grazie alla nascita di questo nuovo formato, ogni azienda produttrice ebbe bisogno di realizzare solamente dei software che permettessero la conversione, l'importazione e l'esportazione verso il formato IGES.

Per poter fare ciò, si è dovuto tenere conto che, dato un determinato linguaggio di scrittura, le informazioni ed i loro flussi possono essere gestiti con tre modalità differenti:

- **Collegamento diretto** che, utilizzando un'interfaccia di scambio chiamata API (Application Programming Interface), estrae le informazioni dal primo software e le invia al programma ricevente. Molto spesso questo processo è supportato dalla creazione di un file temporaneo intermedio che permette la conversione delle informazioni da un formato all'altro.
- Utilizzo di un **Formato di scambio privato**, sviluppato da una specifica azienda, per il trasferimento di dati tra software della stessa casa produttrice, come ad esempio il formato DXF (Data eXchange Format) di proprietà Autodesk.
- Utilizzo di **Formati di scambio pubblici** che si avvalgono di un linguaggio di pubblico dominio come l'XML o i file di testo. Un esempio è il formato IFC.



Graficizzazione del concetto di interoperabilità tra software attraverso la codifica di un protocollo comune
Ispirato a fonte: graphisoft.com/archicad/partner_solutions/bimcollab/

Ovviamente passando da una modellazione bidimensionale ad una tridimensionale il numero e le tipologie di informazione contenuti nei modelli sono aumentate: oltre alle informazioni geometriche che sono diventate più complesse, sono stati inseriti parametri, proprietà e relazioni tra i vari oggetti. A causa di questo aumento di informazioni, è sempre più necessario valutare quali di esse siano effettivamente necessarie alle operazioni che si andranno ad eseguire e con quali modalità dovranno essere trasferite.

L'obbiettivo da raggiungere è quello di poter utilizzare software diversi, ciascuno con le proprie caratteristiche e funzioni, senza però avere nessuna perdita di informazioni nella fase di interscambio, in modo tale che sia possibile fare cooperare le diverse discipline presenti nella fase di progettazione.

Per poter fare ciò, è necessario evitare che il formato di interscambio sia prodotto da un ente privato che ne deterrebbe il monopolio. Per questo motivo sono stati realizzati dei formati standard pubblici come l'IFC (per l'ambiente BIM) e il CIS/2 (per l'acciaio) che sono riconosciuti a livello internazionale.

Industry Foundation Classes (IFC)

Come già detto, l'Industry Foundation Classes, ovvero l'IFC, è un formato standard pubblico creato dall'International Alliance for Interoperability per lo scambio di dati tra software di diverse case produttrici ed è pensato specificatamente per agevolare l'interoperabilità tra i singoli programmi utilizzati nel settore delle costruzioni e perciò deve poter contenere tutte le informazioni riguardo al ciclo di vita, agli studi di fattibilità, alla progettazione, costruzione e manutenzione di un edificio, ciò comporta che il formato IFC non rappresenti solamente elementi tangibili come muri, pilastri e finestre, ma anche elementi più astratti come costi di costruzione, spazi, fasi di progetto, ecc.

L'IFC è un modello che si basa sulla gerarchizzazione delle informazioni, che non è collegato a nessun produttore di software e nasce come formato di scambio tra software privati di diversi produttori, che devono poter essere definiti "IFC compilant", cioè devono essere in grado di importare ed esportare modelli in formato IFC.

Lo sviluppo di questo formato si basa sul linguaggio di modellazione dell'ISO-STEP, progetto di standardizzazione realizzato dall'ISO (International Organization for Standardization) denominato "Standard for the Exchange of Product model data", e la sua prima versione, l'IFC 1.0, risale al 1997.

Le specifiche del modello IFC sono state rese pubbliche ed accessibili, in modo tale da permettere agli sviluppatori di software di inserire nelle loro applicazioni la funzione di importazione ed esportazione dei file IFC.

L'IFC è composto da una struttura gerarchica divisa in quattro macro-livelli, ognuno dei quali è suddiviso in diverse categorie dove vengono definiti i differenti elementi. Questa struttura si basa sul fatto che una determinata entità potrà fare riferimento solamente ad un'altra di pari livello o di livello inferiore, in modo tale da permettere una continua crescita, possibile solamente con la combinazione di elementi di basso livello che realizzeranno definizioni di livello superiore. Questa gerarchia permette inoltre la suddivisione degli elementi in base alla disciplina, rendendo possibile lo scambio dello stesso modello tra software di ambito diverso.

I quattro macro-livelli sono:

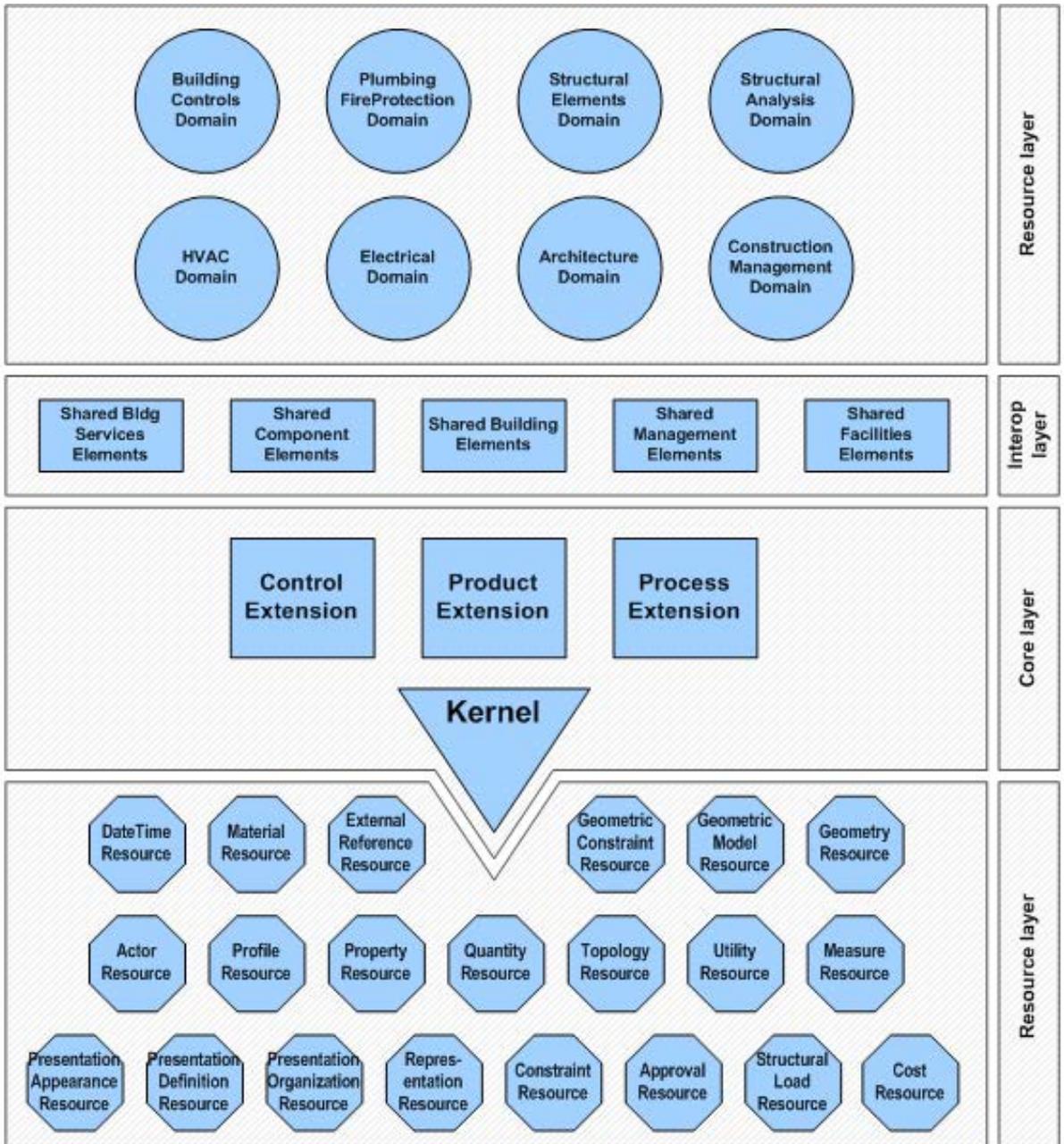
- Resource Layer: che contiene le proprietà di base (ad esempio geometria, materiale, costo) che verranno utilizzate come risorsa per la definizione delle entità di livello superiore;
- Core Layer: che contiene gli elementi più astratti utilizzati nei livelli successivi;
- Interoperability Layer: che comprende gli "Shared Object", come ad esempio gli elementi fisici dell'edificio (muri, pilastri, porte);
- Domain Layer: che costituiscono le varie discipline di appartenenza dei vari elementi (ad esempio architettonico, strutturale, manutenzione, ecc).

Per ogni entità, l'IFC crea quindi una struttura ad albero, dove ogni livello rappresenta proprietà e relazioni con altri elementi.

Inizialmente, l'IFC doveva trasferire solamente elementi geometrici parametrici semplici come muri, solai e coperture, ma attualmente, grazie alle successive versioni di IFC, è possibile codificare forme complesse come solidi derivanti da estrusioni o superfici parametriche e tutti i tipi di relazioni che intercorrono tra i vari componenti di un edificio.

Livelli che compongono la struttura di un modello IFC.png

Fonte: standards.buildingsmart.org



Lo stato attuale

In ambiente BIM, implementare l'interoperabilità ha permesso, e permetterà in futuro, di ridurre drasticamente i flussi di lavoro che si verificano all'interno di un progetto. Per far sì che questo miglioramento avvenga, non basta avere solamente un corretto scambio di informazioni, ma è necessario definire le informazioni specifiche da trasferire in base alle esigenze del caso. Ad esempio, un progettista che si occupa della parte strutturale avrà bisogno di ricavare dal modello le informazioni pertinenti alla struttura. Tale gruppo di informazioni è contenuto nella struttura dell'IFC ed è chiamato Model View. La Model View Definition (MVD) è quindi la parte che snellisce il flusso di lavoro e identifica precisamente quali informazioni trasferire in un determinato contesto.

Un altro linguaggio che attualmente viene utilizzato per lo scambio di informazioni è l'XML (Extensible Markup Language), che è un'estensione dell'HTML. Da questo linguaggio si sono sviluppati sette formati attualmente utilizzati nel campo delle costruzioni:

- OpenGIS: che definisce il flusso dei dati geospaziali e di localizzazione;
- gbXML (Green Building XML): utilizzato principalmente in ambito delle analisi energetiche;
- ifcXML: che è una sottocategoria dell'IFC scritta in XML;
- BIM Collaboration Format (BCF): progettato principalmente per la definizione e la condivisione degli errori connessi ad oggetti specifici di una vista del modello;
- CityGML: utilizzato per lo scambio di informazioni 3D di modelli di città e paesaggi;
- aecXML: utilizzato come alternativa per la condivisione di informazioni BIM sviluppato da buildingSMART;
- agcXML: formato di condivisione tra progettisti e costruttori realizzato dalla AGC, un'associazione americana di costruttori.

Lo sviluppo dei formati di scambio da solo non basta per raggiungere un'ottimale interoperabilità. Infatti, se da un lato l'IFC definisce la struttura con la quale catalogare le informazioni, dall'altro queste informazioni dovranno essere successivamente interpretate e tradotte nelle varie lingue per essere capite. Come già anticipato, in questa direzione si sta muovendo buildingSMART International, attraverso l'International Framework of Dictionaries (IFD). L'obiettivo è quello di realizzare una libreria internazionale multilingua open-source, basata sui concetti presenti nella norma ISO 12006-3 del 2007, dove viene definita una struttura condivisa per classificare le informazioni dell'industria delle costruzioni. Uno degli obiettivi è quello di integrare all'interno del formato IFC la libreria IFD.

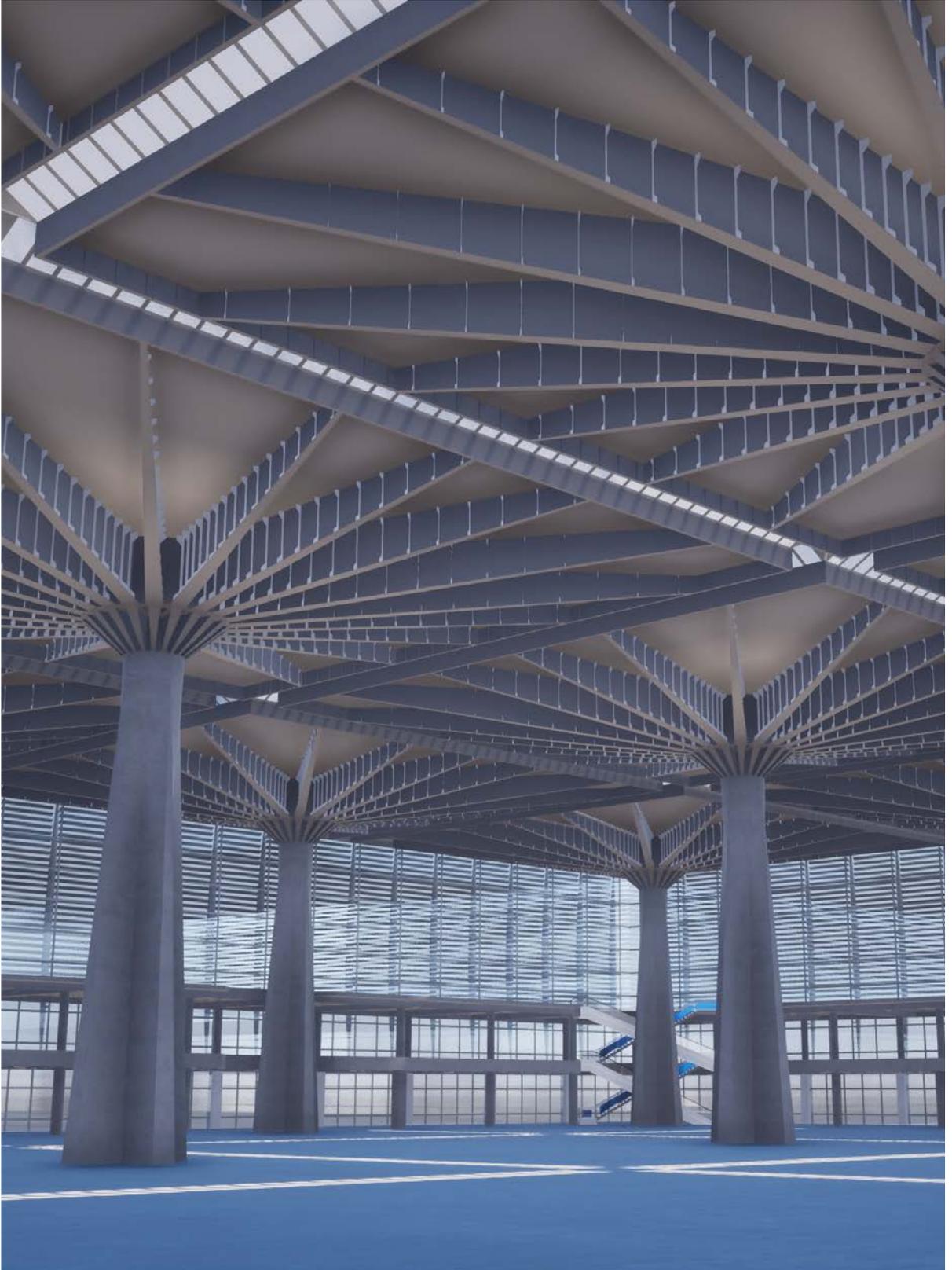


Immagine fotorealistica interno del
Palazzo del Lavoro

MODELLAZIONE IN AMBIENTE BIM

In collaborazione con Andrea Tomalini

Lo scopo di questa tesi è quello di dimostrare come l'interoperabilità tra software BIM e software di calcolo strutturale sia un punto forte di entrambi questi strumenti e che possa facilitare e velocizzare il lavoro del progettista. Nello specifico, si andrà ad analizzare come i due software Revit e Robot Structural Analysis, entrambi sviluppati da Autodesk, riescano ad interagire tra loro anche quando si esce fuori dallo schema ordinario della progettazione. Per far ciò, il caso studio che si andrà ad analizzare è una delle opere più intriganti dal punto di vista architettonico strutturale della città di Torino: il Palazzo del Lavoro di Pier Luigi Nervi, che verrà modellato prima in ambiente BIM, tramite il software Revit, e successivamente trasferito al software di calcolo strutturale Robot Structural Analysis.

Per la modellazione del Palazzo del Lavoro su Revit, è stato necessario analizzare e ogni singolo componente architettonico, in particolar modo ogni elemento che compone il sistema a "fungo" caratteristico dell'edificio, e modellare singolarmente questi elementi denominati all'interno dell'ambiente Revit come "famiglia", in modo da poter successivamente ricostruire l'intero edificio.

Strumenti

Revit: Revit è un software BIM sviluppato dalla Revit Technologies Inc. ed acquistato nel 2002 dalla Autodesk. Come per molti software BIM, Revit si basa su una modellazione di tipo parametrico, ciò consente all'utente di modificare il modello variando dei parametri senza dover necessariamente partire da zero. Ciò che lo contraddistingue dai software concorrenti, è la capacità di riprodurre il modello in un modo molto simile alla realtà, ciò permette al progettista di creare un modello che sia il più dettagliato possibile e che sia realizzabile.



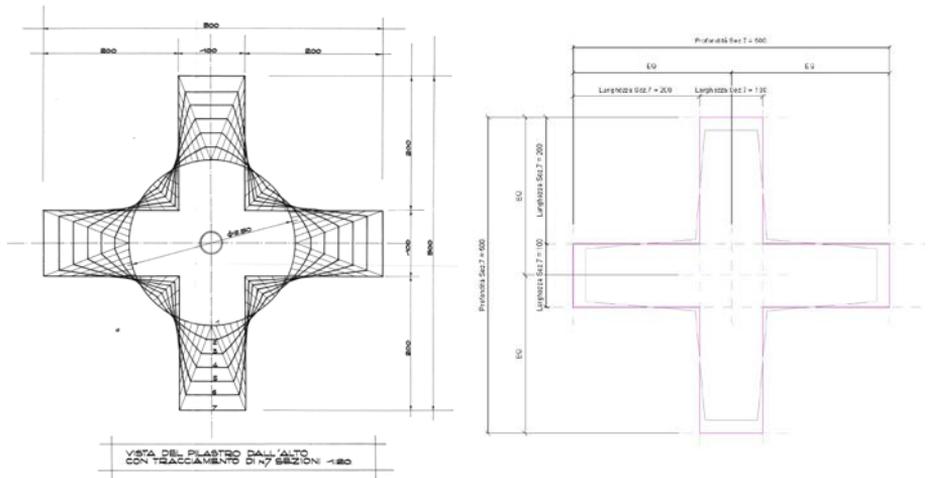
Logo Autodesk Revit.

Fonte: autodesk.com

Modellazione “Pilastro Strutturale”

Per la realizzazione dei pilastri strutturali è stato necessario partire dal modello di famiglia “pilastro strutturale”, in modo da avere, una volta realizzato e posizionato il pilastro all'interno del progetto, una corrispondenza nel modello analitico.

Come già detto in precedenza, il pilastro è una superficie geometrica rigata ottenuta dal raccordo di una sezione cruciforme alla base ed una sezione circolare in sommità. Per riuscire a modellare il pilastro è stato necessario disegnare cinque piani di riferimento intermedi equidistanti in aggiunta ai livelli di riferimento, sui quali sono state posizionate successivamente le sezioni.

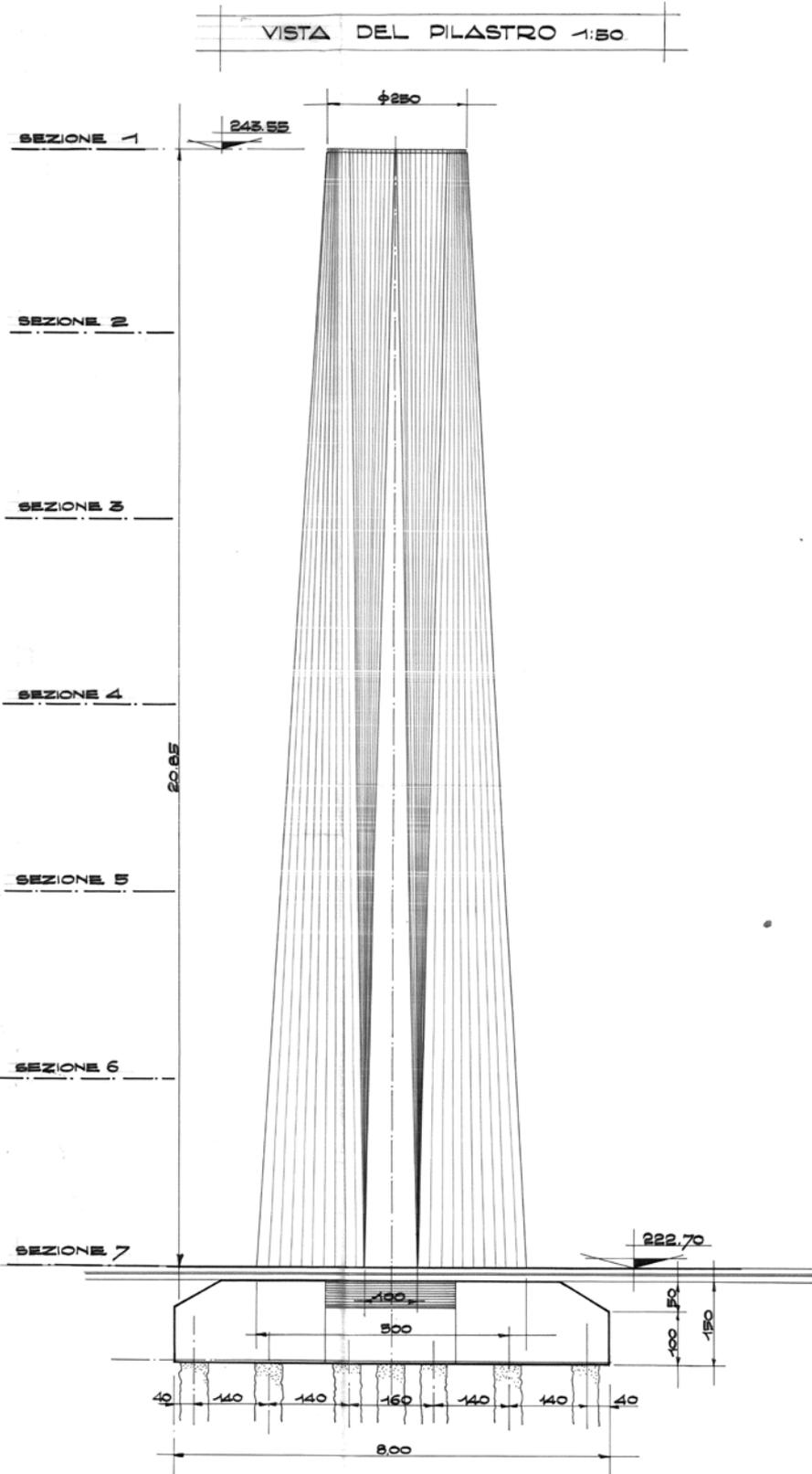


Tracciamento sezioni pilastro. Fonte: Archivio edilizio (a sinistra), Parametrizzazione sezione 7 all'interno della famiglia pilastro strutturale (a destra)

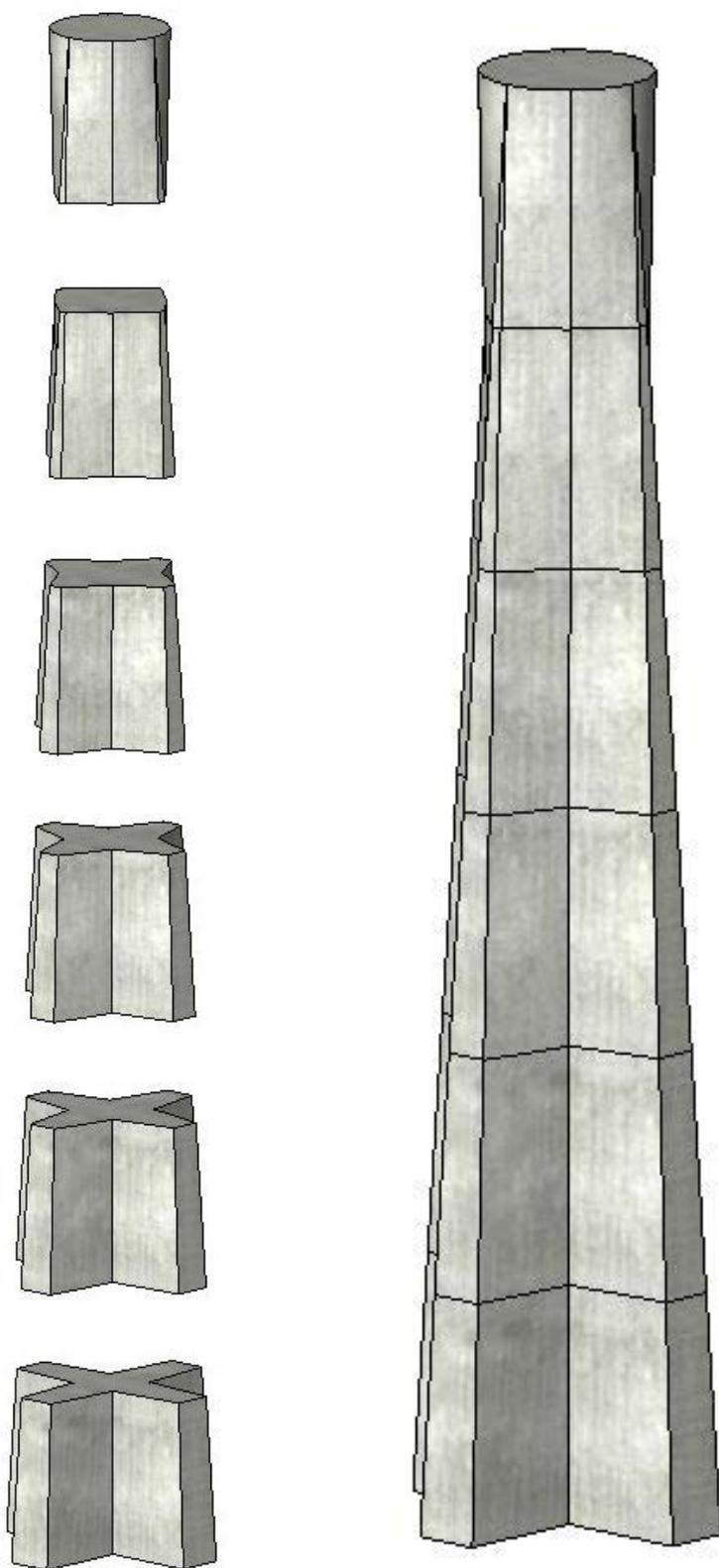
Nonostante non fosse necessario in quanto questo pilastro è un elemento unico nel suo genere, è stato deciso di parametrizzare le sue sezioni, in modo tale da poter riutilizzare la famiglia nel caso si volesse riproporre questa tipologia specifica di pilastro in un eventuale progetto di riqualificazione. Per fare ciò è stato necessario studiare i disegni di progetto di tale elemento. Partendo dal disegno esecutivo di Nervi, si può vedere come la definizione delle sezioni intermedie sia il risultato geometrico della divisione delle linee di unione delle due sezioni di estremità. Partendo da ciò, è stato possibile definire delle correlazioni tra le misure delle due sezioni alle estremità, denominate sezione “1” e “7”, e le cinque sezioni intermedie, rispettivamente sezione “2”, “3”, “4”, “5” e “6”, che sono state adottate nella definizione dei parametri dimensionali di ogni sezione, in modo tale da modificarsi in automatico nel caso si volessero variare le dimensioni delle sezioni “1” e “7”.

Definiti i parametri dimensionali di ogni sezione, è bastato modellare ogni singolo settore con l'utilizzo del comando “Unione” presente nella palette di comandi “Crea” di Revit per la gestione delle famiglie, che consente di generare dei solidi “la cui forma, modificata nella sua lunghezza, risulta dall'unione tra una forma iniziale e una forma finale”.²⁶ Utilizzando come “forma iniziale” e “forma finale” le sezioni nella giusta sequenza il risultato che si ottiene è un pilastro con le stesse caratteristiche geometriche dell'originale.

26 (Autodesk, 2019)



Vista frontale pilastro con indicazione piani di sezione. Fonte: Archivio edilizio.



Vista 3D modello del pilastro principale (a destra) con sezioni rappresentanti le fasi di getto (a sinistra)

Tipi di famiglia

Nome del tipo:

Parametri di ricerca

Parametro	Valore	Formula	Blocca
h Sez.2	20.83	= I Sez.2 * sin(Alfa)	<input checked="" type="checkbox"/>
h Sez.3	41.67	= I Sez.3 * sin(Alfa)	<input checked="" type="checkbox"/>
h Sez.4	62.50	= I Sez.4 * sin(Alfa)	<input checked="" type="checkbox"/>
h Sez.5	83.33	= I Sez.5 * sin(Alfa)	<input checked="" type="checkbox"/>
h Sez.6	104.17	= I Sez.6 * sin(Alfa)	<input checked="" type="checkbox"/>
h Sez.7	125.00	= Profondità Sez.7 / 2 - Raggio Sez	<input checked="" type="checkbox"/>
I Sez.2	22.44	= I Sez.7 / 6	<input checked="" type="checkbox"/>
I Sez.3	44.88	= I Sez.2 * 2	<input checked="" type="checkbox"/>
I Sez.4	67.31	= I Sez.2 * 3	<input checked="" type="checkbox"/>
I Sez.5	89.75	= I Sez.2 * 4	<input checked="" type="checkbox"/>
I Sez.6	112.19	= I Sez.2 * 5	<input checked="" type="checkbox"/>
I Sez.7	134.63	= h Sez.7 / sin(Alfa)	<input checked="" type="checkbox"/>
Larghezza Sez.2	16.67	= 2 * I Sez.2 * cos(Alfa)	<input checked="" type="checkbox"/>
Larghezza Sez.3	33.33	= 2 * I Sez.3 * cos(Alfa)	<input checked="" type="checkbox"/>
Larghezza Sez.4	50.00	= 2 * I Sez.4 * cos(Alfa)	<input checked="" type="checkbox"/>
Larghezza Sez.5	66.67	= 2 * I Sez.5 * cos(Alfa)	<input checked="" type="checkbox"/>
Larghezza Sez.6	83.33	= 2 * I Sez.6 * cos(Alfa)	<input checked="" type="checkbox"/>
Larghezza Sez.7	100.00	=	<input checked="" type="checkbox"/>
Larghezza/2 Sez.2	8.33	= Larghezza Sez.2 / 2	<input checked="" type="checkbox"/>
Lunghezza Sez.7	200.00	= (Profondità Sez.7 - Larghezza Sez	<input checked="" type="checkbox"/>
Profondità Sez.2	291.67	= Diametro Sez.1 + 2 * h Sez.2	<input checked="" type="checkbox"/>
Profondità Sez.3	333.33	= Diametro Sez.1 + 2 * h Sez.3	<input checked="" type="checkbox"/>
Profondità Sez.4	375.00	= Diametro Sez.1 + 2 * h Sez.4	<input checked="" type="checkbox"/>
Profondità Sez.5	416.67	= Diametro Sez.1 + 2 * h Sez.5	<input checked="" type="checkbox"/>
Profondità Sez.6	458.33	= Diametro Sez.1 + 2 * h Sez.6	<input checked="" type="checkbox"/>
Profondità Sez.7	500.00	=	<input checked="" type="checkbox"/>
Profondità/2 Sez.2	145.83	= Profondità Sez.2 / 2	<input checked="" type="checkbox"/>
Raggio Sez.1	125.00	=	<input checked="" type="checkbox"/>
Raggio Sez.2	115.95	= Diametro Sez.2 / 2	<input checked="" type="checkbox"/>
Raggio Sez.7	70.71	= (Larghezza Sez.7 * sqrt(2)) / 2	<input checked="" type="checkbox"/>

Gestisci tabelle di ricerca

OK Annulla Applica

[Come gestire i tipi di famiglia](#)

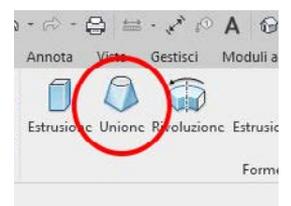
Parametri utilizzati per la realizzazione della famiglia del pilastro principale.

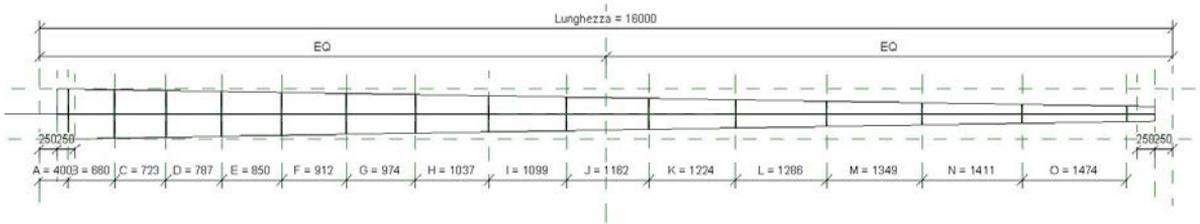
Modellazione "Trave in Acciaio Principale"

Come per la "famiglia" del pilastro strutturale, è stato necessario partire da uno specifico modello di famiglia avente delle caratteristiche specifiche per l'elemento che si andrà a realizzare. In questo caso, si tratta della tipologia "Telaio strutturale metrico - Travi e rinforzi" che, come dice il nome stesso, permette la realizzazione di travi che compongono il telaio strutturale dell'edificio. Anche in questo caso, è stato deciso di parametrizzarne le dimensioni di sezione e di lunghezza complessiva in modo da poter riutilizzare la famiglia successivamente, sfruttando in maggior modo le potenzialità del software sul quale si sta operando.

Come già detto precedentemente, le travi che reggono la copertura metallica del Palazzo del Lavoro sono di sezione ad "I" con dimensione variabile, quindi anche in questo caso la

Comando Unione nella modellazione delle famiglie.

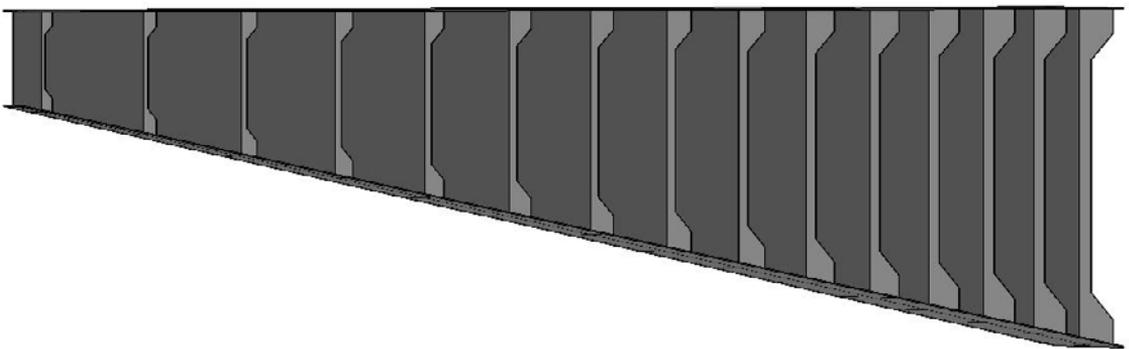
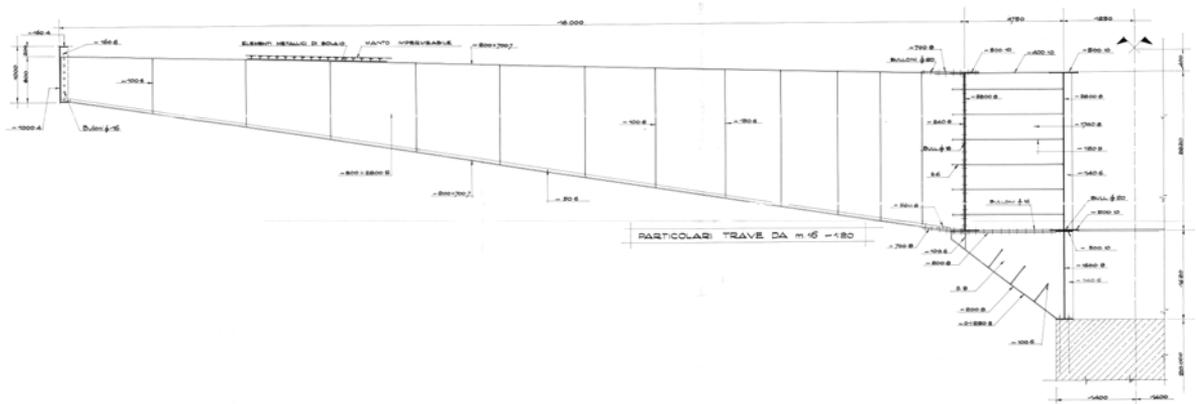




Vista dall'alto trave principale con definizione dei parametri dimensionali.

strada più consona da seguire è quella dell'utilizzo del comando "Unione", utilizzato già in precedenza per la realizzazione del pilastro strutturale. Per l'inserimento delle nervature di irrigidimento è stato necessario, basandosi sui disegni di progetto, posizionare dei piani di riferimento a distanze specifiche uno dall'altro, in modo da essere il più fedele possibile all'elemento esistente. Una volta fatto ciò, è bastato eseguire una seconda "unione" per definire la forma delle piastre di irrigidimento e successivamente eseguire una sottrazione di solidi nei punti nei quali le piastre non sono presenti. Successivamente è stato necessario attivare dei vincoli per poter fare in modo che tutti gli elementi si modifichino uniformemente cambiando i vari parametri dimensionali, mantenendo intatta la proporzionalità dell'elemento.

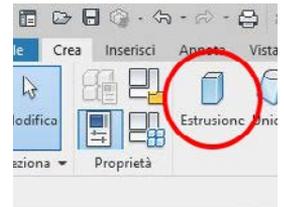
Particolare esecutivo trave principale con indicazione degli spessori.
Fonte: Archivio edilizio (in alto), Vista 3D della trave principale della copertura in acciaio (in basso)



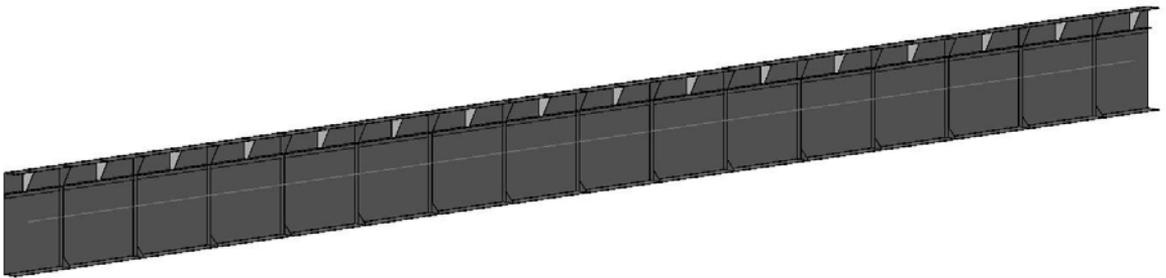
Modellazione “Trave di Bordo”

Per la realizzazione della “famiglia” delle travi perimetrali presenti in ogni “fungo” che compongono la copertura dell’edificio è stato utilizzato un procedimento analogo a quello adoperato per la modellazione delle travi in acciaio principali e anche in questo caso è stato necessario partire dalla tipologia di modello di telaio strutturale.

In questo caso, a differenza della trave principale, il comando utilizzato per la modellazione è il comando “Estrusione”, dato che l’elemento che si vuole realizzare è realizzato con un profilato metallico a “C” uniforme per tutta la sua lunghezza. Sono stati quindi necessari da parametrizzare le dimensioni di una sola sezione e la lunghezza totale dell’elemento.



Comando Estrusione nella modellazione delle famiglie.

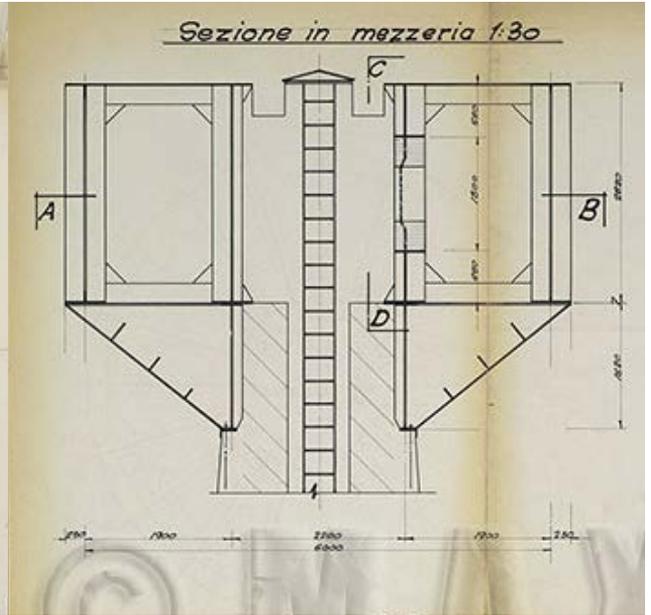
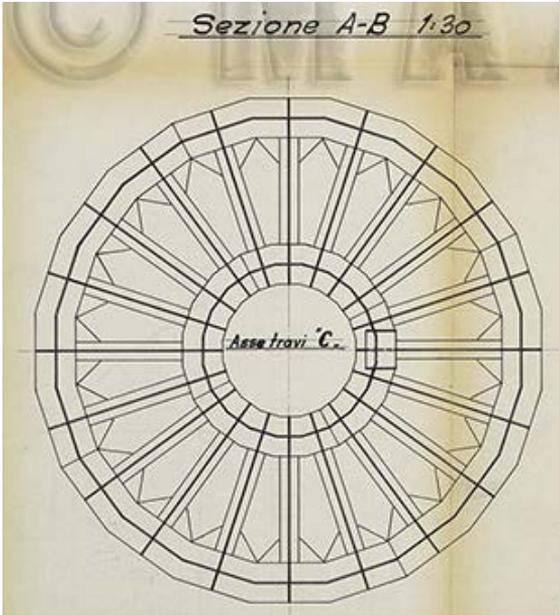


Vista 3D modello della trave di bordo della copertura in acciaio.

Questa trave, però, presenta dei rinforzi saldati all’anima che servono ad aumentare la resistenza della sezione ed a reggere il profilato che vincola alla trave i pannelli metallici che compongono la testa del fungo. Essi, nel modello, sono stati realizzati singolarmente in una famiglia a parte come “modello generico” e successivamente inseriti all’interno della famiglia principale attraverso la realizzazione di una “famiglia nidificata”. Tale tipologia di famiglia, è molto utile nei casi come questo perché permette non solo di inserire dei modelli già realizzati all’interno di altre famiglie, ma ne permette la modifica attraverso la condivisione dei parametri e la copia in serie degli elementi con la possibilità di parametrizzarne l’interasse. È stata proprio quest’ultima funzione quella necessaria al caso specifico, in quanto tali elementi sono posti ad un interasse costante per tutta la sua lunghezza.

Modellazione “Tamburo di ancoraggio”

Per la realizzazione del tamburo di ancoraggio tra le travi principali della copertura e il pilastro la scelta del modello di famiglia non è stata immediata come per le travi o il pilastro, dato che questo elemento non rientra in nessuna categoria di modello che Revit ci fornisce. Perciò è stato scelto la tipologia di “modello generico”, con la quale è possibile modellare l’oggetto e successivamente assegnargli una categoria da “Parametri e categorie di famiglie”, presente nella scheda delle proprietà. Essendo un elemento di ancoraggio, è stato assegnato nella categoria “connessioni strutturali”.



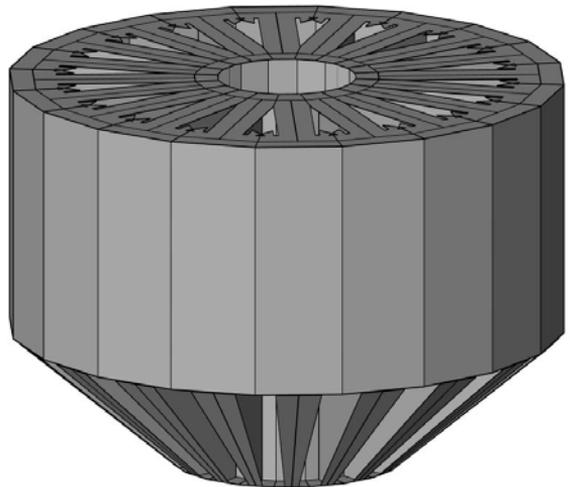
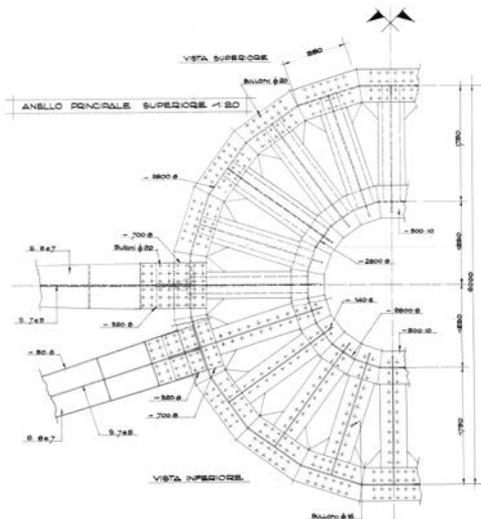
Vista in pianta e in sezione del tamburo di ancoraggio.

Fonte: Archivio Maxxi

Per la modellazione dell'elemento vero e proprio, sono stati analizzati i disegni di progetto, dove si poteva vedere, come già detto in precedenza, come l'elemento fosse composto da 20 profilati metallici saldati insieme per formare una corona alla quale si va ad ancorare ogni trave ed altrettante piastre che dovrebbero scaricare il peso sul pilastro.

Per questo motivo, si è ritenuto più opportuno modellare singolarmente questi elementi e successivamente inserirli nella posizione corretta, collegandone i parametri attraverso la nidificazione della famiglia. Per ogni elemento sono stati parametrizzati gli spessori e le lunghezze dei profilati speciali basandosi unicamente sui progetti originali, non essendo stato possibile alcun tipo di rilievo diretto.

Dettaglio costruzione anello principale superiore. Fonte: Archivio edilizio (a sinistra), Vista 3D del tamburo di ancoraggio (a destra)



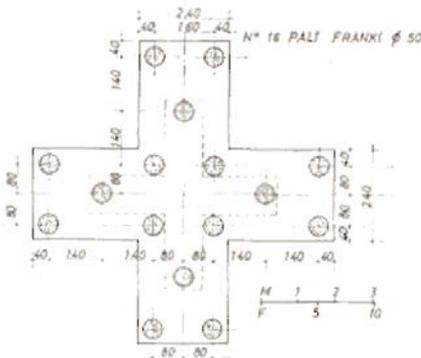
Modellazione “Fondazione Strutturale”

Per la realizzazione della fondazione dei pilastri “a fungo”, è stato necessario basarsi unicamente sui disegni originali di progetto non potendo avere un riscontro visivo. Anche in questo caso, come per gli altri elementi, si è partiti dal modello di famiglia più consono alla tipologia di elemento, nel caso specifico quella relativa alle fondazioni strutturali.

La particolarità di questa fondazione, è che essa è formata da un plinto cruciforme sorretto da una palificazione. Per realizzare il plinto cruciforme è stato necessario utilizzare sia la funzione “Estrusione” per la base sia la funzione “Unione” per la parte superiore. Come nei casi precedenti, le dimensioni sono state parametrizzate nel caso si volessero modificare successivamente.

Per la creazione dei pali, non avendo alcuna informazione su tipologia e profondità che i pali possano raggiungere, si è optato per l'utilizzo di una famiglia di sistema, cioè una famiglia di elementi già precaricati all'interno di Revit, inserita come famiglia nidificata. Non essendo a conoscenza della loro lunghezza e non essendo rilevante ai fini del calcolo che si andrà ad eseguire, date le poche informazioni sulle fondazioni, si è deciso di assegnare una lunghezza simbolica di 1,5m non parametrizzata.

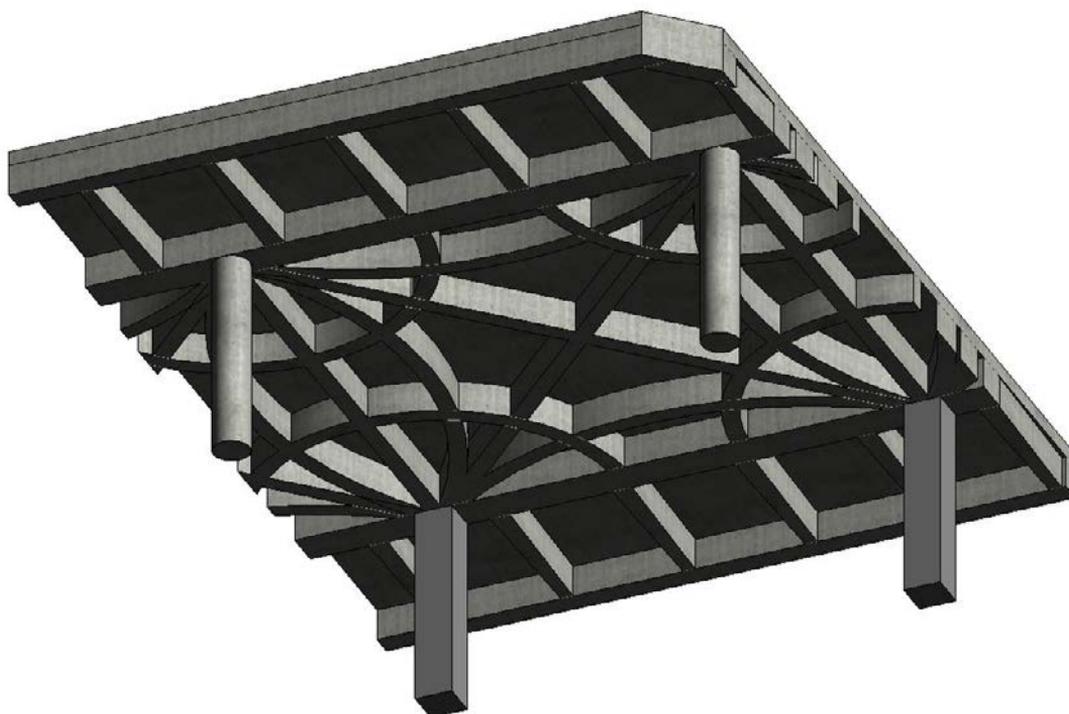
Disegno esecutivo fondazioni cruciformi. Fonte: Archivio edilizio (a destra), Vista 3D modello fondazioni (a sinistra).



Modellazione “Nervature Solaio”

Il solaio della balconata perimetrale, è un altro elemento particolare del Palazzo del Lavoro, perciò inizialmente si era optato per riprodurre fedelmente le sue nervature aventi la sezione variabile. Pensando però al trasferimento del modello da Revit a Robot Structural Analysis si è optato per l'utilizzo delle famiglie delle travi di sistema in modo da semplificare le nervature centrali e di realizzare una famiglia per le nervature laterali del solaio, che presentano una riduzione di sezione più lineare rispetto alle altre.

Anche per la realizzazione delle nervature, il procedimento è analogo a quello utilizzato per le altre tipologie di travi. Partendo sempre dal modello di famiglia per il telaio strutturale, si è utilizzato nuovamente il comando “Unione” per poter parametrizzare entrambe le sezioni sia in altezza che in larghezza, oltre che la lunghezza totale della trave.

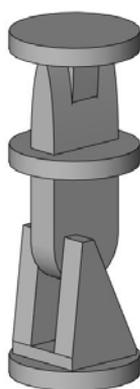


Vista 3D modello di una porzione del solaio nervato.

Modellazione “Ritto Perimetrale”

Il ritto perimetrale è l'elemento che si fa carico di tutte le azioni agenti sulle facciate, scaricandone poi il peso sul solaio della balconata perimetrale presente al Primo Piano attraverso un giunto cardanico; per questo motivo, è stato necessario modellare separatamente il giunto dal ritto stesso.

Vista di dettaglio rappresentante il giunto cardanico alla base dei ritti perimetrali.

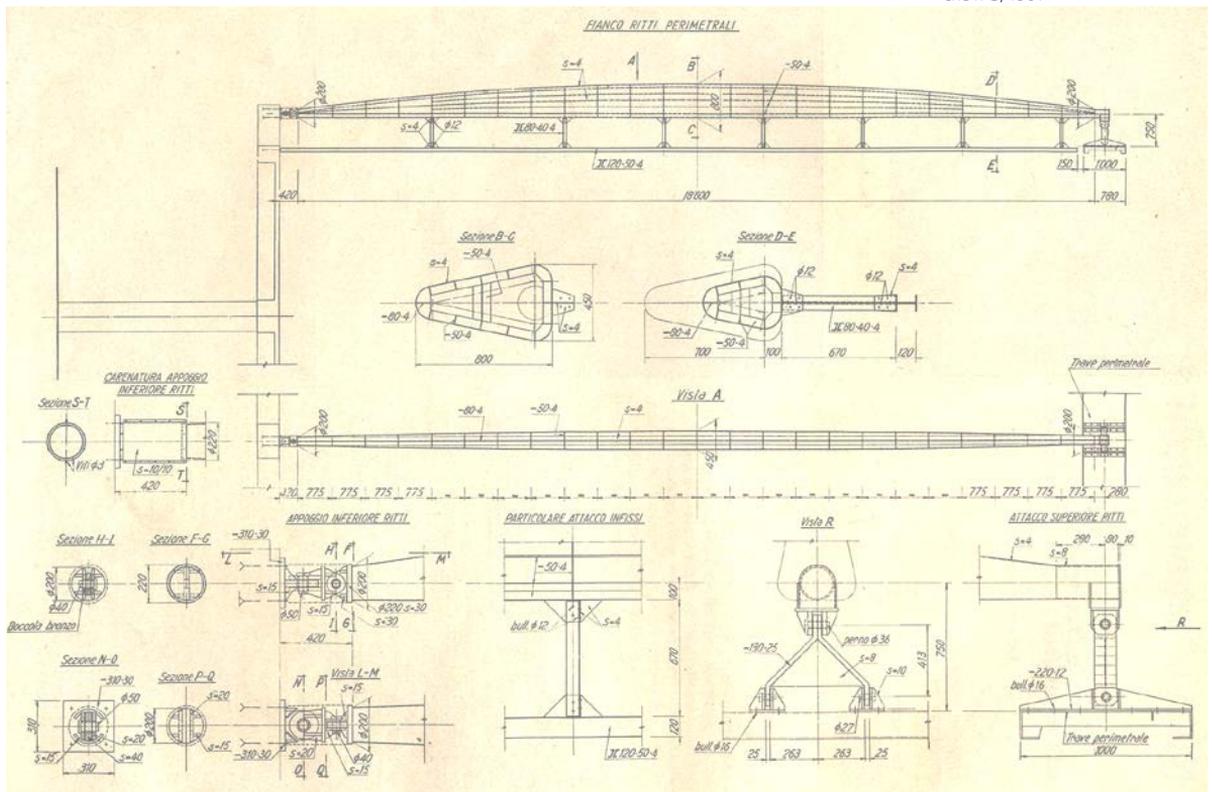


Come per il tamburo di ancoraggio, la scelta del modello di famiglia da cui partire per questi due elementi non è stata molto semplice. Infatti, essi non rientrano perfettamente in nessuna delle macro-categorie che Revit considera nella creazione degli elementi costruttivi. Perciò per il giunto si è optato lo stesso metodo utilizzato per il tamburo di ancoraggio, ovvero partire da un modello generico ed andare successivamente a modificare la categoria della famiglia in “connessione strutturale”. Per quanto riguarda il ritto stesso, si è deciso di utilizzare il modello di famiglia “pilastro strutturale”, nonostante esso non sia un pilastro vero e proprio.

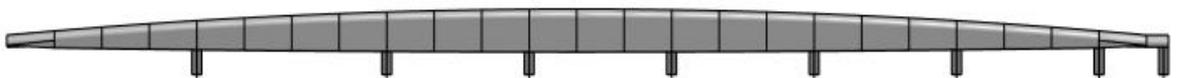
Per la modellazione del giunto cardanico, si è deciso di semplificarne la geometria, in quanto essa non sarà presa in considerazione nello specifico durante l'analisi strutturale ma sarà solamente preso in considerazione la tipologia di vincolo che esso effettuerà sul ritto, impostando dei parametri dimensionali per vincolarne le proporzioni.

Per la modellazione del ritto è stato necessario, come per il pilastro, dividere l'intero elemento in un numero definito di settori, in modo da realizzare una geometria più verosimile possibile all'esistente utilizzando il comando di "Unione" e basandosi sui disegni originali per la definizione delle sezioni. In questo caso, data l'unicità dell'elemento e il gran numero di settori necessari a rappresentare il ritto si è deciso di non parametrizzare le dimensioni delle sezioni ma solamente l'altezza totale dell'elemento e la distanza tra gli elementi di ancoraggio al curtain wall e quella della biella di connessione alla copertura, anch'essa semplificata nella geometria come il giunto cardanico.

Elaborato esecutivo ritto perimetrale. Fonte: Rivista costruzioni metalliche n°3, 1961



Vista 3D modello ritto perimetrale.



Realizzazione del modello completo

Una volta che tutti gli elementi sono stati modellati in ogni singola famiglia, è stato possibile ricostruire l'intero edificio basandosi sui progetti originali e sulle planimetrie fornite dalla Fondazione Nervi. Dopo aver caricato nel progetto le famiglie create appositamente per il modello come descritto nei paragrafi precedenti attraverso il comando "carica famiglia", per le parti mancanti sono state utilizzate le famiglie di sistema per realizzare i pilastri più semplici che sorreggono le balconate, i solai strutturali, utilizzati non solo per le balconate perimetrali ma anche per le coperture stesse, il curtain wall, le scale e le scale mobili.

Durante la realizzazione dei solai delle balconate, è stato necessario suddividere l'intero solaio in diverse piastre, in modo tale che una volta trasferito il modello su Robot Structural Analysis per il calcolo ogni solaio venga rilevato nella maniera corretta.

Per la realizzazione dei lucernari che uniscono i "funghi", è stato utilizzato il comando "tetto" e selezionata la tipologia vetrata inclinata, anche per le parti opache, alle quali sono stati sostituiti i pannelli trasparenti con quelli metallici.

Vista fotorealistica del modello BIM completo del Palazzo del Lavoro.



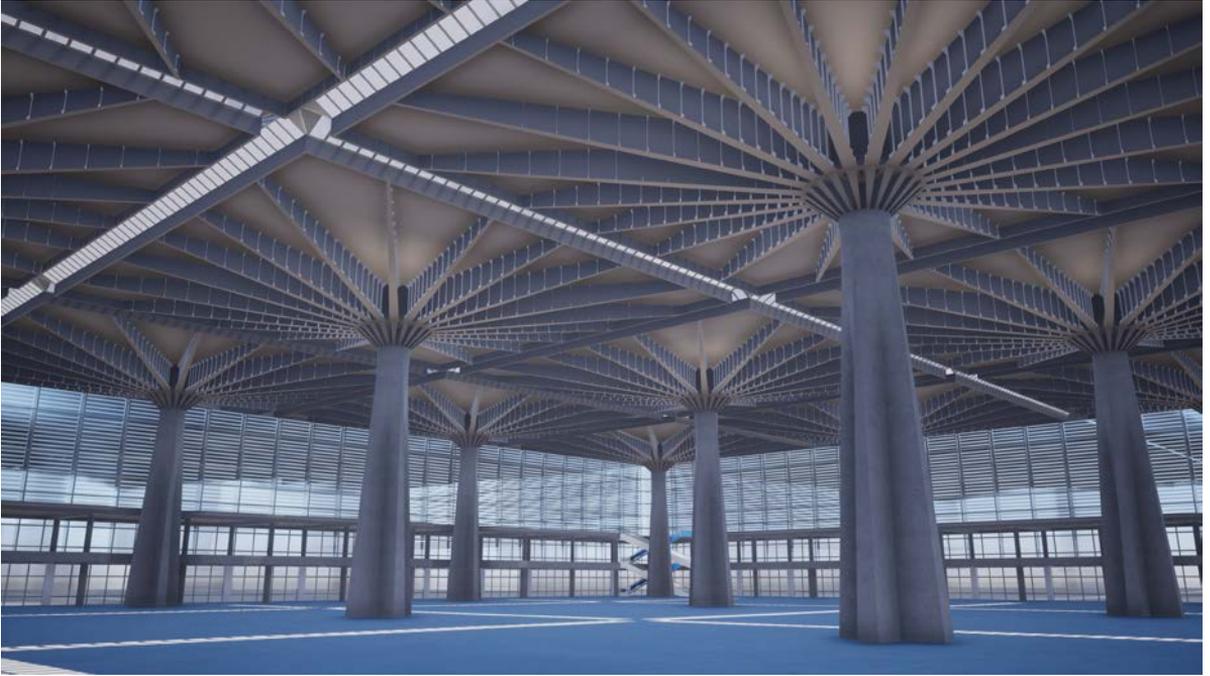


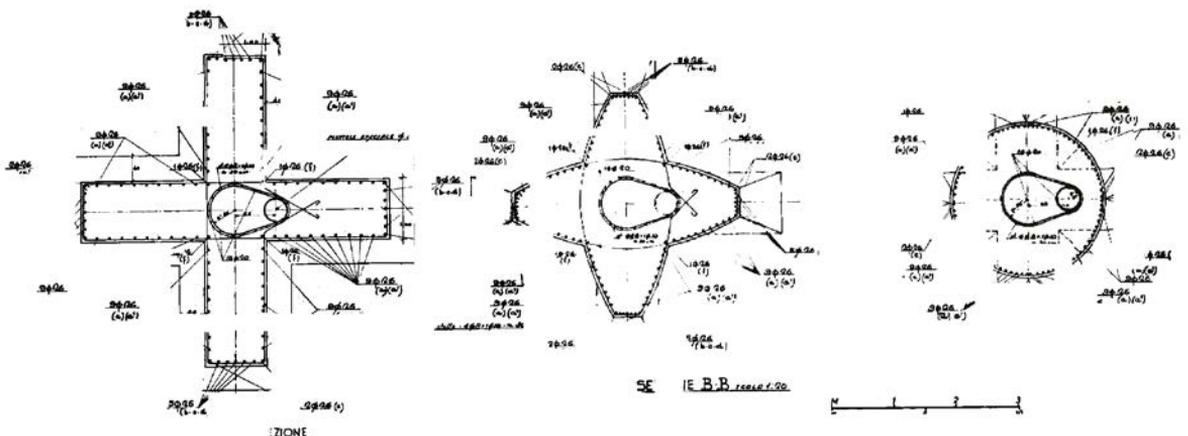
Immagine fotorealistica interno del Palazzo del Lavoro

Inserimento delle armature

Funzionalmente allo scopo di questa tesi di verificare la qualità d'interoperabilità tra i due software, si è deciso di inserire le armature negli elementi in calcestruzzo per verificare come il dato viene trasferito. Per una più corretta rappresentazione dell'esistente, sono state rappresentate solamente le armature relative ai pilastri cruciformi che sorreggono la copertura, di cui si conosce la posizione e dimensione dei ferri grazie ai progetti originali.

Basandosi quindi sui disegni dei ferri, è stato possibile ricreare fedelmente l'armatura utilizzando il comando "Armatura strutturale", presente nella palette di comandi "Rinforzo" della

Dettaglio esecutivo armature del pilastro principale con indicazione dei diametri dei ferri utilizzati. Fonte: Archivio edilizio



scheda "Struttura". Una volta avviata la modalità di creazione dell'armatura, è possibile scegliere se disegnare manualmente la geometria dell'armatura oppure se generarla automaticamente, impostandone la tipologia di distribuzione, scegliendo se disporre i ferri parallelamente ad una superficie di riferimento o se disporli lungo un percorso specifico, e i suoi parametri di posizionamento, come la quantità di armatura, l'interasse di posizionamento e la tipologia di layout secondo la quale definire i precedenti parametri. È poi possibile, come per ogni elemento, scegliere la famiglia di ferri da utilizzare tra quelli già in elenco oppure scegliere di creare una nuova famiglia di armature da inserire successivamente.

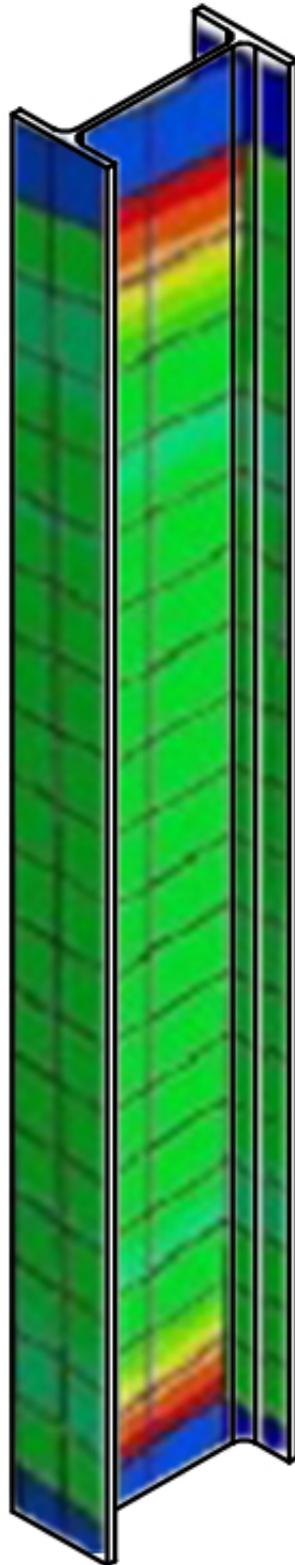
Nel caso preso in analisi, per le barre longitudinali è stata scelta la metodologia di disposizione automatica dei ferri parallelamente alle superfici perimetrali del pilastro, impostando come parametro fisso il numero di barre per ogni superficie, dato ricavato dai disegni di progetto di Nervi. Per la modellazione delle staffe orizzontali, il percorso scelto è stato quello più lungo ma sicuramente il più corretto: essendo la sezione del pilastro variabile per tutta la sua altezza, è stato necessario disegnare manualmente ogni staffa partendo dai disegni originali. Per poter fare ciò, è stato necessario creare dei piani orizzontali di riferimento, sui quali poter collocare ogni singola staffa.

Vista di dettaglio del modello 3D rappresentante le armature del pilastro principale.





Modellazione 3D armature del pilastro principale.



Analisi agli elementi finiti deforma-
zione trave in acciaio

MODELLAZIONE IN AMBIENTE FEM

Strumenti

Robot Structural Analysis: Robot Structural Analysis è un software di analisi ad elementi finiti sviluppato da Autodesk che permette di realizzare analisi statiche, sia lineari che non lineari, e dinamiche di modelli edifici, ponti ed altre tipologie di strutture complesse. Una delle potenzialità di questo software è la possibilità di interagire in modo bidirezionale con Revit. È infatti possibile sia trasferire un modello da Revit verso Robot Structural Analysis per effettuarne l'analisi strutturale, sia trasferire un modello già analizzato e modificato su Robot Structural Analysis verso Revit.

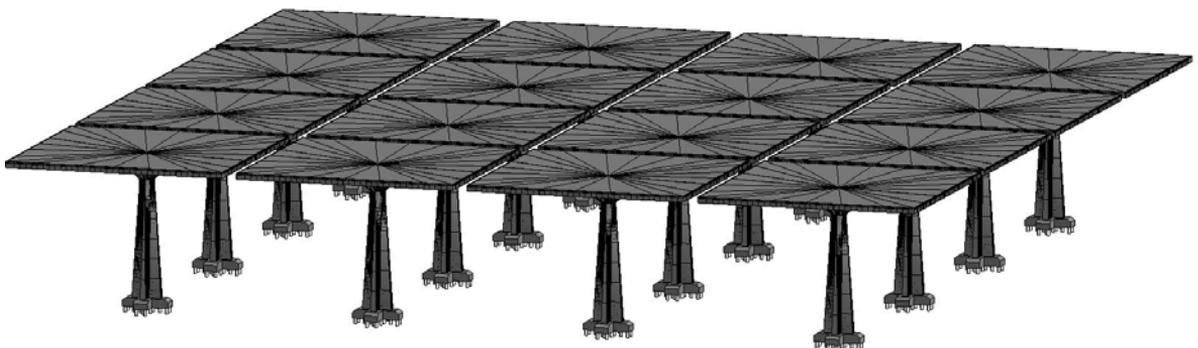
Preparazione del modello BIM in funzione del software di analisi strutturale

Successivamente alla composizione dell'intero edificio su Revit, sono necessari alcuni accorgimenti affinché durante il passaggio del modello verso Robot Structural Analysis vengano trasferiti correttamente tutti i dati necessari al calcolo strutturale.

In ambiente BIM, un edificio è rappresentato da tipologie diverse di modello a seconda della necessità di utilizzo dello stesso. Nel caso in questione, le tipologie prese in causa sono due:

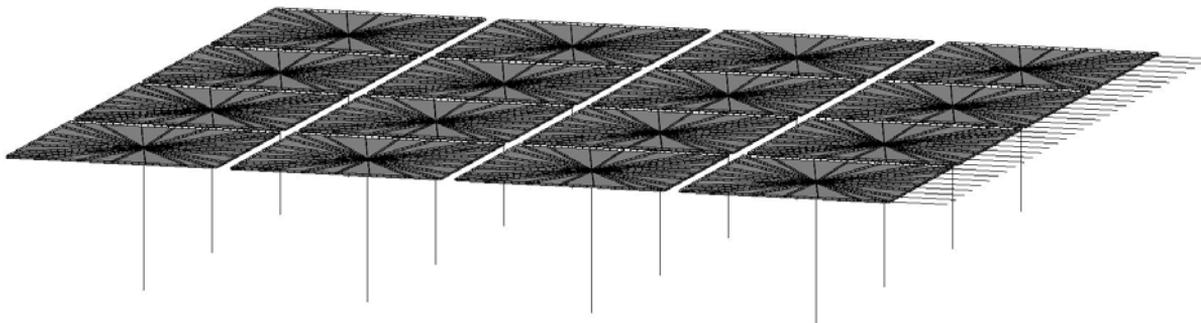
- Modello Fisico, che rappresenta la geometria delle parti che compongono l'edificio ed è quello che è più utilizzato e diffuso in ambito architettonico;

Modello fisico in ambiente BIM rappresentante la struttura della copertura.



- Modello Analitico, che rappresenta la disposizione e i collegamenti degli elementi strutturali che compongono l'edificio.

In Revit le due tipologie di modello vengono create simultaneamente, infatti durante la realizzazione del modello fisico, per ogni elemento di tipo strutturale viene creata una controparte analitica, che è possibile ottimizzare andando ad operare sulla posizione dei "nodi



Modello analitico in ambiente BIM rappresentante la struttura della copertura.

analitici” e sui loro collegamenti reciproci. Tale regolazione del modello può avvenire sia automaticamente sia manualmente.

Affinamento del modello analitico

Come già anticipato, durante la costruzione del Modello Fisico viene in automatico creato un Modello Analitico, necessario per l’esportazione dei dati verso un software di calcolo strutturale.

Molto spesso, il Modello Analitico necessita di una successiva regolazione per oviare alcuni difetti che potrebbero causare successivi problemi durante il successivo trasferimento verso l’ambiente di calcolo. Ciò che può dare maggiori problemi, è la mancanza di un corretto collegamento tra i nodi degli elementi strutturali, cosa che può essere corretta con una corretta e più attenta modellazione degli elementi in questione.

Non sempre però questo basterà a correggere tali imperfezioni che si vengono a creare nel modello e sarà quindi necessario andare ad operare sulla posizione reciproca del Modello Fisico e del Modello Analitico per ogni elemento strutturale, modificando ogni singola istanza.

Tale operazione può essere eseguita in modo automatico modificando le impostazioni nelle proprietà dell’oggetto preso in analisi, ciò permette la scelta del metodo secondo il quale il software andrà ad allineare l’elemento analitico rispetto all’asse dell’elemento fisico nei due estremi dell’oggetto stesso. Tra i metodi di allineamento sono presenti la funzione di “Rilevamento automatico” che permette di collegare in modo automatico gli assi analitici in base alla loro posizione reciproca, sottostando delle tolleranze definite precedentemente nelle “Impostazioni strutturali”, e la funzione “Proiezione” che consente di proiettare l’asse analitico sul sistema di coordinate dell’elemento sia in direzione orizzontale (direzione Y), che consente di scegliere tra i livelli, i lati o il centro dell’oggetto, sia in quella verticale (direzione Z), che fa riferimento ai livelli, la parte superiore, centrale o inferiore dell’oggetto.

È possibile eseguire queste operazioni anche manualmente attivando la modalità “Regolazione analitica”, che permette di modificare la posizione reciproca tra il Modello Fisico e la

Proprietà

R

Pilastri analitici (1) Modifica tipo

Modello analitico

Analizza come	Portante
Collegamenti analitici	<input checked="" type="checkbox"/>

Proprietà analitiche

Tipo di famiglia	Pilastrone strutturale Parametrico
Materiale fisico	C25/30
Lunghezza	24.4300
Rotazione trasversale	0.00°

Allineamento analitico

Metodo di allineamento - In alto	<Regolato manualmente>
Proiezione Y - Superiore	Linea di ubicazione
Proiezione Z - Superiore	Linea di ubicazione
Metodo di estensione - In alto	<Regolato manualmente>
Proiezione X - Parte superiore	Riferimento livello superiore
Metodo di allineamento - Base	Proiezione
Proiezione Y - Base	Linea di ubicazione
Proiezione Z - Base	Linea di ubicazione
Metodo di estensione - Base	<Regolato manualmente>
Proiezione X - Base	Riferimento livello di base

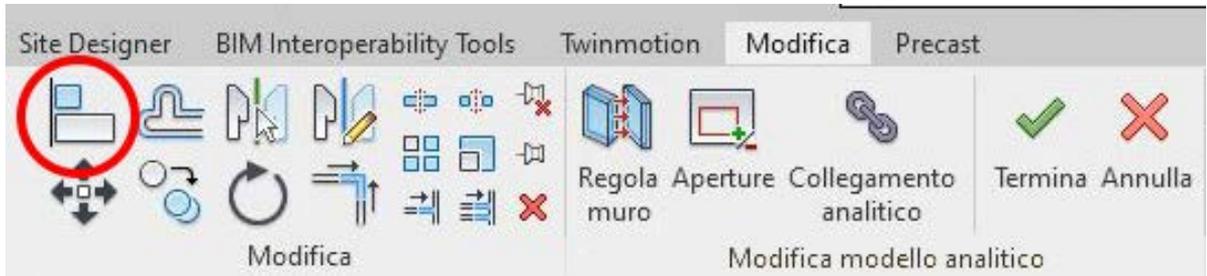
Rilasci/forze dell'elemento

[Guida alle proprietà](#) Applica

Finestra delle proprietà di un pilastro analitico con allineamento del modello analitico rispetto al modello fisico regolato manualmente.

sua controparte analitica in maniera più flessibile che permette di rispondere meglio alle esigenze del progettista. Una volta che viene attivata, questa modalità permette di visualizzare con più chiarezza il modello analitico mettendolo in risalto rispetto a quello fisico, se quest'ultimo risulta attivo nelle impostazioni di visibilità della vista corrente. Ogni tipologia di elemento ha una sua modalità di regolazione specifica: per oggetti lineari come travi e pilastri è possibile agire direttamente sui nodi analitici presenti agli estremi della barra, mentre per le superfici analitiche è possibile andare ad agire sui singoli nodi oppure direttamente sul perimetro dell'elemento.

Per il caso studio preso in considerazione, è stato necessario utilizzare entrambe le metodologie di affinamento del Modello Analitico. Per la parte riguardante la balconata perimetrale, essendo la struttura più lineare e semplice, è bastato regolare automaticamente la



Comando "Allinea" presente nella scheda "Modifica" durante la regolazione manuale del modello analitico

posizione delle travi utilizzate per riprodurre le nervature della balconata in modo da allineare gli assi analitici di queste sul piano ospitante la superficie analitica del solaio. Per quanto riguarda l'affinamento del Modello Analitico della copertura, l'allineamento automatico non è stato sufficiente ad affinare completamente la struttura, in quanto gli assi delle travi principali in acciaio che reggono la copertura non convergevano sul pilastro analitico. È stato quindi necessario, una volta impostati i criteri di proiezione delle barre analitiche più consoni, allineare i nodi analitici delle travi con quello dei pilastri utilizzando il comando "Allinea" nella scheda "modifica", in modo da fare convergere correttamente le aste analitiche.

Un altro problema che è stato riscontrato nella creazione del modello analitico, riguarda la corretta creazione del Modello Analitico del solaio di copertura. Nonostante durante la creazione del Modello Fisico a tale elemento sia stata attribuita un'inclinazione pari a quella delle travi, essa non viene riportata nel modello analitico, che si presenta perfettamente orizzontale. È stato quindi necessario dover suddividere, per ogni "fungo", il solaio in porzioni più piccole aventi i bordi in corrispondenza non solo delle travi di bordo ma anche delle travi principali, in modo da poter attribuire correttamente l'inclinazione necessaria sia al Modello Fisico che alla sua controparte analitica.

Analisi dei carichi

Successivamente al controllo ed all'affinamento del Modello Analitico, è stato necessario decidere se inserire già in ambiente BIM i carichi che agiscono sulla struttura oppure se trasferire il modello così come si presenta. Dato che lo scopo di questa tesi è quello di valutare come i due software collaborino tra loro, è stato deciso di inserire i carichi su Revit.

Per prima cosa, è stato necessario analizzare per le tipologie di carico che incidono sulla struttura quali valori la normativa²⁷ permette di assumere.

I carichi che incidono sulla struttura sono:

- Peso Proprio;
- Carichi di Esercizio;
- Vento;
- Neve;
- Azioni Sismiche.

Il Peso Proprio della struttura è stato calcolato in automatico da Revit dopo aver assegnato correttamente il materiale ad ogni elemento.

Per poter capire quali Carichi di Esercizio la norma permette di assegnare alla struttura, è stato necessario stabilire una categoria di appartenenza dell'edificio. Essendo stato presentato recentemente un progetto di riqualificazione dell'edificio con lo scopo di convertire la struttura in un centro commerciale ed essendo stato approvato, si è deciso di assegnare alla struttura la Categoria D2 Ambienti ad uso commerciale e di applicare quindi un carico distribuito sui solai pari a 5,00 kN/m².

Cat.	Ambienti	q _k [kN/m ²]	Q _k [kN]	H _k [kN/m]
A	Ambienti ad uso residenziale. Sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi. (ad esclusione delle aree suscettibili di affollamento)	2,00	2,00	1,00
B	Uffici. Cat. B1 Uffici non aperti al pubblico Cat. B2 Uffici aperti al pubblico	2,00 3,00	2,00 2,00	1,00 1,00
C	Ambienti suscettibili di affollamento Cat. C1 Ospedali, ristoranti, caffè, banche, scuole Cat. C2 Balconi, ballatoi e scale comuni, sale convegni, cinema, teatri, chiese, tribune con posti fissi Cat. C3 Ambienti privi di ostacoli per il libero movimento delle persone, quali musei, sale per esposizioni, stazioni ferroviarie, sale da ballo, palestre, tribune libere, edifici per eventi pubblici, sale da concerto, palazzetti per lo sport e relative tribune	3,00 4,00 5,00	2,00 4,00 5,00	1,00 2,00 3,00
D	Ambienti ad uso commerciale. Cat. D1 Negozi Cat. D2 Centri commerciali, mercati, grandi magazzini, librerie...	4,00 5,00	4,00 5,00	2,00 2,00
E	Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale. Cat. E1 Biblioteche, archivi, magazzini, depositi, laboratori manifatturieri Cat. E2 Ambienti ad uso industriale, da valutarsi caso per caso	≥ 6,00 —	6,00 —	1,00* —
F-G	Rimesse e parcheggi. Cat. F Rimesse e parcheggi per il transito di automezzi di peso a pieno carico fino a 30 kN Cat. G Rimesse e parcheggi per transito di automezzi di peso a pieno carico superiore a 30 kN: da valutarsi caso per caso	2,50 —	2 x 10,00 —	1,00** —
H	Coperture e sottotetti Cat. H1 Coperture e sottotetti accessibili per sola manutenzione Cat. H2 Coperture praticabili Cat. H3 Coperture speciali (impianti, eliporti, altri) da valutarsi caso per caso	0,50 — —	1,20 — —	1,00 secondo categoria di appartenenza —
* non comprende le azioni orizzontali eventualmente esercitate dai materiali immagazzinati				
** per i soli parapetti o partizioni nelle zone pedonali. Le azioni sulle barriere esercitate dagli automezzi dovranno essere valutate caso per caso				

Tabella valori dei carichi d'esercizio per le diverse categorie di edifici. Fonte: Tab 3.1.II in NTC 2008.

Per il carico del vento che incide sulla struttura, è stato necessario consultare la normativa per verificare il metodo con la quale calcolare il carico da applicare.

28 (cap. 3.3, Azioni del vento, 2008)

La normativa²⁸ prevede il calcolo di una pressione esercitata dal vento calcolata con la seguente formula:

$$p = q_b c_e c_p c_d$$

Dove:

- q_b è la pressione cinetica di riferimento, pari alla metà della densità dell'aria ρ , assunta convenzionalmente pari a 1,25 kg/m³, moltiplicata alla velocità di riferimento del vento, ricavata in base all'altitudine sul livello del mare del sito preso in analisi;
- c_e è il coefficiente di esposizione, che dipende dall'altezza dell'edificio, dalla topografia del terreno e dalla categoria di esposizione del sito;
- c_p è il coefficiente di forma (o coefficiente aerodinamico), funzione della tipologia, della geometria della costruzione e dell'orientamento del vento rispetto ad essa;
- c_d è il coefficiente dinamico, con il quale si tiene conto degli effetti riduttivi associati alla non contemporaneità delle massime pressioni locali e degli effetti amplificativi dovuti alle vibrazioni strutturali.

Anche per calcolare il carico provocato dalla neve è stato necessario consultare la normativa²⁹, che prevede l'utilizzo della seguente espressione:

29 (cap. 3.4, Azioni della neve, 2008)

$$q_s = \mu_i \cdot q_{sk} \cdot C_E \cdot C_t$$

Dove:

- μ_i è il coefficiente di forma della copertura, che dipende dall'angolo d'inclinazione della falda a espresso in gradi sessagesimali;
- q_{sk} è il valore caratteristico di riferimento del carico neve al suolo [kN/m²], che dipende dalle condizioni locali di clima e di esposizione;
- C_E è il coefficiente di esposizione, che può essere utilizzato per modificare il valore del carico neve in copertura in funzione alle caratteristiche specifiche dell'area in oggetto;
- C_t è il coefficiente termico, che tiene conto delle proprietà di isolamento termico del materiale utilizzato in copertura e, in assenza di uno studio specifico, deve essere utilizzato pari a 1.

Calcolo azioni del vento

Per il calcolo della pressione causata dall'azione del vento sull'edificio preso in analisi, è stato necessario stabilire, come primo passo, la velocità di riferimento. Essendo il sito del caso studio in Zona 1 (Piemonte), si deve fare riferimento ai parametri necessari al calcolo della velocità di riferimento presenti nella Tabella 3.3.I delle NTC 2008, che assumono i seguenti valori:

$$v_{b,0} = 25 \text{ m/s}$$

$$a_0 = 1000 \text{ m}$$

$$k_a = 0,010 \text{ 1/s}$$

Essendo l'altitudine del sito pari a 239 m sopra il livello del mare, è possibile assumere la velocità di riferimento v_b pari al valore di $v_{b,0}$, con una conseguente pressione cinetica di riferimento pari a:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 25^2 = 390,63 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Per il calcolo del coefficiente di esposizione, è fondamentale capire a quale categoria di esposizione appartiene il sito di progetto. Per poter fare ciò, è necessario basarsi sulle tabelle e sui grafici forniti dalla normativa. Essendo il Palazzo del Lavoro in un'area urbana nella quale la superficie occupata da edifici di altezza superiore ai 15 m è inferiore al 15%, è possibile assegnare all'area presa in analisi una classe di rugosità B. Interpolando questa classe con l'altitudine del sito nella tabella relativa alla Zona 1, è possibile estrarre la categoria di esposizione del sito (Categoria IV) in modo da conoscere i parametri necessari al calcolo del coefficiente d'esposizione (k_r , z_0 e z_{\min}) attraverso l'espressione:

$$c_e(z) = k_r^2 \cdot c_t \cdot \ln(z/z_0) \cdot [7 + c_t \cdot \ln(z/z_0)] \quad \text{per } z \geq z_{\min}$$

Dove:

- Z è l'altezza dell'edificio, nel caso specifico pari a 25 m;
- C_t è il coefficiente di topografia, che assume generalmente il valore di 1.
- k_r , z_0 e z_{\min} , che per la Categoria IV valgono rispettivamente $k_r = 0,22$; $z_0 = 0,30$ m; $z_{\min} = 8$ m.

Si ha quindi un valore di coefficiente di esposizione pari a:

$$c_e(z) = 0,22^2 \cdot 1 \cdot \ln\left(\frac{25}{0,33}\right) \cdot \left[7 + 1 \cdot \ln\left(\frac{25}{0,33}\right)\right] = 2,45$$

Il coefficiente dinamico, come specificato da normativa, "può essere assunto cautelativamente pari ad 1 nelle costruzioni di tipologia ricorrente, quali gli edifici di forma regolare non eccedenti 80 m di altezza ed i capannoni industriali, oppure può essere determinato mediante analisi specifiche o facendo riferimento a dati di comprovata affidabilità⁹⁰.

30 (cap. 3.3.8 - Coefficiente dinamico, 2008)

Per ottenere il coefficiente di forma si è dovuto fare riferimento alla circolare 617/2009 delle NTC 2008, dove è specificato il valore da utilizzare in assenza di valutazioni più precise supportate da documentazioni o prove sperimentali in galleria del vento.

Nel caso specifico da analizzare, si prenderà come coefficiente di forma un valore pari a +0,8 per il curtainwall sopravvento e -0,4 per quella opposta sottovento.

Una volta ottenuti i valori di tutti i parametri necessari al calcolo della pressione dovuta al vento, è stato possibile ottenere i seguenti valori:

$$p_{w,sopravento} = 390,63 \cdot 2,45 \cdot 0,8 \cdot 1 = 765,63 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$p_{w,sottovento} = 390,63 \cdot 2,45 \cdot (-0,4) \cdot 1 = -382,82 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Non essendoci una direzione prevalente dei venti nell'area presa in analisi, è stato preso in considerazione il caso più sfavorevole, cioè la pressione sopravvento.

Per evitare di appesantire troppo il modello in fase di calcolo, è stato deciso di calcolare separatamente le azioni causate dal vento sul curtain wall e di applicarle successivamente come carico alla struttura della balconata perimetrale e ai "funghi" che compongono la copertura.

Per poter fare ciò, è stato necessario analizzare la struttura del curtain wall presente su ogni facciata. Ogni parete è composta da pannelli in vetro, di larghezza pari a 4,85 m, sorretti da un telaio che, a sua volta, scarica il peso sui 32 ritti verticali, che sono ancorati alla copertura da delle bielle e al solaio del primo piano da un giunto cardanico, attraverso 7 elementi di giunzione.

Si ha dunque una pressione uniforme sul pannello vetrato pari a:

$$q_w = 4,85 \cdot 765,63 = 3713 \frac{\text{N}}{\text{m}} = 3,713 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

La pressione di ogni pannello viene ripartita per metà sul telaio orizzontale superiore e metà su quello inferiore. Ne risulta quindi una reazione per ogni elemento di giunzione tra il telaio e il ritto rispettivamente pari a:

$$F_1 = 3,713 \cdot \left(\frac{0,725}{2} + \frac{2,175}{2} \right) = 5,38 \text{ kN}$$

$$F_2 = 3,713 \cdot \left(\frac{2,175}{2} + \frac{2,175}{2} \right) = 8,08 \text{ kN}$$

$$F_3 = 3,713 \cdot \left(\frac{2,175}{2} + \frac{2,175}{2} \right) = 8,08 \text{ kN}$$

$$F_4 = 3,713 \cdot \left(\frac{2,175}{2} + \frac{2,175}{2} \right) = 8,08 \text{ kN}$$

$$F_5 = 3,713 \cdot \left(\frac{2,175}{2} + \frac{2,175}{2} \right) = 8,08 \text{ kN}$$

$$F_6 = 3,713 \cdot \left(\frac{2,175}{2} + \frac{3,50}{2} \right) = 10,54 \text{ kN}$$

$$F_7 = 3,713 \cdot \left(\frac{3,50}{2} + \frac{3,50}{2} \right) = 13,00 \text{ kN}$$

Una volta calcolate le forze che agiscono su ogni ritto verticale, è possibile ricavare le azioni che essi scaricano in copertura attraverso le bielle e sulla balconata perimetrale grazie al giunto cardanico attraverso il seguente sistema a tre incognite:

$$\begin{cases} F_1 \cdot 0,725 + F_2 \cdot 2,90 + F_3 \cdot 5,075 + F_4 \cdot 7,25 + F_5 \cdot 9,425 + F_6 \cdot 11,60 + F_7 \cdot 15,10 - V_B \cdot 18,60 = 0 \\ V_A + V_B - F_1 - F_2 - F_3 - F_4 - F_5 - F_6 - F_7 = 0 \\ H_B = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_B = \frac{5,38 \cdot 0,725 + 8,08 \cdot 2,90 + 8,08 \cdot 5,075 + 8,08 \cdot 7,25 + 8,08 \cdot 9,425 + 10,54 \cdot 11,60 + 13,00 \cdot 15,10}{18,60} = 28,04 \text{ kN} \\ V_A = 5,38 + 8,08 + 8,08 + 8,08 + 8,08 + 10,54 + 13,00 - 28,04 = 33,20 \text{ kN} \\ H_B = 0 \end{cases}$$

Alle reazioni del curtain wall dei piani superiori è necessario aggiungere l'azione del vento gravante sul curtain wall arretrato presente al piano terra, che scarica in parte direttamente a terra ed in parte sul solaio della balconata al primo piano. Ne risultano le seguenti azioni:

$$F_{w,COPERTURA} = V_A = 33,20 \text{ kN}$$

$$F_{w,BALCONATA} = V_B + q_w \cdot \frac{5,25}{2} = 28,04 + 3,713 \cdot \frac{5,25}{2} = 37,79 \text{ kN}$$

Calcolo azioni della neve

Per calcolare l'azione della neve che grava sulla copertura, è stato innanzitutto necessario identificare, come per le azioni del vento, in quale zona climatica ricade l'area di progetto per poter ricavare il valore caratteristico del carico neve al suolo che, nel caso preso in analisi, risulta essere la Zona I - Alpina. Per tale zona climatica si ha un valore di q_{sk} in funzione all'altitudine del sito, come definito dalle seguenti espressioni:

$$q_{sk} = 1,50 \text{ kN/m}^2 \quad \text{per } a_s \leq 200 \text{ m}$$

$$q_{sk} = 1,39 \cdot \left[1 + \left(\frac{a_s}{728} \right)^2 \right] \text{ kN/m}^2 \quad \text{per } a_s > 200 \text{ m}$$

Essendo l'altitudine del sito pari a 239 m sopra il livello del mare, il valore caratteristico del carico neve al suolo sarà pari a:

$$q_{sk} = 1,39 \cdot \left[1 + \left(\frac{239}{728} \right)^2 \right] = 1,54 \text{ kN/m}^2$$

Per l'assunzione del valore del coefficiente di esposizione, è necessario analizzare nello

specifico l'area sul quale sorge l'edificio. La normativa prevede che nel caso di topografia "Normale", ovvero nel caso di "aree in cui non è presente una significativa rimozione di neve sulla costruzione prodotta dal vento, a causa del terreno, altre costruzioni o alberi"³¹, il valore del coefficiente di esposizione sia da assumere $C_E=1$.

Anche per il coefficiente termico il valore da assumere è $C_t=1$, dato che non è stata eseguita sulla copertura nessuna specifica analisi sul materiale isolante.

Per quanto riguarda il coefficiente di forma, la normativa prevede dei valori nominali in base all'angolo di inclinazione della copertura e del numero di falde. Nel caso specifico del Palazzo del Lavoro, la copertura è piana, di conseguenza si avrà il valore di m_1 corrispondente all'angolo di inclinazione α compreso tra 0 e 30°, che sarà pari a $\mu_1 = 0,8$.

Ne risulta quindi un carico della neve in copertura pari a:

$$q_s = 0,8 \cdot 1,54 \cdot 1 \cdot 1 = 1,232 \text{ kN/m}^2$$

Inserimento dei carichi

Una volta calcolati i valori dei carichi è stato necessario applicarli al modello. Per poter fare ciò, è necessario agire direttamente sul modello analitico precedentemente affinato e corretto.

Come già anticipato, infatti, è possibile inserire gli elementi di carico direttamente in ambiente BIM, grazie al comando "Carichi" presente nella scheda dei comandi relativa all'analisi. È necessario innanzitutto individuare le condizioni di carico. Revit definisce di default le condizioni di carico nel seguente modo:

- DL1: definisce il peso proprio degli elementi;
- LL1: definisce i carichi di esercizio;
- WIND1: definisce i carichi causati dall'azione del vento;
- SNOW1: definisce i carichi causati dall'azione della neve;
- LR1: definisce i carichi di esercizio da attribuire al tetto;
- ACC1: definisce i carichi accidentali;
- TEMP1: definisce le azioni causate dalle variazioni di temperatura;
- SEIS1: definisce le azioni sismiche.

Nel caso specifico del Palazzo del Lavoro, le condizioni di carico prese in considerazione saranno le seguenti: DL1, LL1, WIND1 e SNOW1. Per quanto riguarda le azioni causate dal sisma, verranno calcolate in seguito in ambiente di calcolo.

Una volta individuate le corrette condizioni di carico, è stato possibile inserire i carichi. Revit permette l'inserimento di tre tipologie di carico:

- Carico concentrato, rappresentato da un vettore puntuale;
- Carico lineare, rappresentato da un carico distribuito lungo una retta;
- Carico ad area, rappresentato da un carico distribuito su una superficie.

Per tutte queste tipologie, è possibile inserire gli elementi carico sia inserendolo manualmente definendone il punto, la retta o l'area di applicazione manualmente oppure inserendolo come carico ospitato, selezionando l'elemento che verrà gravato dallo specifico carico. Per una maggiore correttezza del modello, si è deciso di utilizzare il secondo metodo di inserimento, ossia quello del carico ospitato, in modo tale che, in fase di trasferimento, il carico venga applicato correttamente anche in ambiente di calcolo.

Dopo aver scelto la tipologia di carico da inserire, si può passare all'inserimento del carico modificandone i parametri dal pannello delle proprietà, dove sarà possibile assegnare la corretta condizione a cui il carico appartiene e il valore da applicare nella direzione corretta.

Tipologie di carichi previste in Revit



Trasferimento del modello

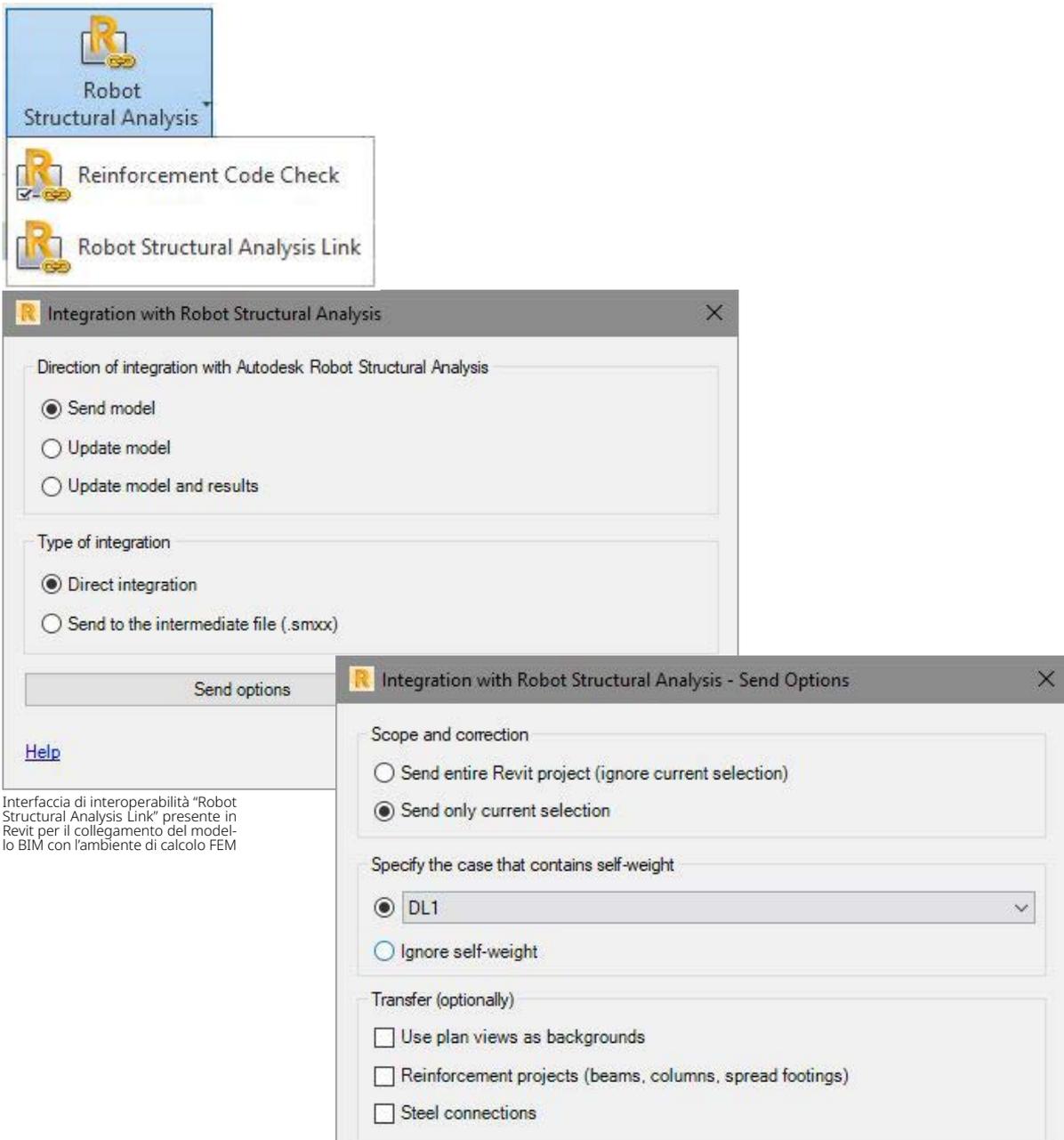
Successivamente all'affinamento del Modello Analitico e all'inserimento dei carichi che incidono sull'edificio, si può passare al trasferimento dei dati verso l'ambiente di calcolo. Per poter fare comunicare correttamente Revit e Robot Structural Analysis, è necessario aver installato un plug-in che si chiama "Structural Analysis Toolkit for Revit" compatibile con la versione di entrambi i software, nel caso specifico è stata utilizzata la versione 2019.

Una volta installato, verrà aggiunto all'interno della scheda "Analizza" di Revit una nuova barra dei comandi che permette la connessione tra i due software. Cliccando su "Robot Structural Analysis Link" si apre la finestra d'interfaccia di scambio, dove sono disponibili tutte le opzioni e le impostazioni per il trasferimento dei dati.

Tra le varie opzioni disponibili, possiamo scegliere se inviare il modello BIM da zero su un nuovo file di Robot, oppure se inviare un suo aggiornamento, con o senza i risultati dell'analisi, ad un file già esistente. È inoltre possibile scegliere la metodologia di invio del modello: si può scegliere tra invio diretto e invio tramite file di scambio intermedio, che permette di salvare il file in formato ".smxx", indicato principalmente nel caso di trasferimento su un altro computer.

Nella sezione "Send Options" è possibile stabilire quali dati inviare verso il software di calcolo. Si può infatti decidere se inviare il modello interamente oppure solamente una parte precedentemente selezionata, se mandare o meno dati sul peso proprio della struttura e

in quale condizione di carico esso deve essere inserito. È inoltre possibile selezionare dei parametri di trasferimento che permettono di inviare le viste di pianta da impostare come sfondo del progetto, le armature delle sezioni e le connessioni strutturali in acciaio presenti

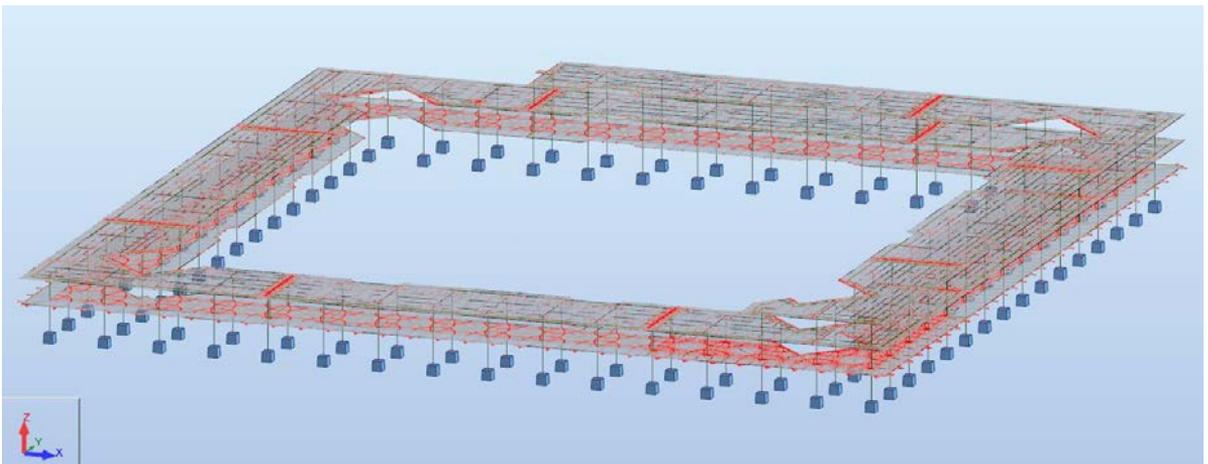
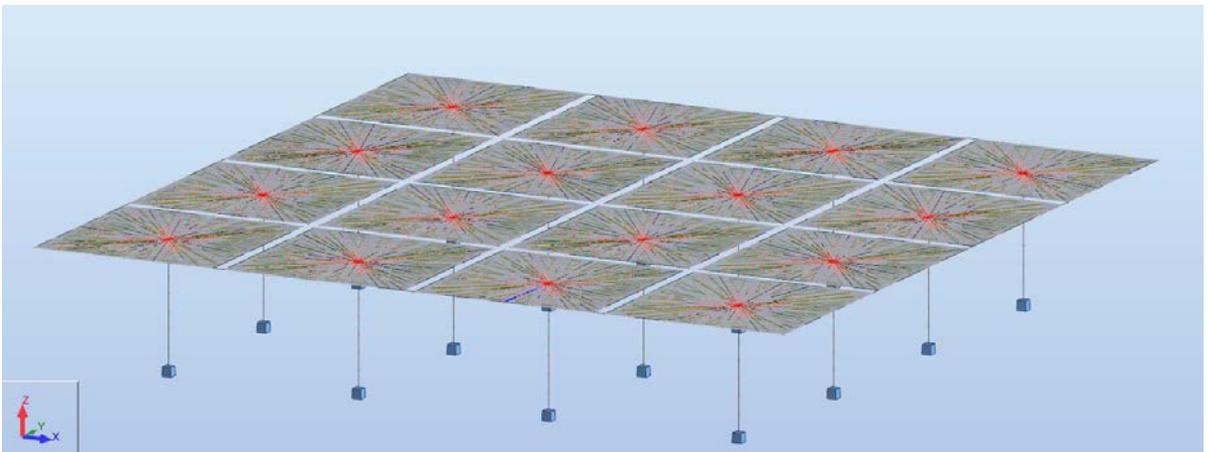
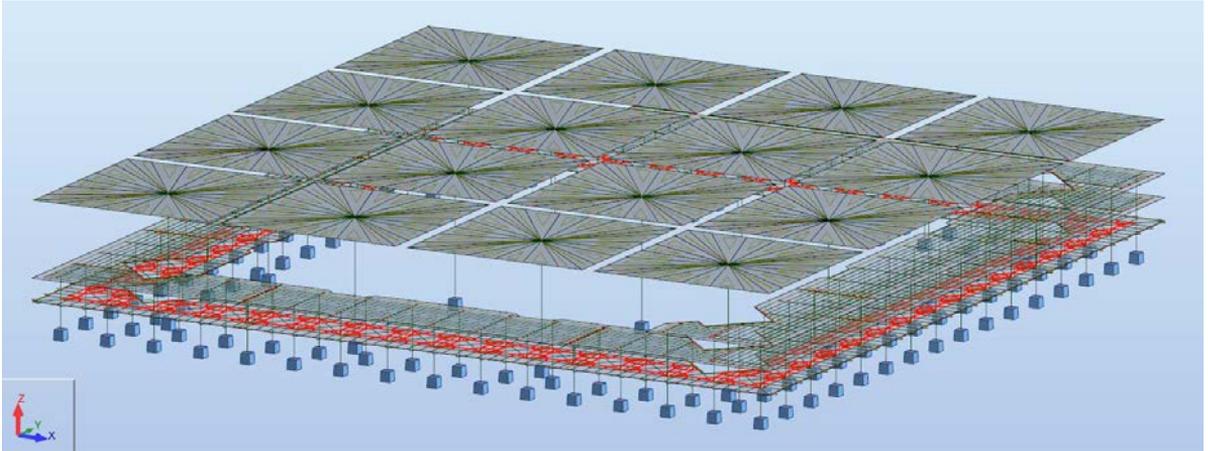


Interfaccia di interoperabilità "Robot Structural Analysis Link" presente in Revit per il collegamento del modello BIM con l'ambiente di calcolo FEM

nel progetto da inviare.

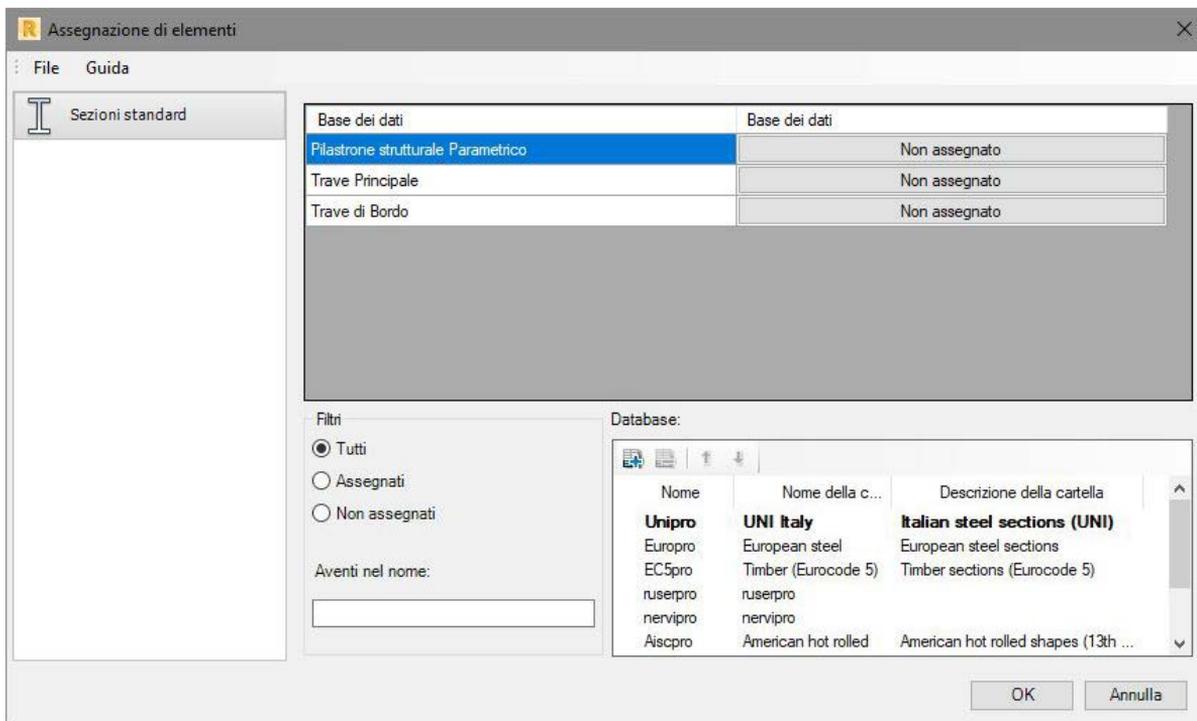
Per il caso studio si è scelto di trasferire separatamente la copertura composta dai 16 “funghi” e la balconata perimetrale con il metodo d’integrazione diretta, in quanto trasferendo tutta la struttura il file risulta troppo pesante per poter essere elaborato dal software e quindi necessita di essere alleggerito.

Dall’alto: Modello FEM della struttura completa, modello FEM della copertura e modello FEM della balconata perimetrale.



Correzione del modello FEM

Una volta terminato il trasferimento, è possibile notare come, per tutti gli elementi trave e pilastro creati appositamente per il progetto corrente su Revit, i dati scambiati non vengono recepiti in maniera corretta da Robot Structural Analysis. Ciò è dovuto al fatto che per poter attribuire la sezione ad un elemento trave, o ad un elemento pilastro, debba esserci corrispondenza nei database delle sezioni di entrambi i software. È quindi necessario andare ad operare preventivamente su di essiaggiungendo le sezioni mancanti.

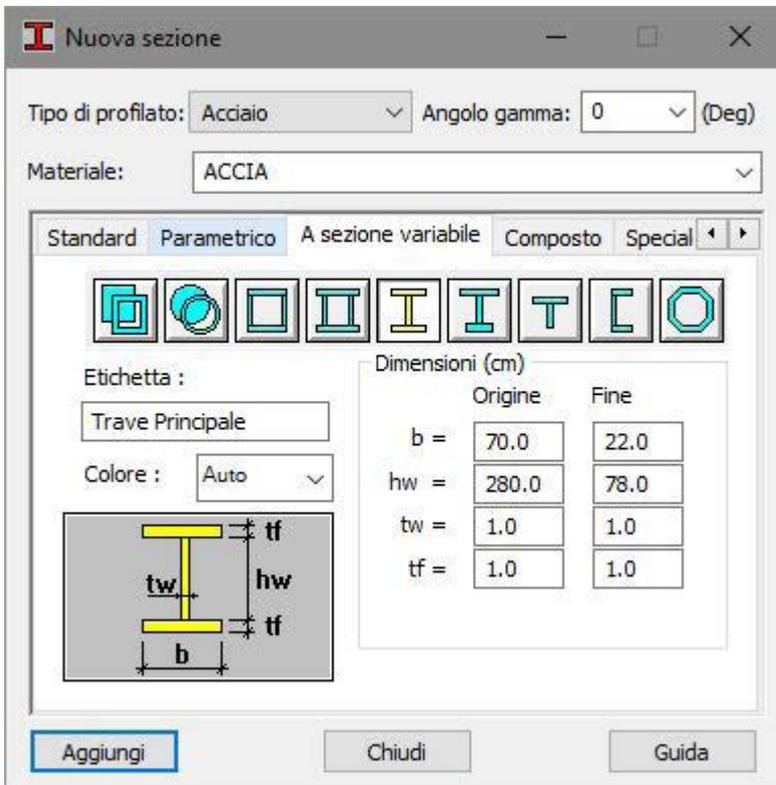


Interfaccia per l'assegnazione manuale delle sezioni mancanti.

Per poter fare ciò, bisogna utilizzare il comando "Profili delle barre", dove sarà possibile creare e modificare le sezioni da attribuire alle travi ed ai pilastri. Una volta aperta la finestra relativa alle sezioni sarà possibile creare un nuovo profilo tramite una procedura guidata. È infatti possibile creare delle sezioni a partire da delle sagome prestabilite o da sezioni provenienti da sagomari standard, modificando determinati parametri o combinando più profilati ed impostando la tipologia del profilato ed il materiale che tale sezione dovrà avere di default. Questa modalità di creazione è stata utile per la realizzazione delle sezioni attribuite alle travi in acciaio presenti in copertura, ad esempio per la creazione della trave di bordo è stata utilizzata una sezione parametrica ad U a sezione costante. Per la trave principale della copertura è stato possibile utilizzare la modalità "sezione variabile" che permette di modificare le dimensioni della sezione iniziale e della sezione finale, mantenendo però costante la sagoma di partenza.

Al contrario che per gli elementi in acciaio, questa modalità non è risultata sufficientemente efficace alla creazione delle sezioni dei pilastri a sezione variabile che sostengono la copertura, in quanto tale modalità, non permette la realizzazione di forme libere e, tantomeno, a sezione di forma variabile per pilastri e travi in calcestruzzo. È stato quindi necessario realizzare manualmente le sagome nella modalità "Progettazione di un profilato", dalla quale è possibile creare un nuovo profilo di sezione partendo da zero oppure importandone il disegno in formato dxf.³² Una volta realizzato, il nuovo profilo può essere salvato in una libreria utente e successivamente importata nel progetto dove sarà possibile assegnargli il materiale corretto, in quanto, ad ogni profilo realizzato con questa modalità, viene impostato come materiale di default l'acciaio.

32 Drawing Exchange Format, o DXF, è un formato realizzato da Autodesk per l'interscambio di file tra il software Autocad ed altri software.



Interfaccia per la creazione guidata di una nuova sezione in acciaio.

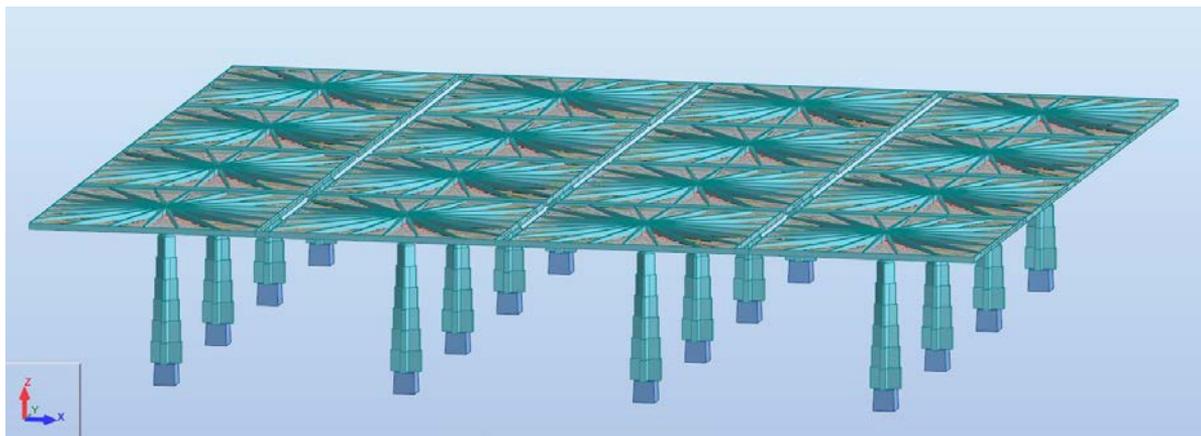
Data, però, l'impossibilità di Robot Structural Analysis di realizzare pilastri in calcestruzzo di sezione variabile, è stato necessario discretizzarne la forma e suddividere l'intero pilastro in un numero di parti con sezione tale da poter riprodurre il più verosimilmente possibile il comportamento dell'oggetto esistente. È stato quindi scelto di suddividere tale elemento nelle sette sezioni rappresentate nel disegno esecutivo di Nervi già menzionato per la realizzazione della famiglia del pilastro strutturale del modello BIM. Una volta realizzate le sezioni stabilite, è stato necessario suddividere gli elementi pilastro ed assegnare a ciascuna delle aste ottenute la sezione corretta in maniera del tutto manuale.

Lo stesso procedimento è stato eseguito sulle travi principali per la realizzazione del tam-

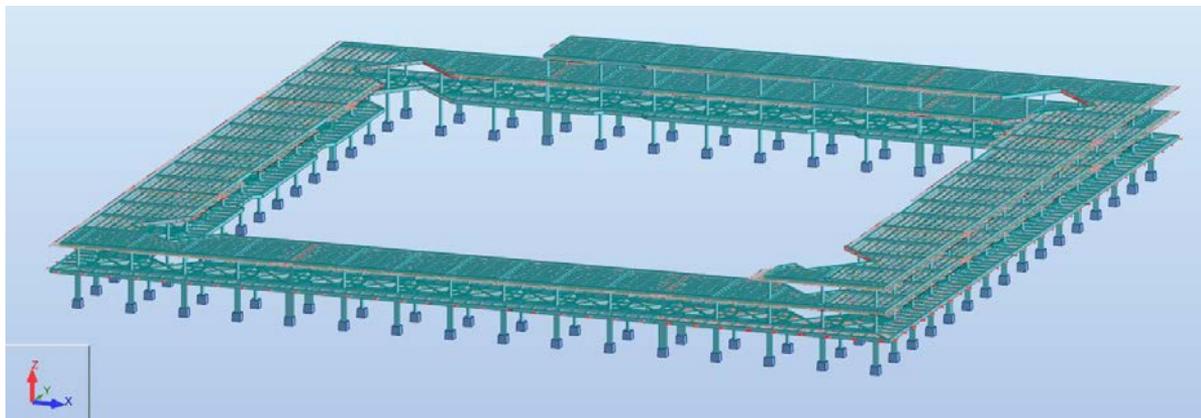
buro di ancoraggio che vincola le travi al pilastro. Essendo su revit un elemento non strutturale, esso non viene trasferito e, di conseguenza, nel modello le travi rastremate che reggono la copertura risultavano direttamente ancorate al pilastro. Per questo motivo, in corrispondenza del nodo tra i pilastri e le travi del modello della copertura, è stato necessario dividere le travi ad una distanza di 3 m, ovvero la dimensione del raggio del tamburo, ed assegnare al nuovo segmento una sezione continua con le corrette dimensioni ed un elemento di rinforzo, necessario a rendere il nuovo elemento infinitamente rigido, ricreando così la situazione esistente.

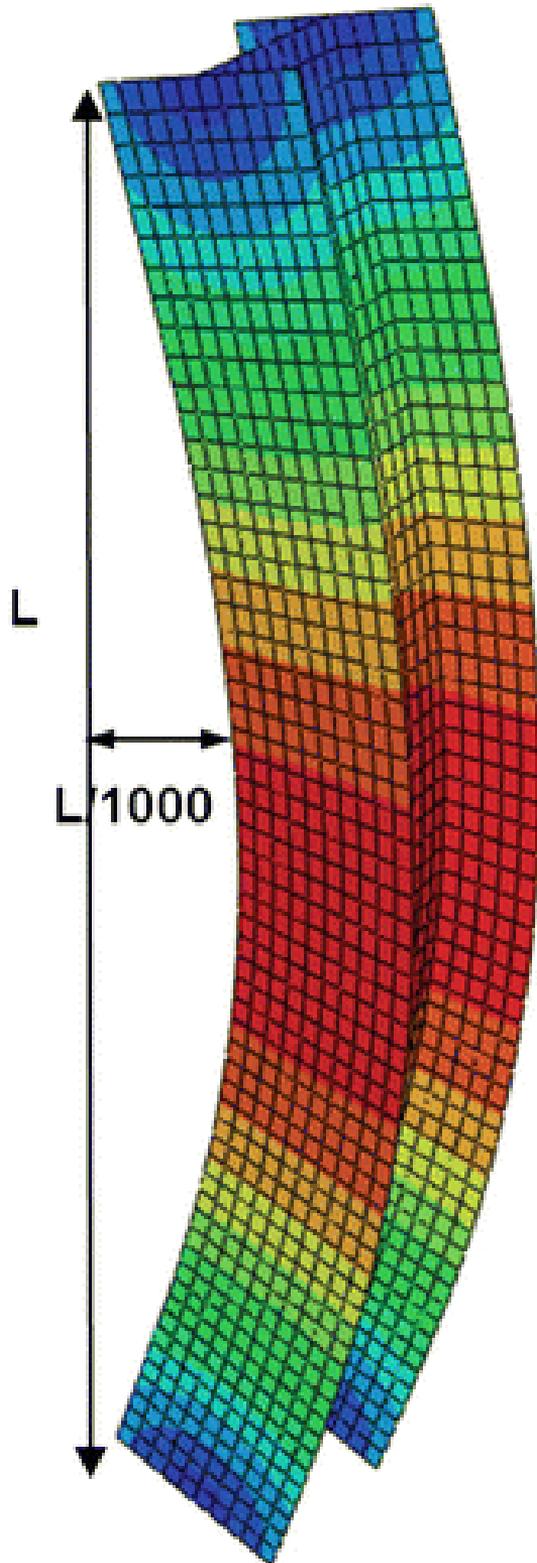
Una volta che ad ogni elemento del modello sarà assegnata correttamente ogni informazione necessaria, sarà possibile effettuare il calcolo della struttura.

Modello FEM Copertura con tutte le sezioni assegnate correttamente.



Modello FEM Balconata perimetrale con sezioni correttamente assegnate.





Analisi agli elementi finiti deforma-
zione trave in acciaio

ANALISI STRUTTURALE

Combinazioni di carico

Prima di poter avviare l'analisi strutturale, è necessario impostare correttamente le condizioni di carico. Avendo in precedenza già calcolato ed inserito in ambiente BIM parte delle azioni agenti sulle strutture che andremo ad analizzare, parte di questa operazione è stata eseguita in automatico dal software in seguito al trasferimento del modello. Infatti, andando ad aprire la lista delle condizioni di carico si possono vedere le condizioni precedentemente stabilite, ovvero DL1 (peso proprio), LL1 (carichi di esercizio), WIND1 (vento), SNOW1 (neve).

Sarà successivamente utile eliminare, per entrambi i modelli, le condizioni che non saranno necessarie per velocizzare in seguito la fase di calcolo: ad esempio nel modello della balconata si dovrà eliminare la condizione di carico SNOW1, in quanto su questa parte della struttura la neve non andrà mai ad agire, mentre sulla copertura è possibile, come indicato da normativa (vedi Tabella 3.1.II - Valori dei carichi d'esercizio per le diverse categorie di edifici, NTC 2008), trascurare il carico di esercizio. Una volta rimosse le condizioni non necessarie ai fini dell'analisi, occorre generare le combinazioni di carico a Stato Limite Ultimo (SLU), attraverso il comando "Combinazioni di carico automatiche", dove sarà possibile definire la normativa di riferimento e quali tipologie di combinazioni saranno da prendere in considerazione. Come previsto dalla normativa³³, la combinazione di carico a SLU sarà:

33 (NTC, 2008)

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots$$

Dove i carichi G corrispondono ai carichi permanenti, ovvero nel caso specifico quelli dettati dal peso proprio, ed i carichi Q sono i carichi variabili. Nelle tabelle seguenti sono indicati i valori dei coefficienti di sicurezza γ ed i coefficienti di combinazione ψ :

Tabella coefficienti di sicurezza. Fonte: Tabella 2.6.1 - Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLU, in NTC2008

		Coefficiente γ_F	EQU	A1 STR	A2 GEO
Carichi permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	sfavorevoli		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti non strutturali ⁽¹⁾	favorevoli	γ_{G2}	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3
Carichi variabili	favorevoli	γ_{Qi}	0,0	0,0	0,0
	sfavorevoli		1,5	1,5	1,3

⁽¹⁾Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. carichi permanenti portati) siano compiutamente definiti si potranno adottare per essi gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Categoria/Azione variabile	Ψ_{0j}	Ψ_{1j}	Ψ_{2j}
Categoria A Ambienti ad uso residenziale	0,7	0,5	0,3
Categoria B Uffici	0,7	0,5	0,3
Categoria C Ambienti suscettibili di affollamento	0,7	0,7	0,6
Categoria D Ambienti ad uso commerciale	0,7	0,7	0,6
Categoria E Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale	1,0	0,9	0,8
Categoria F Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Categoria G Rimesse e parcheggi (per autoveicoli di peso > 30 kN)	0,7	0,5	0,3
Categoria H Coperture	0,0	0,0	0,0
Vento	0,6	0,2	0,0
Neve (a quota ≤ 1000 m s.l.m.)	0,5	0,2	0,0
Neve (a quota > 1000 m s.l.m.)	0,7	0,5	0,2
Variazioni termiche	0,6	0,5	0,0

Tabella coefficienti di combinazione.
Fonte: Tabella 2.5.1 – Valori dei coefficienti di combinazione, in NTC2008

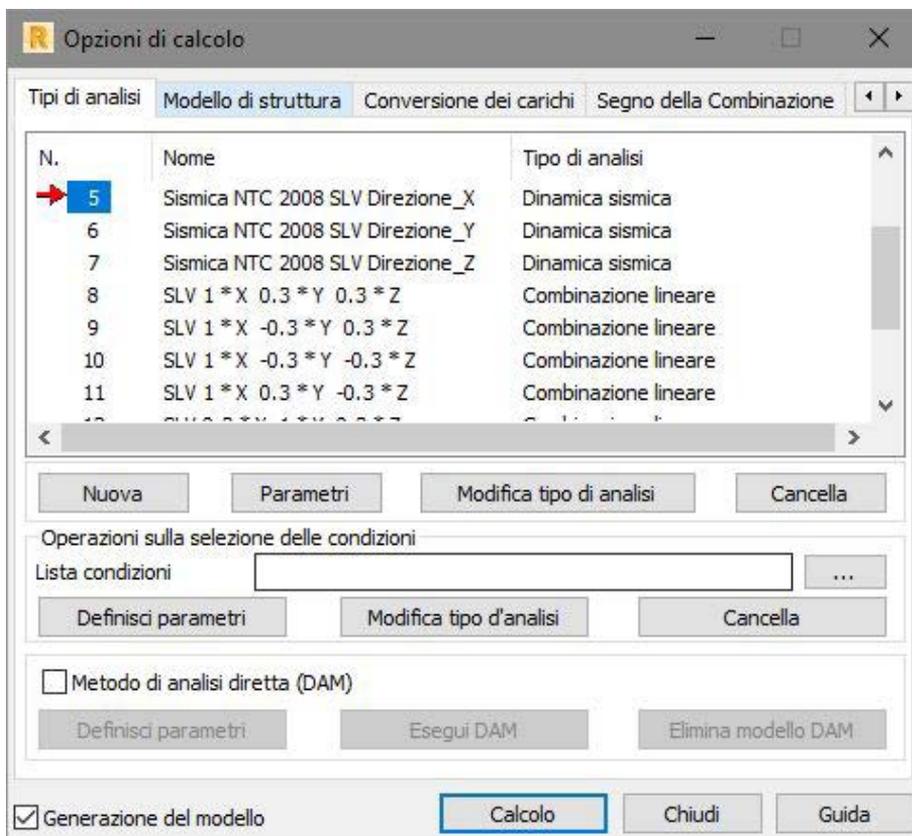
Come già anticipato durante l'analisi dei carichi, è stato necessario inserire le condizioni di carico dovute al sisma che saranno calcolate in automatico da Robot Structural Analysis in conformità con la normativa vigente. Per fare sì che tale calcolo avvenga, sarà necessario innanzitutto definire i parametri per l'analisi modale, che definisce il comportamento della struttura sottoposta alle vibrazioni causate dalle azioni dinamiche. Sarà necessario impostare, durante la definizione dei parametri, il numero di modi da analizzare e la percentuale di massa di partecipazione minima da raggiungere, che deve essere almeno dell'85% della massa totale. Con l'inserimento congiunto di questi parametri, il software, in fase di calcolo, analizzerà il numero di modi necessario affinché si raggiunga la percentuale di massa richiesta, rimanendo però sempre nel range impostato inizialmente.

Interfaccia per la definizione dei parametri per il calcolo dell'analisi modale.

Successivamente sarà necessario inserire le condizioni di carico relative al sisma. Al momento della definizione della nuova condizione, è possibile selezionare a fianco della voce "Sismica" la normativa di riferimento ed i relativi parametri relativi alla vita nominale e classe d'uso dell'edificio, le coordinate geografiche ed i parametri relativi al sito di progetto ed il fattore di struttura q , dati necessari per il calcolo dello spettro di risposta dell'azione sismica secondo la normativa. Nel caso preso in analisi, sono stati inseriti una vita nominale di 50 anni, una classe d'uso III, categoria di sottosuolo B, classe topografica T1, e coefficiente q pari a 1,5, scelto in favore di sicurezza.

Stabiliti i valori sul quale calcolare lo spettro di risposta, è necessario decidere per quali stati limite eseguire il calcolo. Essendo una struttura esistente, la normativa prevede che sia eseguita la verifica a SLV, ovvero stato limite di salvaguardia della vita.

Una volta terminato l'inserimento di questi dati, saranno generate, in automatico, tutte le combinazioni di carico previste dalla normativa da considerare per la verifica a sisma, dopodiché sarà quindi possibile avviare la fase di calcolo.



Interfaccia delle opzioni di calcolo, dove è possibile definire le condizioni di carico da assegnare alla struttura.

Come già detto in precedenza, è stato necessario separare l'intero modello strutturale del Palazzo del Lavoro in due modelli distinti, separando la copertura dalla balconata perimetrale. Questa operazione è stata possibile solamente perché le due strutture appartengono a due sistemi separati che non interagiscono tra loro. Ciò ha permesso di poter analizzare separatamente le due strutture.

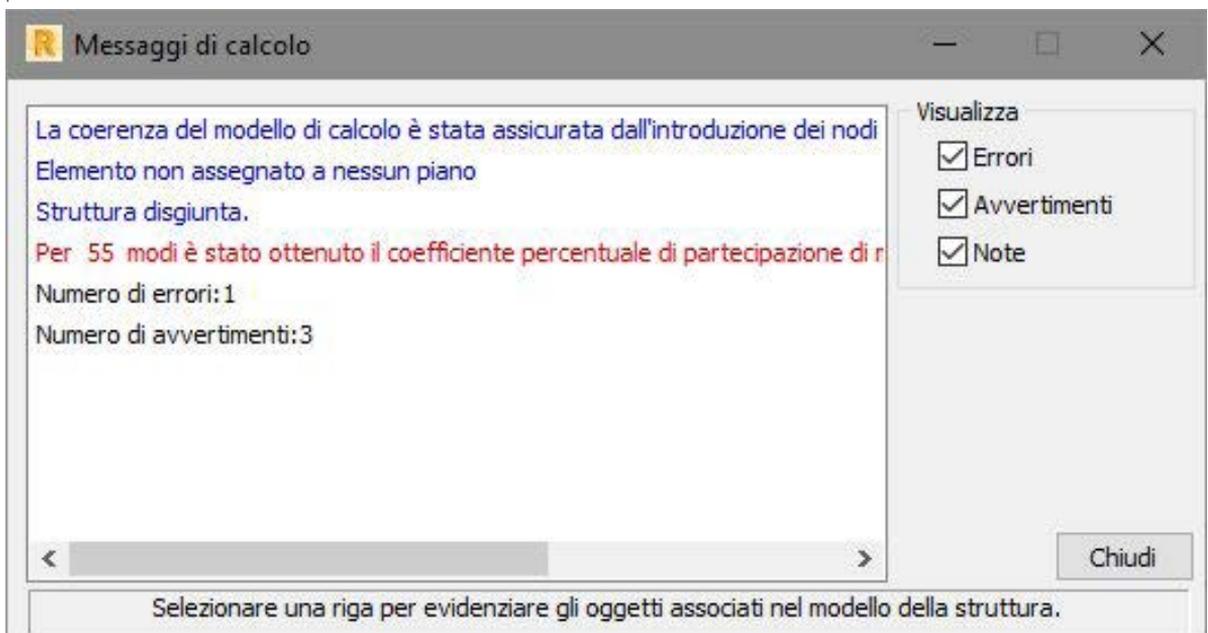
Analisi copertura

Terminata la creazione delle combinazioni di carico, è possibile avviare la fase di calcolo. Durante questa fase, vengono eseguite sia l'analisi statica che quella dinamica. Come già accennato, sia per l'analisi statica sia per l'analisi dinamica sono state calcolate solamente le combinazioni a Stato Limite Ultimo della struttura.

Essendo la struttura della copertura composta dai sedici elementi a "fungo", dei quali solamente quelli più esterni sono connessi tra loro attraverso le travi di bordo perimetrali, in questa fase sono emerse alcune note da tenere presente. La prima, completamente trascurabile perché voluta, è che la struttura viene rilevata come "disgiunta". Come già detto, infatti, i quattro sistemi a "fungo" centrali non sono collegati con gli altri e lavorano singolarmente. Si può quindi notare come questi quattro moduli della copertura saranno soggetti a tutte le condizioni di carico eccetto quella del vento che agisce solamente sugli elementi perimetrali.

La seconda invece è quella inerente all'analisi modale dell'intero sistema di copertura. Come già accennato, in questa fase il software calcola un numero definito di modi di comportamento della struttura a seguito di una vibrazione, ovvero quella del sisma, fino a raggiungere una percentuale di massa partecipante minima, prestabilita dalla normativa, pari all'85% del totale. Essendo il modello strutturale preso in analisi composto da 16 parti svincolate tra loro, prima di poter raggiungere la percentuale di massa partecipante stabilita sarà necessario al software analizzare un numero elevato di modi di vibrare, e, come in questo caso, potrebbe non arrivare ad una soluzione ottimale. Fortunatamente, la struttura risulta modulare, perciò, sia per facilitare l'analisi sia per velocizzare la procedura di calcolo automatico, è stato utile scomporre ulteriormente questo sistema ed analizzare

Visualizzazione degli avvertimenti e degli errori generati al termine del calcolo del modello totale della copertura.



singolarmente uno dei moduli che lo compongono, potendo quindi studiare il comportamento a seguito di una azione sismica di questi elementi.

Dal modello generale della copertura, è stato quindi isolato un singolo modulo, caricato con tutte le condizioni di carico in modo tale da poter avere un confronto per tutte le condizioni di carico e le relative combinazioni.

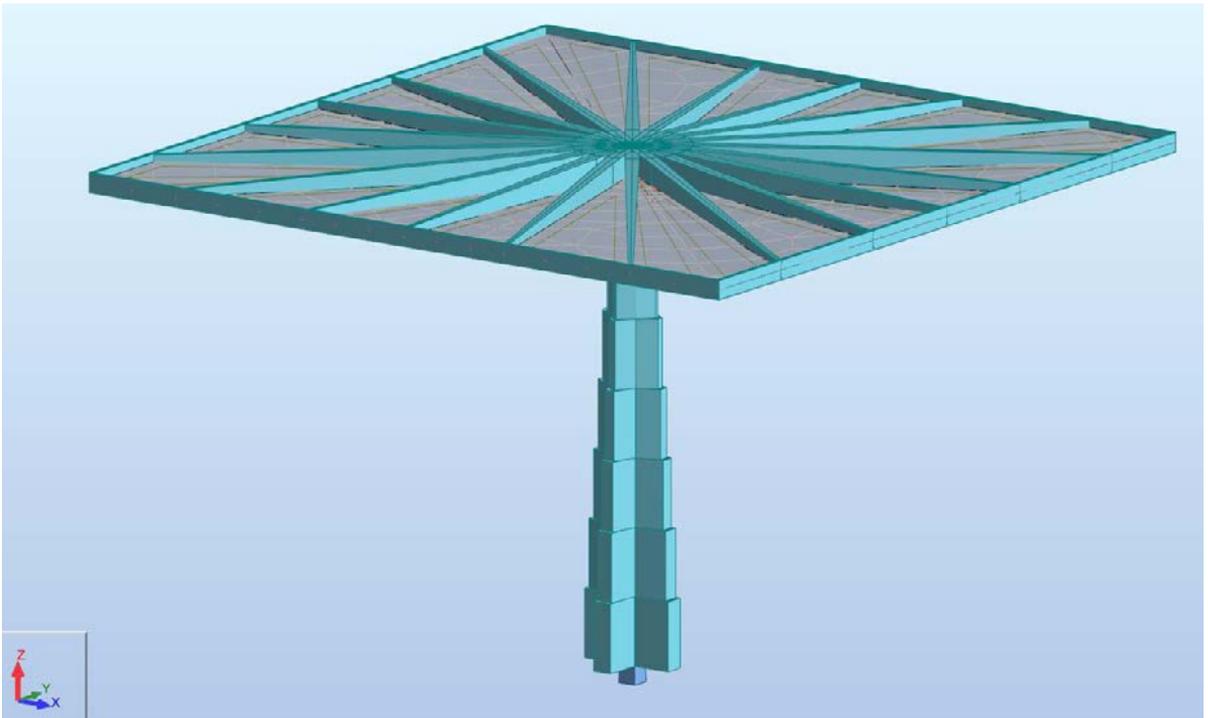
Aviando nuovamente la fase di calcolo, è possibile vedere come, in questo caso, sia le fasi per l'analisi statica che quelle per l'analisi dinamica riescano ad andare a buon fine.

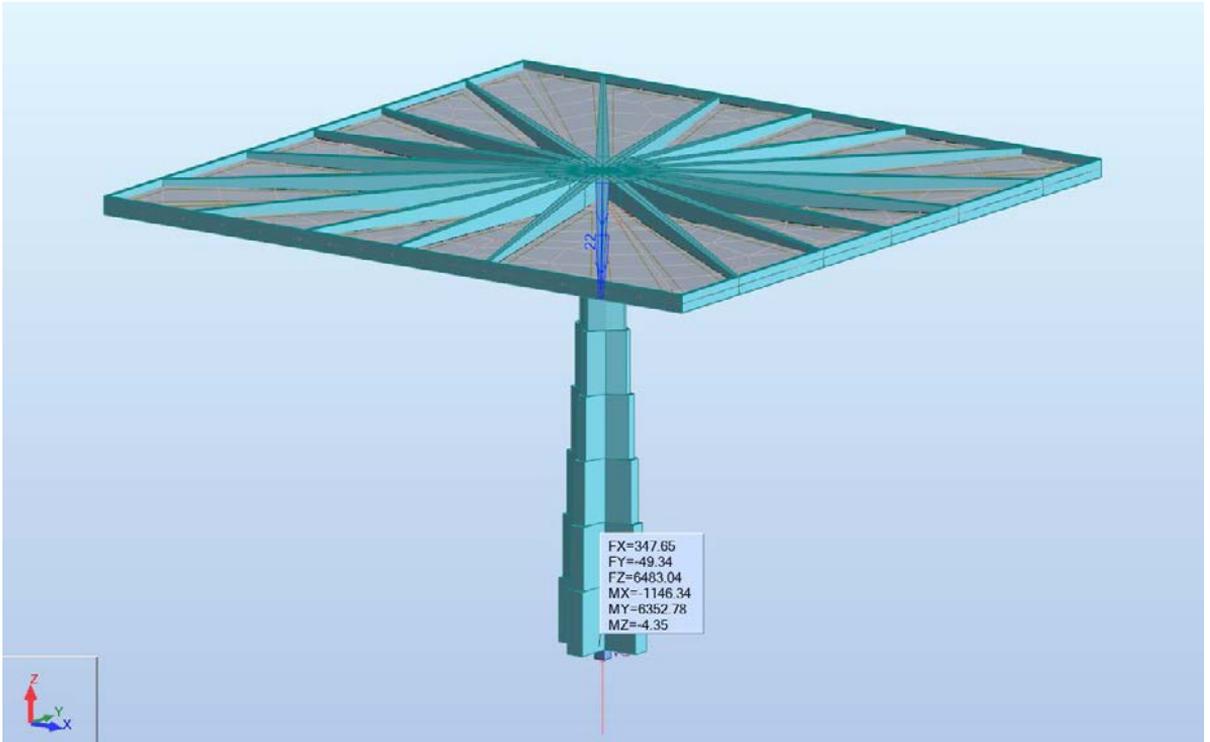
Al termine dell'analisi, si può vedere come il numero di modi necessari al raggiungimento della percentuale di massa partecipante minima sia decisamente inferiore rispetto al modello generale della copertura.

Di seguito possiamo vedere i risultati ottenuti dall'analisi del fungo singolo.

Come possiamo vedere nella combinazione SLU si ha un abbassamento massimo della copertura di 1,5 cm, che, su una luce di sbalzo pari a 20m, si può ritenere accettabile.

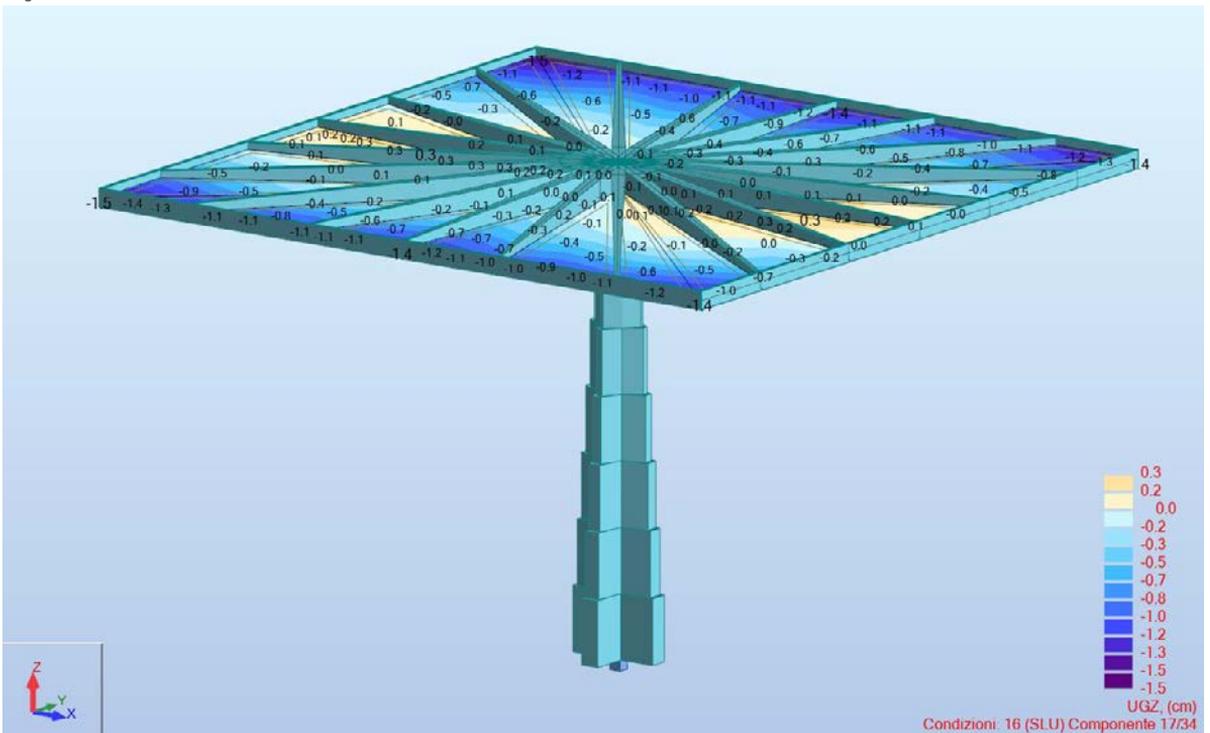
Modello FEM del fungo singolo con visualizzazione delle sezioni.

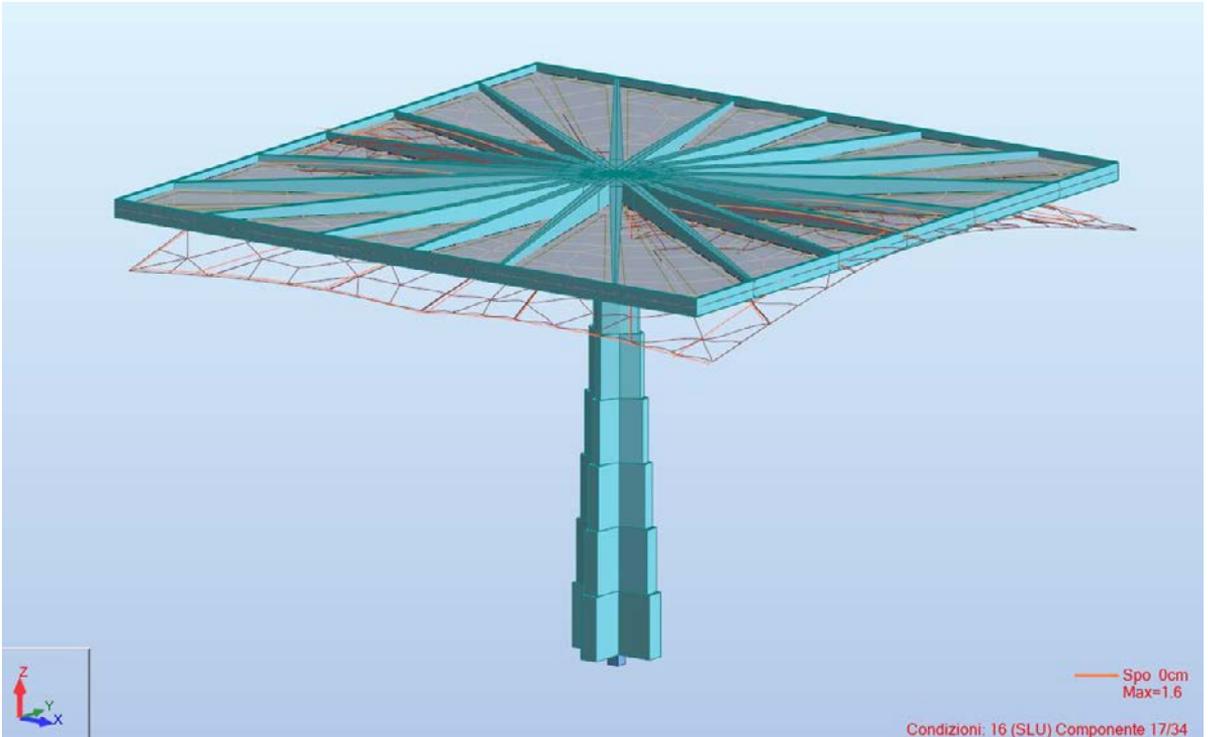




Reazioni vincolari ottenute dal calcolo per la combinazione SLU del fungo singolo.

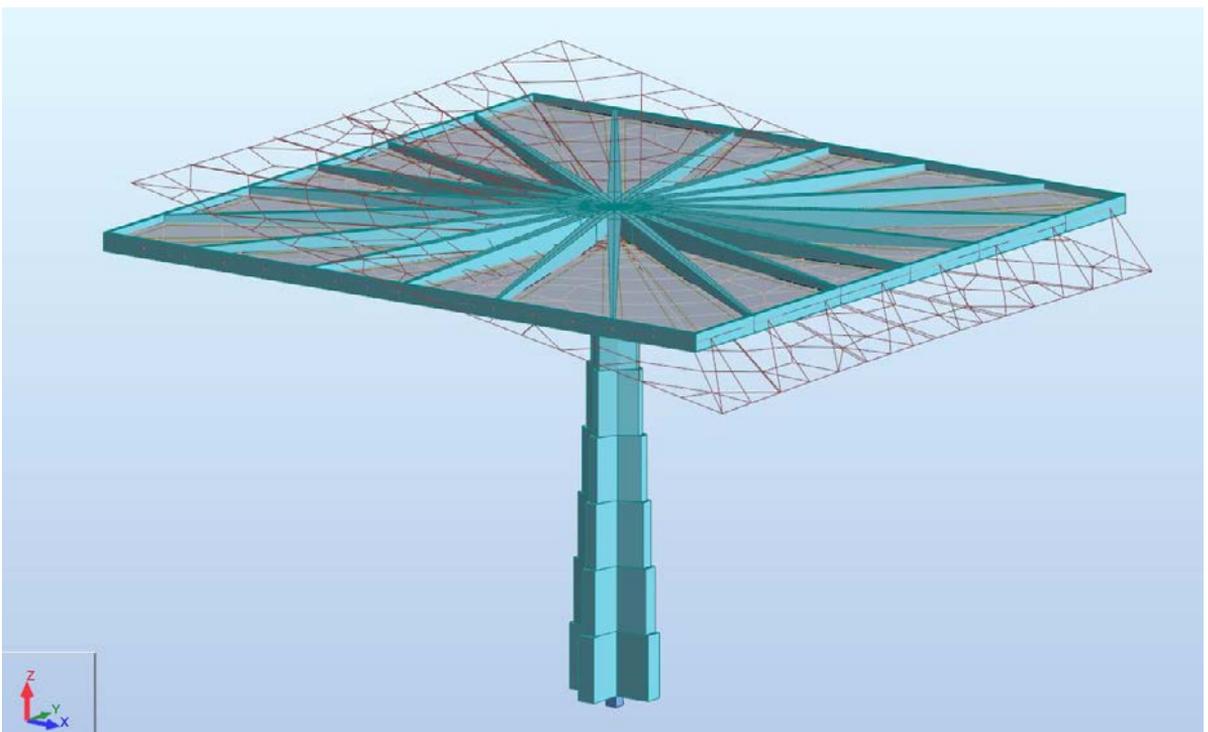
Abbassamento totale (direzione Z) per la combinazione SLU del fungo singolo.





Deformazioni ottenute dal calcolo per la combinazione SLU del fungo singolo.

Deformazioni ottenute dall'analisi modale (modo 3) del fungo singolo.



Confronto dei risultati copertura con calcoli di Nervi

Una volta ottenuti i risultati è sembrato opportuno verificarne l'affidabilità, per questo motivo è stato effettuato un controllo con i calcoli presenti nelle relazioni di calcolo del progetto originario.

Come prima cosa, è stato fondamentale confrontare i carichi relativi al peso proprio stimati in fase di progetto con quelli calcolati in automatico da Robot Structural Analysis. Nervi stima un peso proprio generato dai pilastri e dalla copertura di 652 T, che è pari a 6396,12 kN, ricavate dai seguenti calcoli:

Sezione alla sommità:	$S = \pi \frac{2,50^2}{4} = 4,90 \text{ mq}$
Sezione alla base:	$S = 2 \times 5,00 \times 1,00 - 1,00 \times 1,00 = 9,00 \text{ mq}$
Sezione media:	$S = \frac{4,90 + 9,00}{2} = 7,00 \text{ mq}$
Peso proprio per h = 20,50m:	$P = 7,00 \times 20,50 \times 2500 = 360 \text{ T}$
Peso totale del pilastro:	$P = 360 + 132 = 492 \text{ T}$
Carico permanente della copertura:	$P = 40 \times 40 \times 100 = 160 \text{ T}$
Carico permanente totale pilastri:	$P = 492 + 160 = 652 \text{ T}$
Carico permanente totale pilastri (kN):	$P = 652 \times 9,81 = 6396,12 \text{ kN}$

Dal calcolo di Robot Structural Analysis si ricava un peso proprio totale pari a 6478,91 kN.

Nonostante la differenza di peso tra il calcolo di Nervi ed il calcolo automatizzato, il modello di calcolo può ritenersi attendibile. Tale differenza può essere dovuta all'approssimazione del peso della copertura eseguita in fase di modellazione: data la scarsa reperibilità di informazioni sulla copertura, è stato impossibile riprodurre esattamente la stratigrafia della copertura, è stato perciò necessario ipotizzare un peso verosimile.

Per le azioni causate dal vento, Nervi stima una pressione uniforme sulla facciata pari a 50 kg/m² che genera, per ogni pilastro, una forza concentrata pari a:

$$F_V = \frac{1}{2} \times 800 \times 50 = 20000 \text{ kg}$$

Che convertiti in kN risultano:

$$F_V = 20000 \times 9,81 = 196200 \text{ N} = 196,20 \text{ kN}$$

La normativa vigente, in questo caso, risulta peggiorativa rispetto alla stima effettuata da Nervi: dall'analisi dei carichi causati dal vento, si ha una forza risultante per ogni pilastro pari a 265,60 kN.

Per quanto riguarda i carichi della neve, i risultati ottenuti dal modello di calcolo sono stati

confrontati con le stime eseguite manualmente in base alla normativa vigente. Inoltre, si può affermare che tali azioni in confronto alla situazione di sessanta anni fa si possono ritenere invariate.

Per le azioni causate dal sisma non risultano stime effettuate in fase di progetto da Nervi, in quanto, all'epoca della costruzione dell'edificio, Torino non risultava zona sismica e, pertanto, la normativa vigente al momento della progettazione non richiedeva tale analisi.

Confronto Vento e Sisma agenti sulla copertura

Non avendo nessun metro di paragone per quanto riguarda le azioni sismiche, si è deciso di confrontarle con le azioni causate dal vento, dato che entrambe le condizioni di carico generano azioni orizzontali sulla struttura.

Data la tipologia di struttura, sia il vento che il sisma generano delle azioni che vengono applicate in corrispondenza della copertura, dove è presente la maggiore quantità di massa. Per questa ragione, il confronto può essere effettuato sulle risultanti ottenute alla base del pilastro, ovvero il punto dove si ha il maggiore apporto delle azioni causate da entrambe le condizioni di carico.

Il taglio e il momento generati alla base del pilastro dalle azioni del vento risultano:

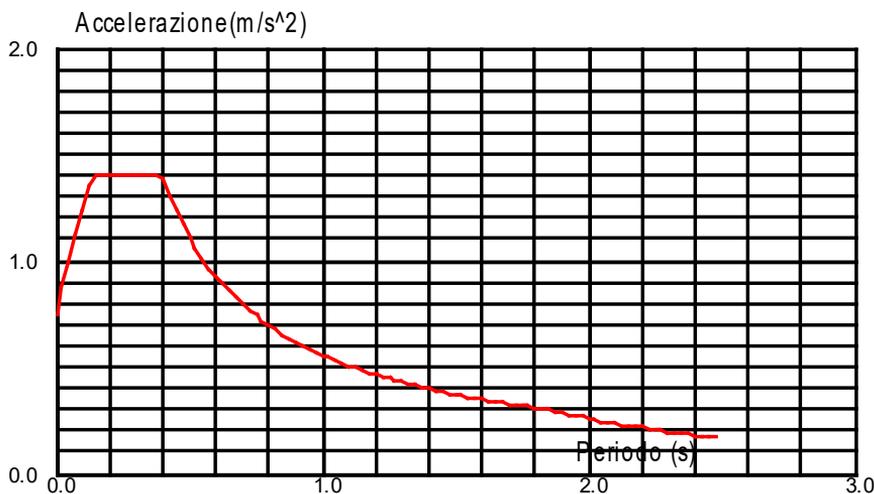
$$V_w = 265,60 \text{ kN} \quad M_w = 6507,20 \text{ kNm}$$

Mentre le risultanti di taglio e momento causate dalle azioni sismiche generate sono pari a:

$$\text{In direzione X:} \quad V_{s,x} = 375,90 \text{ kN} \quad M_{s,y} = 6711,91 \text{ kNm}$$

$$\text{In direzione Y:} \quad V_{s,y} = 377,10 \text{ kN} \quad M_{s,x} = 6709,99 \text{ kNm}$$

Dalla lettura dei risultati è possibile notare come, nonostante la maggiore quantità di massa sia presente in copertura, la massa del pilastro incida in maniera significativa sull'azione sismica e non possa essere trascurata.



Spettro dei modi di vibrare ottenuto dal calcolo delle azioni sismiche orizzontali (coefficiente $q=1,5$) relativo al fungo singolo.

Verifica della sezione resistente

Una volta confrontate le azioni del vento e del sisma, è sembrato opportuno, conoscendo la quantità e la disposizione delle armature grazie ai disegni esecutivi realizzati da Nervi, effettuare la verifica della sezione maggiormente sollecitata, ovvero quella alla base del pilastro.

Grazie all'utilizzo di un semplice software per la verifica delle sezioni in calcestruzzo armato a Stato Limite Ultimo sviluppato dal prof. Piero Gelfi³⁴, è stato possibile calcolare il momento resistente della sezione denominata "Sezione sette" del pilastro.

Come possiamo vedere, il momento resistente della sezione a SLU è pari a 53504 kNm, di molto maggiore rispetto ai momenti generati dal vento e dal sisma.

Dato che Nervi, nei calcoli di progetto, effettua la verifica solamente sulla sezione in calcestruzzo senza tenere conto della presenza dell'armatura, è sembrato opportuno ripetere la verifica della sezione con tali condizioni.

Possiamo notare come, nonostante l'assenza di armatura, il momento resistente della sezione sia pari a 23117 kNm, comunque superiore ai momenti generati da vento e sisma.

Alla luce di ciò, è possibile affermare come la sezione del pilastro sarebbe in grado sopportare ai carichi agenti sulla copertura anche senza la presenza dell'armatura nonostante, per motivi di sicurezza, la normativa non lo consenta.

Verifica C.A. S.L.U. - File: Sezione Sette_Mrd(SLU_pos)

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : _____

N° Vertici Zoom N° barre Zoom

N°	x [cm]	y [cm]	N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	200	0	1	5.31	206.2	6.2
2	300	0	2	5.31	220.8	6.2
3	300	200	3	5.31	235.4	6.2
4	500	200	4	5.31	250	6.2
5	500	300	5	5.31	264.6	6.2
6	300	300	6	5.31	279.2	6.2

Tipo Sezione
 Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Sollecitazioni
 S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 0 kN
 M_{xEd} 0 kNm
 M_{yEd} 0

P.to applicazione N
 Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN yN

Tipo rottura
 Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

M_{xRd} kN m

σ_c N/mm²
 σ_s N/mm²
 ε_c %
 ε_s %
 d cm
 x x/d
 δ

Metodo di calcolo
 S.L.U.+ S.L.U.-
 Metodo n

Tipo flessione
 Retta Deviata

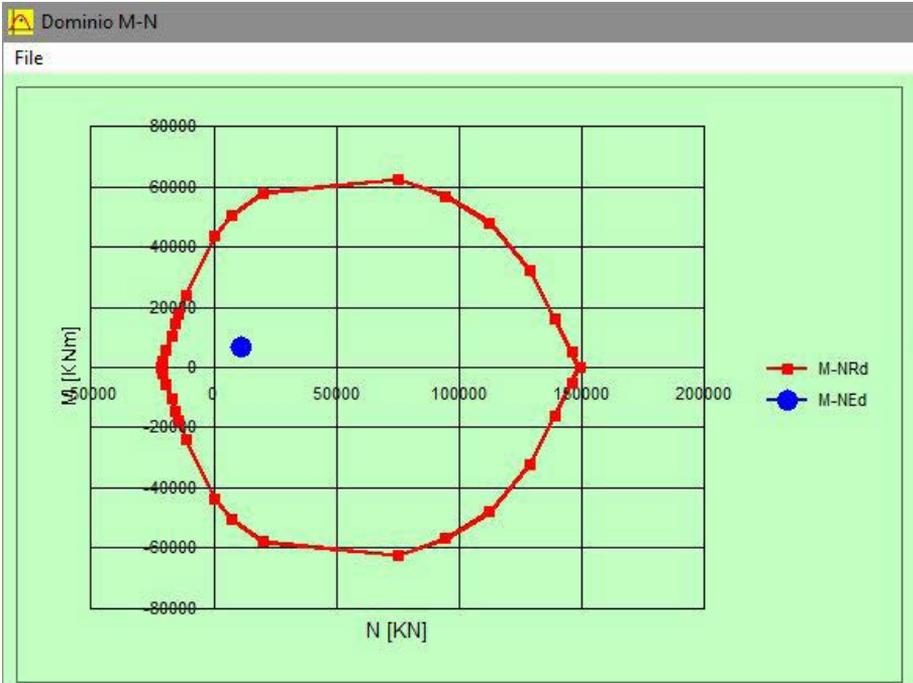
N° rett.

Calcola MRd Dominio M-N
 L₀ cm Col. modello

Precompresso

Materiali
 B450C C25/30
 ε_{su} % ε_{c2} %
 f_{yd} N/mm² ε_{cu} %
 E_s N/mm² f_{cd} %
 E_s/E_c f_{cc}/f_{cd} ?
 ε_{syd} % σ_{c,adm}
 σ_{s,adm} N/mm² τ_{co}
 τ_{c1}

Calcolo del momento resistente della sezione alla base del pilastro considerando l'inserimento dell'armatura.



Dominio M-N relativo alla sezione alla base del pilastro considerando l'inserimento dell'armatura.

Verifica C.A. S.L.U. - File: Sezione Sette_solo CLS

File Materiali Opzioni Visualizza Progetto Sez. Rett. Sismica Normativa: NTC 2008 ?

Titolo : _____

N° Vertici Zoom N° barre Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	200	0
2	300	0
3	300	200
4	500	200
5	500	300
6	300	300

Tipo Sezione
 Rettan.re Trapezi
 a T Circolare
 Rettangoli Coord.

Metodo di calcolo
 S.L.U. + S.L.U. -
 Metodo n

Tipo flessione
 Retta Deviata

N° rett.

Calcola MRd Dominio M-N

L₀ cm

Precompresso

Materiali

B450C	C25/30
ϵ_{su} 67.5 %	ϵ_{c2} 2 %
f_{yd} 391.3 N/mm ²	ϵ_{cu} 3.5 %
E_s 200 000 N/mm ²	f_{cd} 14.17
E_s/E_c 15	f_{cc}/f_{cd} 0.8
ϵ_{syd} 1.957 %	$\sigma_{c,adm}$ 9.75
$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm ²	τ_{co} 0.6
	τ_{cl} 1.829

P.to applicazione N
 Centro Baricentro cls
 Coord.[cm] xN yN

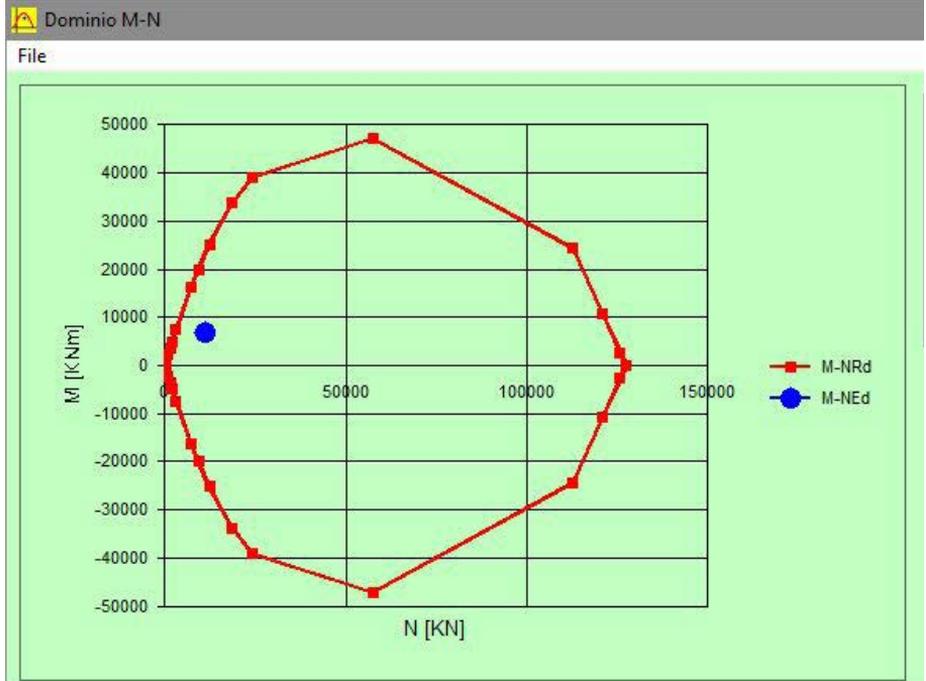
Tipo rottura
 Solo cls - Sez. parzialzata

M_{xRd} kN m

σ_{cs} -14.17 N/mm²
 σ_{ci} - N/mm²
 ϵ_{cs} 3.5 %
 ϵ_{ci} -14.751 %

x 958.8E

Calcolo del momento resistente della sezione alla base del pilastro considerando solamente la presenza del calcestruzzo.



Dominio M-N relativo alla sezione alla base del pilastro considerando solamente la presenza del calcestruzzo.

Analisi balconata

Come per il modello della copertura, terminata la definizione delle combinazioni di carico è possibile avviare la fase di calcolo, durante la quale verranno eseguite l'analisi statica e quella dinamica a Stato Limite Ultimo della struttura.

Anche in questo caso, durante la fase di analisi la struttura risulta disgiunta. Infatti, la balconata presente su tutto il perimetro del Palazzo del Lavoro è composta da otto parti separate unite tra loro per mezzo di giunti.

Questo fa sì che, come per il modello della copertura, durante la definizione del numero di modi di vibrare il software non riesca a raggiungere la percentuale minima dell'85% di massa partecipante. Sarà quindi necessario anche in questo caso scomporre la struttura per facilitare questo processo di calcolo per arrivare ad una soluzione soddisfacente.

Al contrario della copertura, sarà necessario analizzare più di un modulo. Infatti, nonostante la balconata risulti regolare in pianta per i primi due livelli, il terzo piano non è presente per tutti i suoi moduli, ma solamente in corrispondenza delle facciate Nord e Ovest. Per questo motivo, si è deciso di analizzare i quattro moduli che ricoprono l'altezza dei tre piani, che risultano i più sfavorevoli.

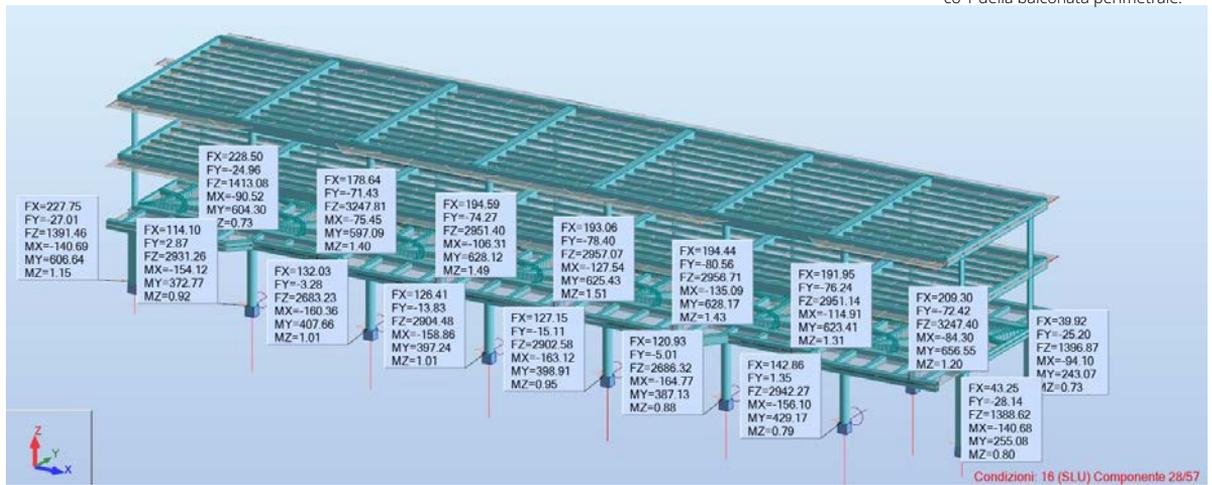
Per poter analizzare il caso più sfavorevole si è deciso di imporre il Nord come direzione prevalente del vento, non essendo presente a Torino nessuna indicazione riguardo alla direzione prevalente dei venti ed essendo l'edificio libero da qualsiasi ostruzione in tutte le sue direzioni.

Per questo motivo, il primo modulo non sarà soggetto ad azioni causate dal vento proveniente dalla direzione stabilita, mentre per i restanti tre saranno analizzate tutte le condizioni di carico.

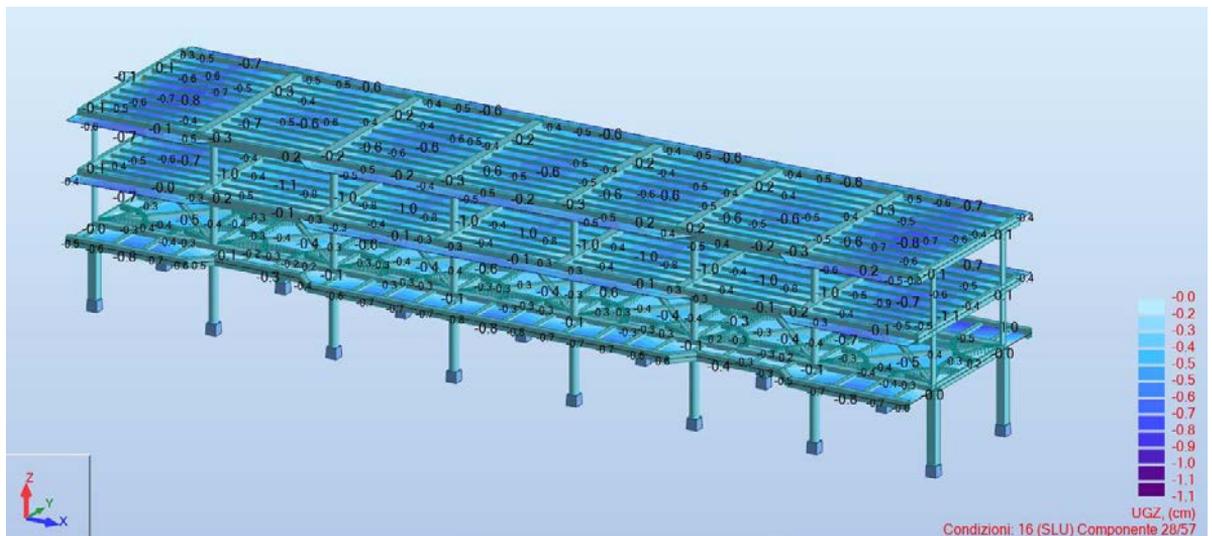
Al termine dell'analisi, possiamo vedere come anche in questo caso essa sia andata a buon fine sia per l'analisi statica sia per quella dinamica, ottenendo, per tutti e quattro i settori analizzati separatamente, la percentuale di massa partecipante necessaria si riesca a raggiungere dall'analisi di cinque modi di vibrare.

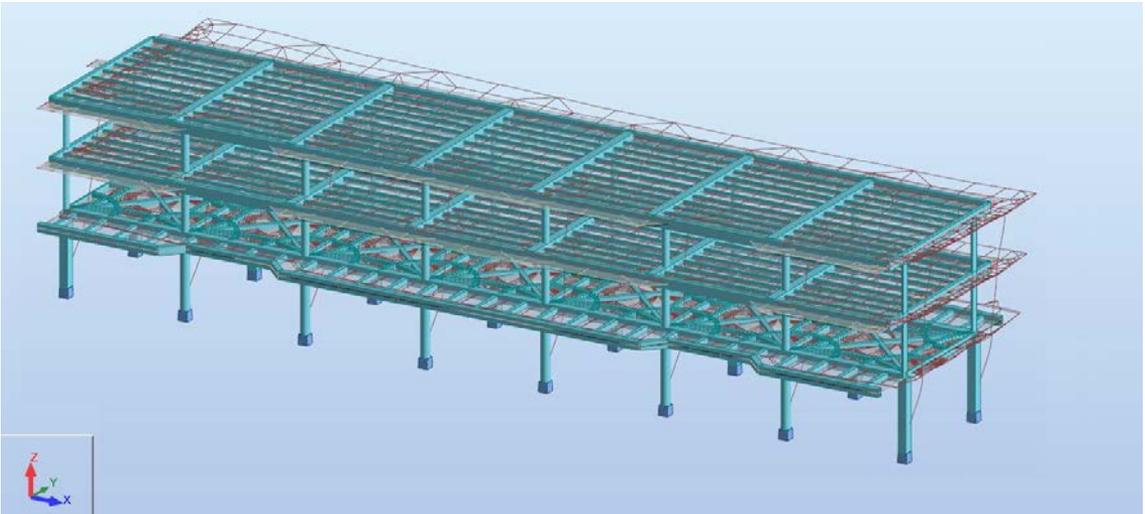
Di seguito possiamo vedere i risultati ottenuti per ogni settore analizzato.

Reazioni vincolari ottenute dal calcolo per la combinazione SLU del blocco 1 della balconata perimetrale.

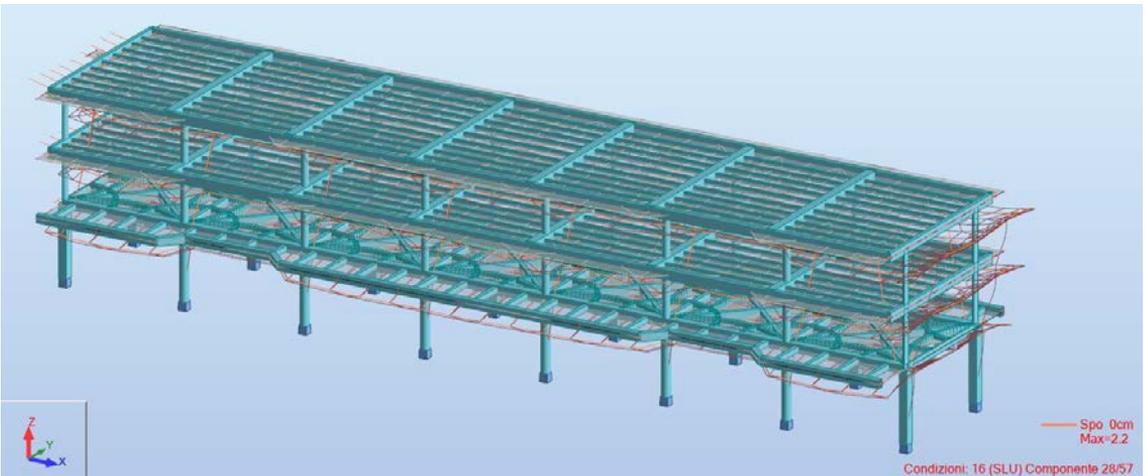


Abbassamento totale (direzione Z) per la combinazione SLU del blocco 1 della balconata perimetrale.

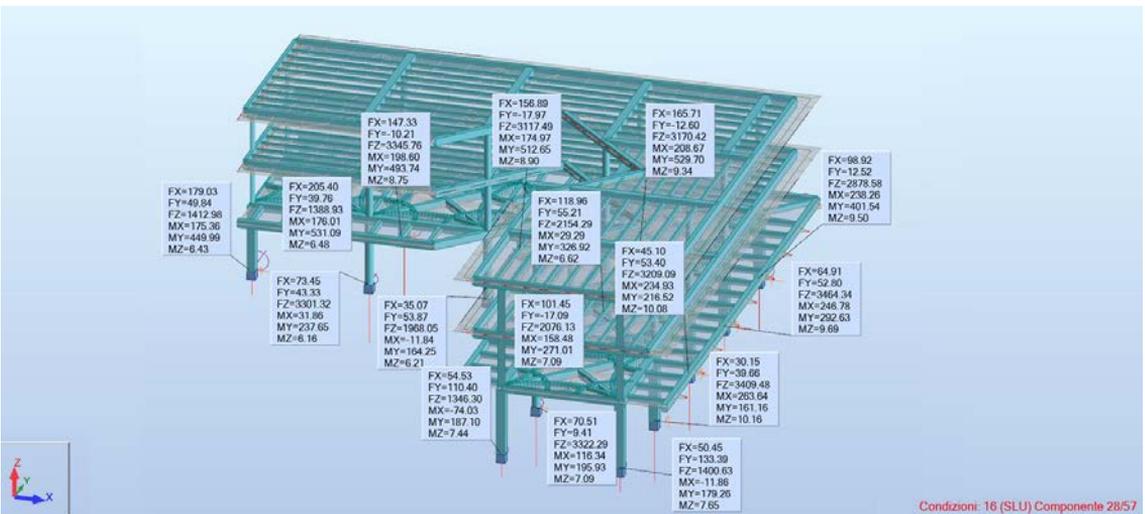




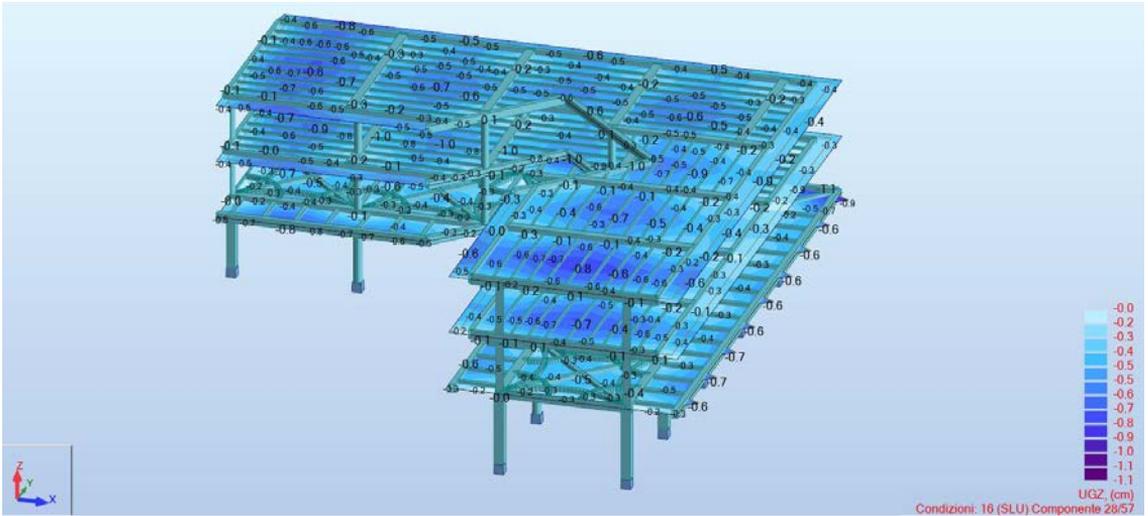
Deformazioni ottenute dall'analisi modale (Combinazione CQC) del blocco 1 della balconata perimetrale.



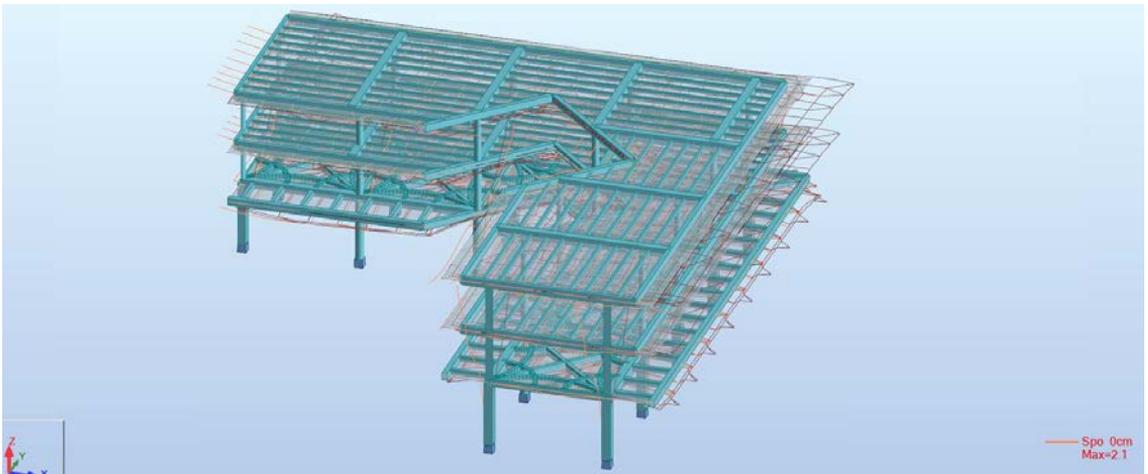
Deformazioni ottenute dal calcolo per la combinazione SLU del blocco 1 della balconata perimetrale.



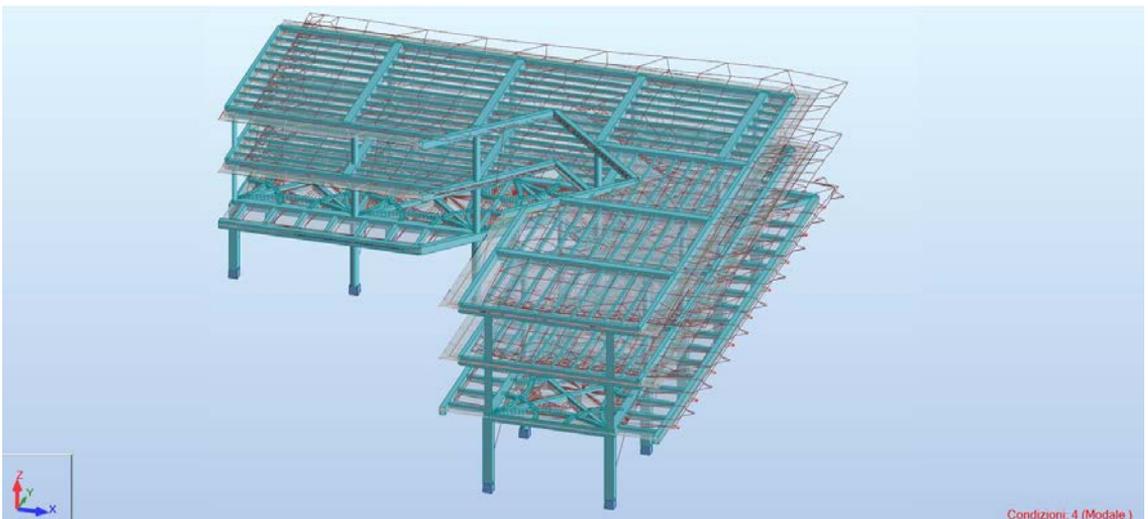
Reazioni vincolari ottenute dal calcolo per la combinazione SLU del blocco 2 della balconata perimetrale.



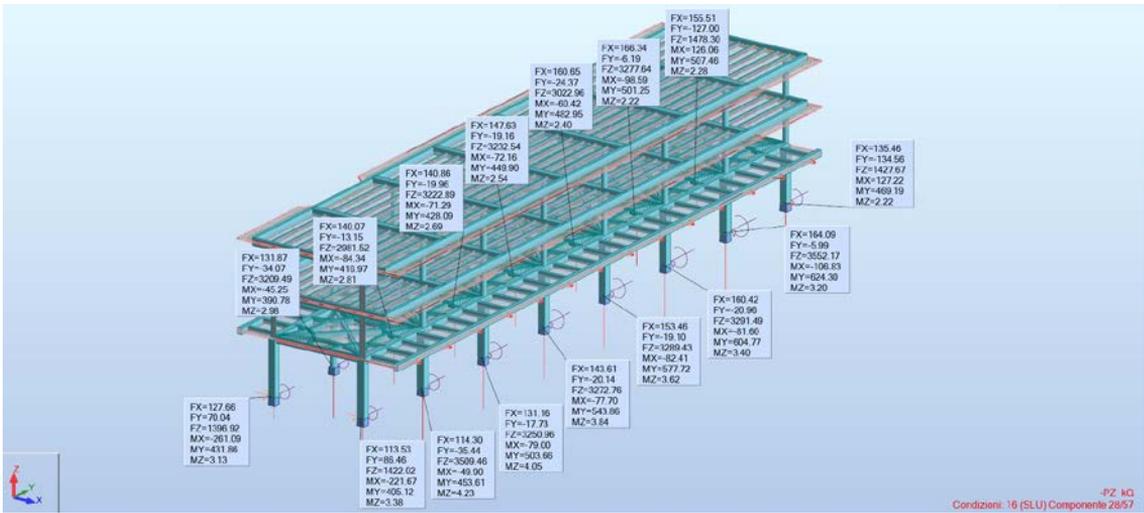
Abbassamento totale (direzione Z) per la combinazione SLU del blocco 2 della balconata perimetrale.



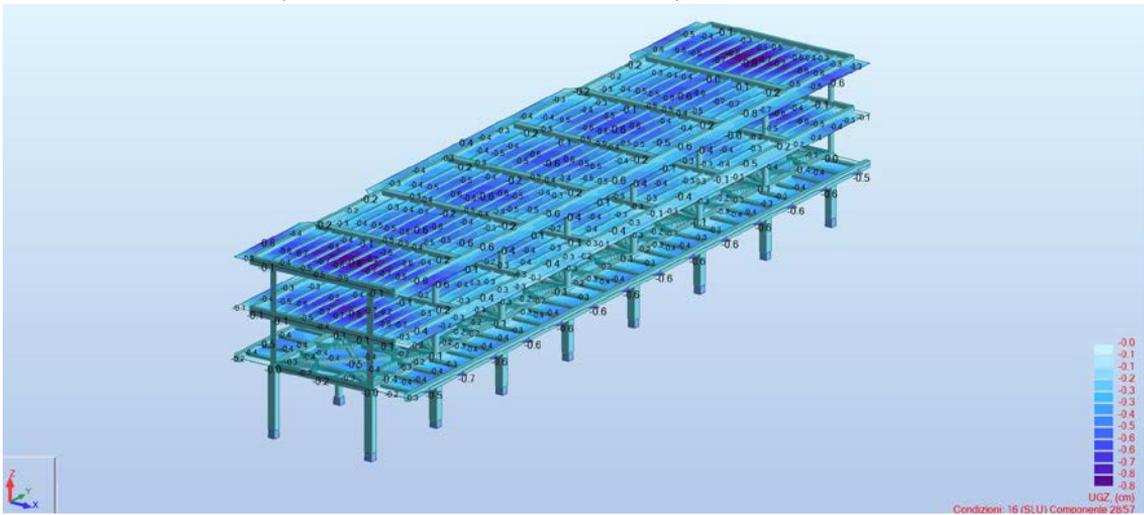
Deformazioni ottenute dal calcolo per la combinazione SLU del blocco 2 della balconata perimetrale.



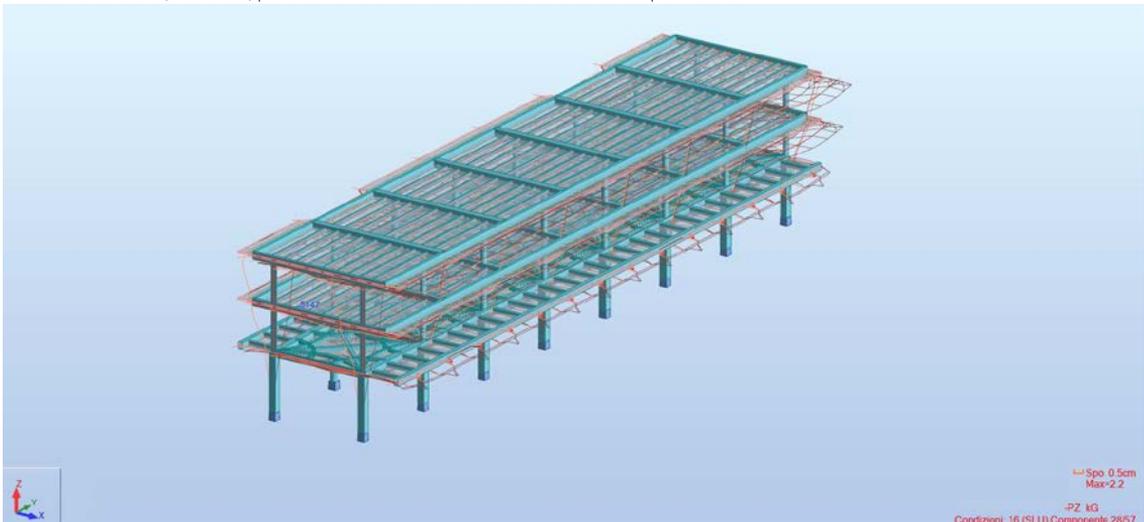
Deformazioni ottenute dall'analisi modale (Combinazione CQC) del blocco 2 della balconata perimetrale.



Reazioni vincolari ottenute dal calcolo per la combinazione SLU del blocco 3 della balconata perimetrale.



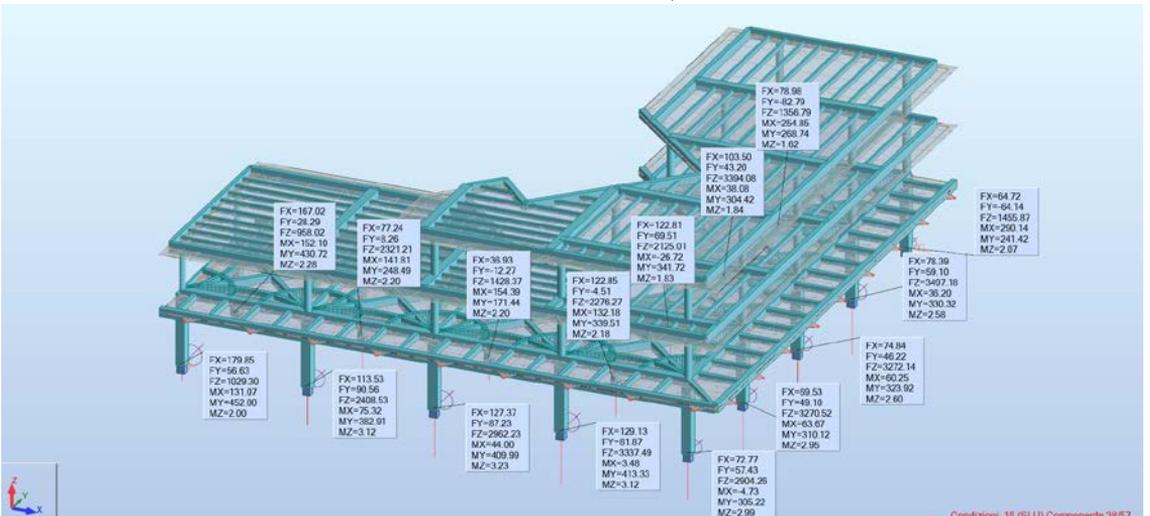
Abbassamento totale (direzione Z) per la combinazione SLU del blocco 3 della balconata perimetrale.



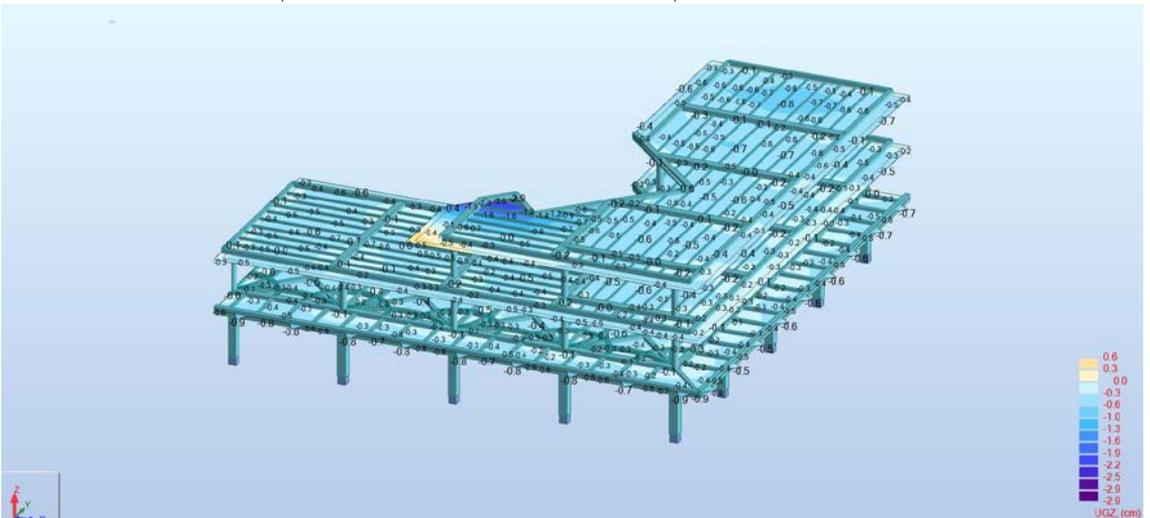
Deformazioni ottenute dal calcolo per la combinazione SLU del blocco 3 della balconata perimetrale.



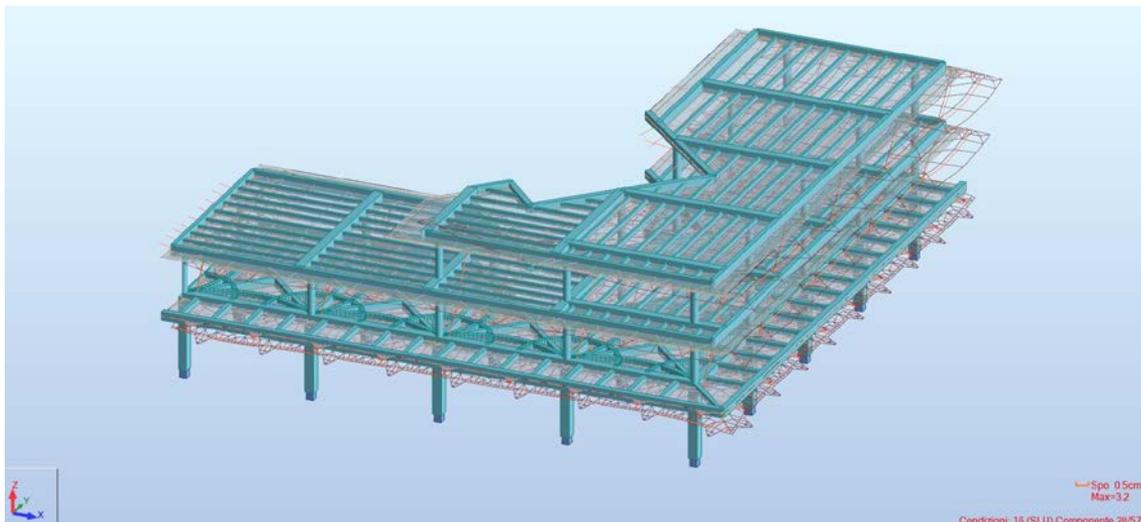
Deformazioni ottenute dall'analisi modale (Combinazione CQC) del blocco 3 della balconata perimetrale.



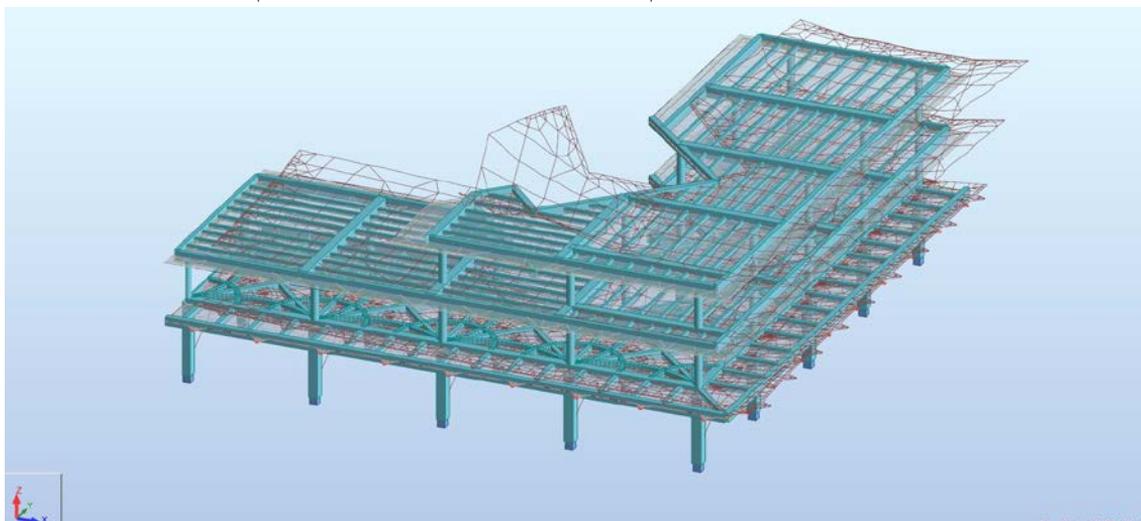
Reazioni vincolari ottenute dal calcolo per la combinazione SLU del blocco 4 della balconata perimetrale.



Abbassamento totale (direzione Z) per la combinazione SLU del blocco 4 della balconata perimetrale.

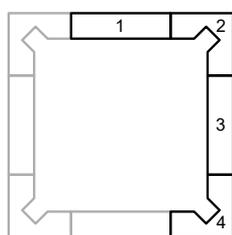


Deformazioni ottenute dal calcolo per la combinazione SLU del blocco 4 della balconata perimetrale.



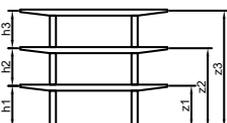
Deformazioni ottenute dall'analisi modale (Combinazione CQC) del blocco 4 della balconata perimetrale.

Confronto Vento e Sisma agenti sulla balconata



Anche in questo caso, si è deciso di effettuare il confronto tra le azioni causate dal vento e le azioni sismiche agenti sulla balconata.

A differenza della copertura, dove entrambe le componenti agivano sullo stesso livello, nel caso della balconata le risultanti delle azioni agiscono su livelli differenti. Infatti, mentre le azioni del vento vengono scaricate dalla facciata sul solaio del primo piano, le azioni sismiche hanno effetto su tutti e tre i livelli. Ciò comporta che nel caso della balconata il confronto non può essere effettuato solamente in termini di risultanti e sarà quindi necessario andare ad analizzare, per ogni blocco, il taglio e il momento generati in fondazione per entrambe le condizioni di carico.



Dalle analisi effettuate sui singoli blocchi risultano agenti i seguenti tagli e momenti derivanti dalle componenti del vento e sismiche:

Blocco balconata 1:

Date le seguenti azioni presenti per ogni piano, risultano taglio e momento pari a:

Per le azioni causate da vento:

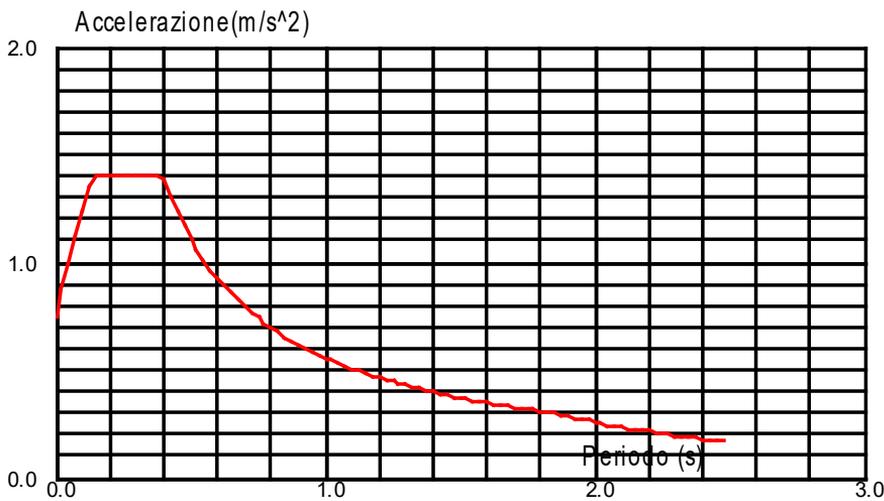
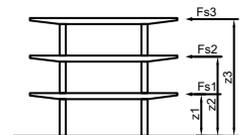
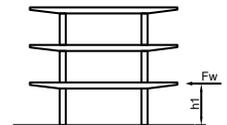
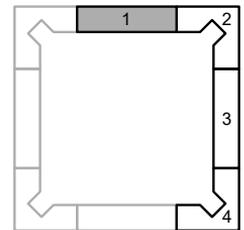
$$F_w = 0 \text{ kN} \quad V_w = 0 \text{ kNm} \quad M_w = 0 \text{ kN}$$

Per le azioni causate dal sisma:

$$F_{s,1} = 708,28 \text{ kN} \quad F_{s,2} = 405,39 \text{ kN} \quad F_{s,3} = 1378,79 \text{ kN}$$

$$V_S = F_{s,1} + F_{s,2} + F_{s,3} = 2492,46 \text{ kN}$$

$$M_S = F_{s,1} \times z_1 + F_{s,2} \times z_2 + F_{s,3} \times z_3 = 27635,08 \text{ kNm}$$



Spettro dei modi di vibrare ottenuto dal calcolo delle azioni sismiche orizzontali (coefficiente q=1,5) relativo al blocco 1 della balconata perimetrale

Blocco balconata 2:

Date le seguenti azioni presenti per ogni piano, risultano taglio e momento pari a:

Per le azioni causate dal vento:

$$F_w = -340,11 \text{ kN}$$

$$V_w = F_w = -340,11 \text{ kN}$$

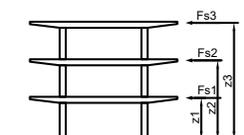
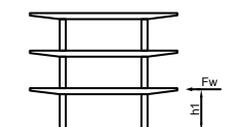
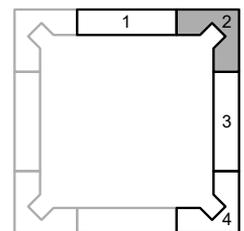
$$M_w = F_w \times h_1 = -1785,58 \text{ kNm}$$

Per le azioni causate dal sisma:

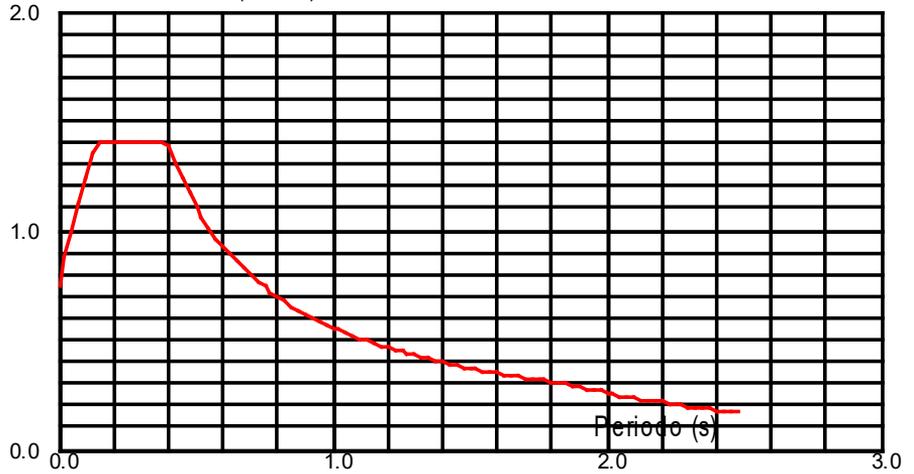
$$F_{s,1} = 578,80 \text{ kN} \quad F_{s,2} = 470,54 \text{ kN} \quad F_{s,3} = 1246,44 \text{ kN}$$

$$V_S = F_{s,1} + F_{s,2} + F_{s,3} = 2492,46 \text{ kN}$$

$$M_S = F_{s,1} \times z_1 + F_{s,2} \times z_2 + F_{s,3} \times z_3 = 25684,58 \text{ kNm}$$

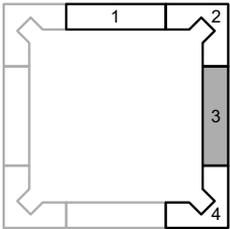


Accelerazione(m/s²)



Spettro dei modi di vibrare ottenuto dal calcolo delle azioni sismiche orizzontali (coefficiente q=1,5) relativo al blocco 2 della balconata perimetrale

Blocco balconata 3:



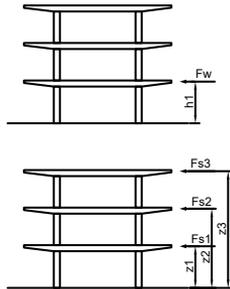
Date le seguenti azioni presenti per ogni piano, risultano taglio e momento pari a:

Per le azioni causate dal vento:

$$F_w = -529,06 \text{ kN}$$

$$V_w = F_w = -529,06 \text{ kN}$$

$$M_w = F_w \times h_1 = -2777,57 \text{ kNm}$$



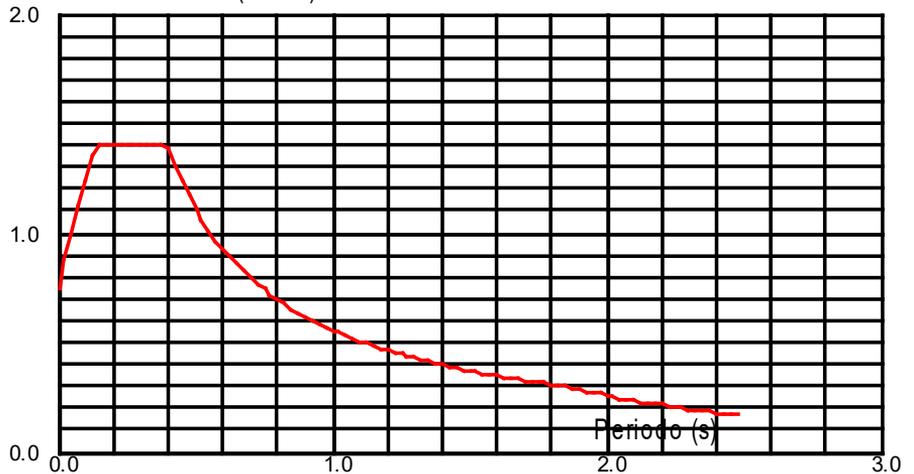
Per le azioni causate dal sisma:

$$F_{s,1} = 630,61 \text{ kN} \quad F_{s,2} = 500,81 \text{ kN} \quad F_{s,3} = 1330,57 \text{ kN}$$

$$V_S = F_{s,1} + F_{s,2} + F_{s,3} = 2461,99 \text{ kN}$$

$$M_S = F_{s,1} \times z_1 + F_{s,2} \times z_2 + F_{s,3} \times z_3 = 27470,42 \text{ kNm}$$

Accelerazione(m/s²)



Spettro dei modi di vibrare ottenuto dal calcolo delle azioni sismiche orizzontali (coefficiente q=1,5) relativo al blocco 3 della balconata perimetrale

Blocco balconata 4:

Date le seguenti azioni presenti per ogni piano, risultano taglio e momento pari a:

Per le azioni causate dal vento:

$$F_w = -340,11 \text{ kN}$$

$$V_w = F_w = -340,11 \text{ kN}$$

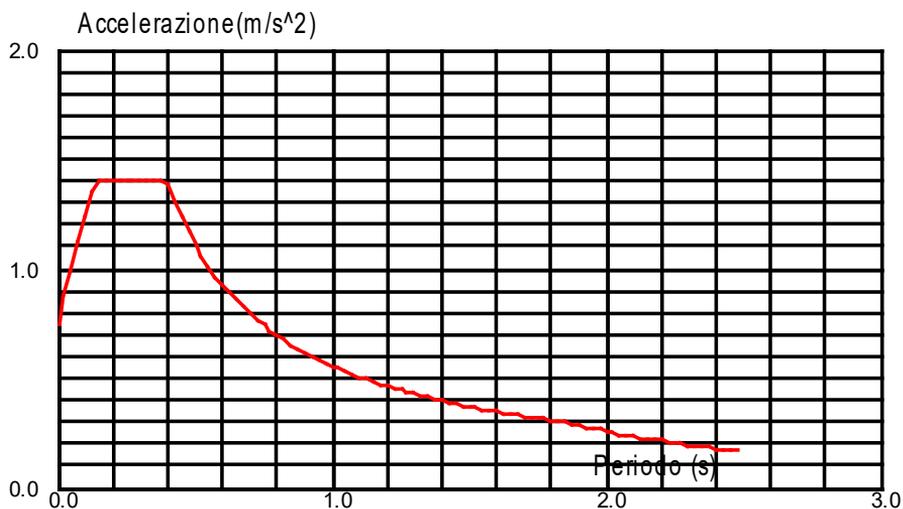
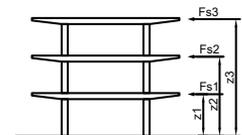
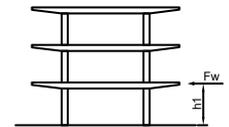
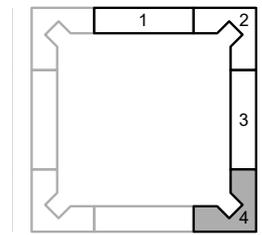
$$M_w = F_w \times h_1 = -1785,58 \text{ kNm}$$

Per le azioni causate dal sisma:

$$F_{s,1} = 541,46 \text{ kN} \quad F_{s,2} = 553,39 \text{ kN} \quad F_{s,3} = 987,30 \text{ kN}$$

$$V_s = F_{s,1} + F_{s,2} + F_{s,3} = 2082,15 \text{ kN}$$

$$M_s = F_{s,1} \times z_1 + F_{s,2} \times z_2 + F_{s,3} \times z_3 = 22560,04 \text{ kNm}$$



Spettro dei modi di vibrare ottenuto dal calcolo delle azioni sismiche orizzontali (coefficiente q=1,5) relativo al blocco 4 della balconata perimetrale

Dai risultati ottenuti, possiamo notare come, a differenza della copertura, il taglio e il momento causato dal sisma sono notevolmente maggiori rispetto a quelli causati dall'azione del vento. La causa, come già anticipato, è che l'azione del vento agisce solamente al primo piano e non è proporzionale alla quantità di massa. Al contrario, il sisma agisce su tutti i piani proporzionalmente alla quantità di massa presente.

Al contrario dei pilastri che reggono la copertura, non sono state reperite informazioni relative alle armature presenti nei pilastri della balconata e perciò, è stato impossibile stabilire se la struttura sia in grado di sopportare efficacemente le azioni causate dal sisma.

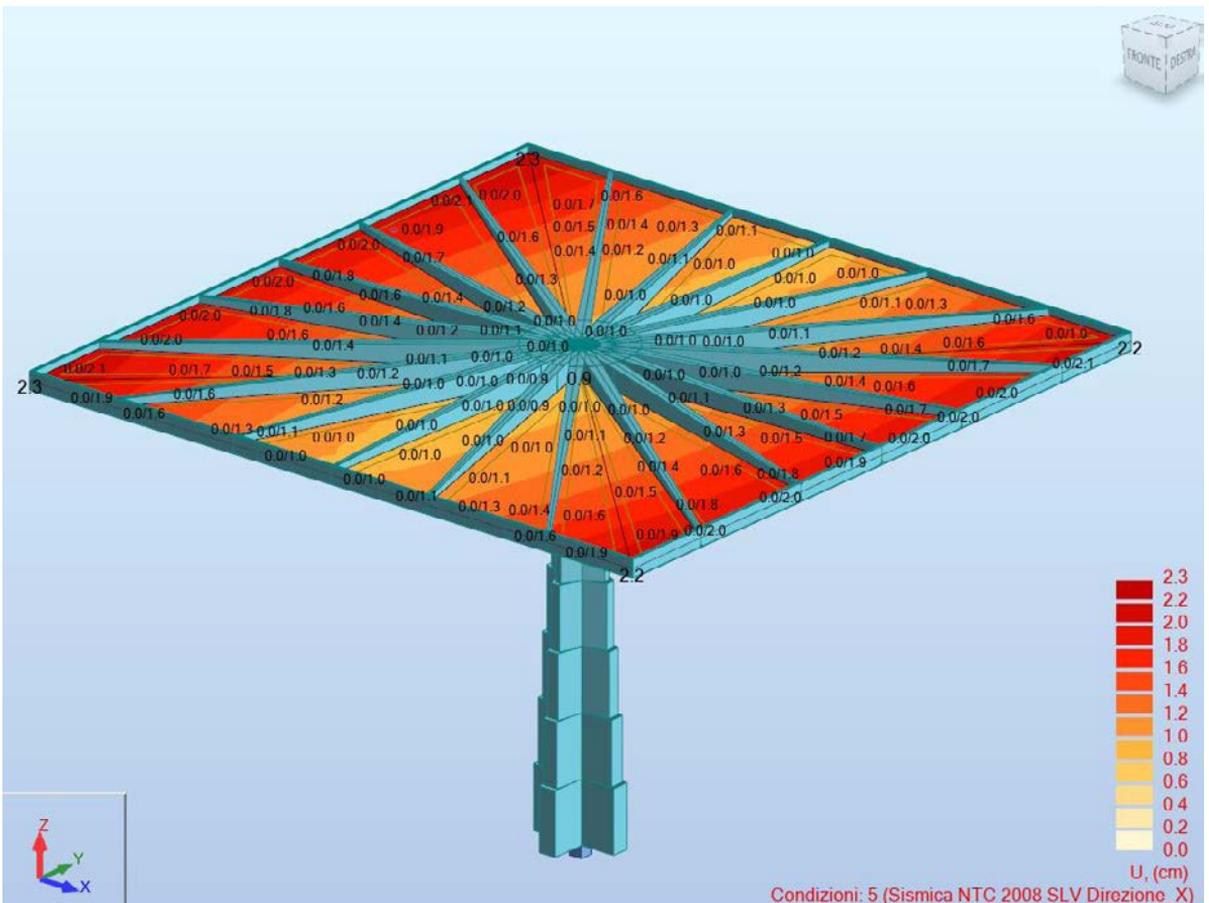
Valutazione effetto martellamento

Un altro fattore da tenere conto a seguito dell'azione sismica è l'effetto martellamento, ovvero l'urto che può avvenire tra due strutture adiacenti a causa dell'oscillazione degli stessi. È necessario valutare che le dimensioni del giunto siano tali da assorbire la somma degli spostamenti massimi che le due strutture subiscono a causa dell'azione sismica. Sarà necessario quindi analizzare gli spostamenti massimi che subiscono le strutture che compongono la copertura e la balconata.

Di seguito possiamo vedere gli spostamenti massimi che subiscono gli elementi della copertura nelle tre direzioni:

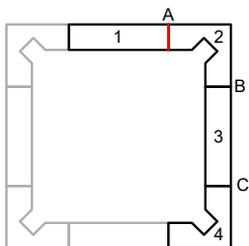
Come si può notare, gli spostamenti massimi ottenuti a seguito dell'azione sismica sono di 2,3 cm, che risultano simili a quelli ottenuti dalle azioni del vento.

Spostamenti causati dal sisma in direzione X sul fungo singolo.



La stessa analisi è stata eseguita sui blocchi che compongono la balconata. A differenza della copertura, sarà necessario calcolare lo spostamento massimo totale relativo tra i blocchi adiacenti per ogni piano. Per facilitare questa analisi, è stato utile nominare i giunti nel seguente modo:

Giunto A:



Piano primo:

$$U_{x,1} = 0,8 \text{ cm}$$

$$U_{x,2} = 0,8 \text{ cm}$$

$$U_{x,1} + U_{x,2} = 0,8 + 0,8 = 1,6 \text{ cm}$$

Piano secondo:

$$U_{x,1} = 2,1 \text{ cm}$$

$$U_{x,2} = 2,2 \text{ cm}$$

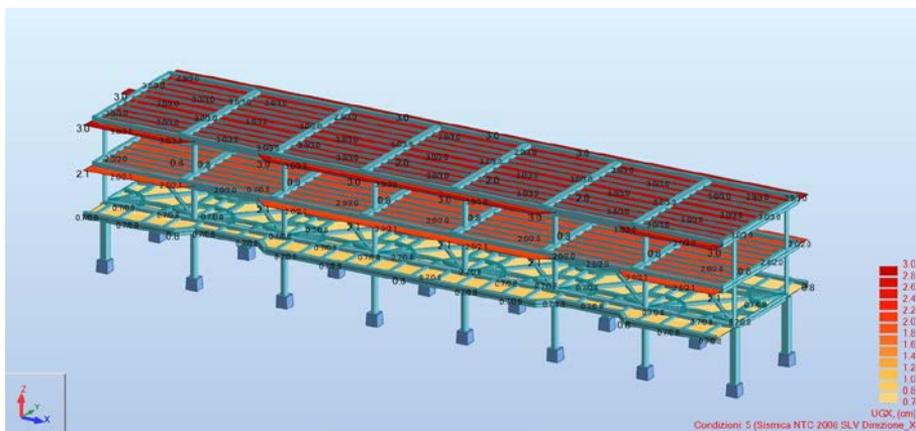
$$U_{x,1} + U_{x,2} = 2,1 + 2,2 = 4,3 \text{ cm}$$

Piano terzo:

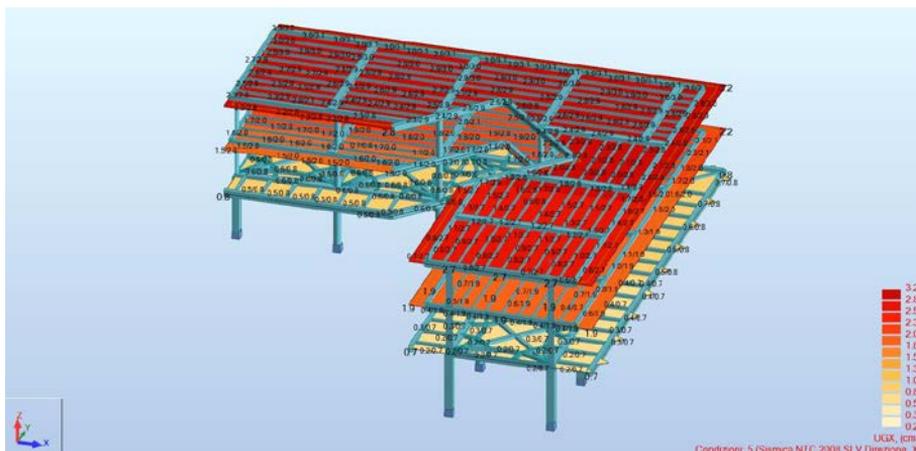
$$U_{x,1} = 3,0 \text{ cm}$$

$$U_{x,2} = 3,2 \text{ cm}$$

$$U_{x,1} + U_{x,2} = 3,0 + 3,2 = 6,2 \text{ cm}$$



Spostamenti causati dal sisma in direzione X sul blocco 1 della balconata perimetrale.



Giunto B:

Piano primo:

$$U_{y,2} = 0,8 \text{ cm}$$

$$U_{y,3} = 0,8 \text{ cm}$$

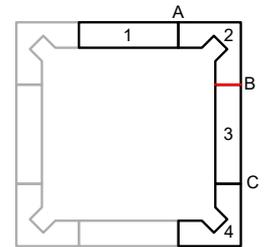
$$U_{y,2} + U_{y,3} = 0,8 + 0,8 = 1,6 \text{ cm}$$

Piano secondo:

$$U_{y,2} = 2,1 \text{ cm}$$

$$U_{y,3} = 2,0 \text{ cm}$$

$$U_{y,2} + U_{y,3} = 2,1 + 2,0 = 4,1 \text{ cm}$$

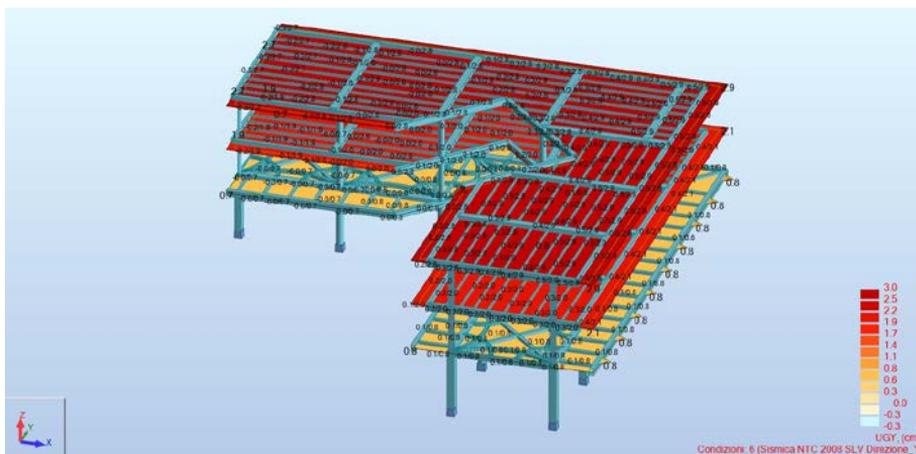


Piano terzo:

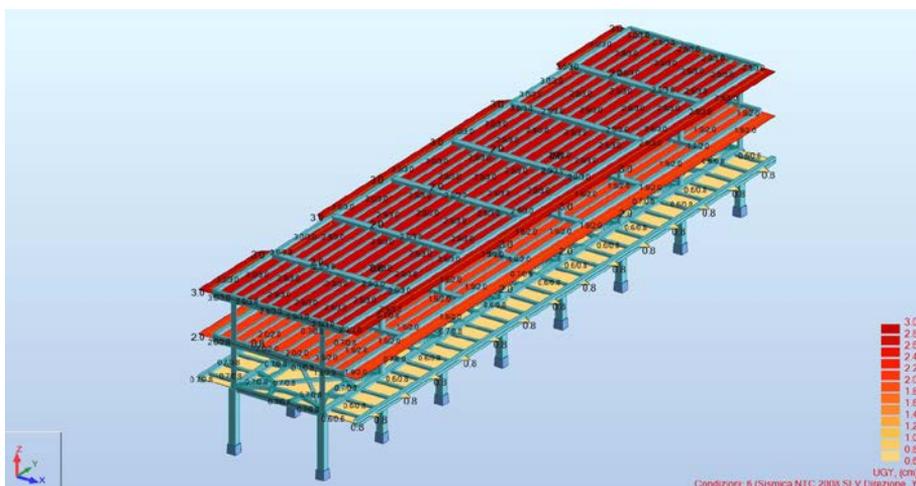
$$U_{y,2} = 2,9 \text{ cm}$$

$$U_{y,3} = 3,0 \text{ cm}$$

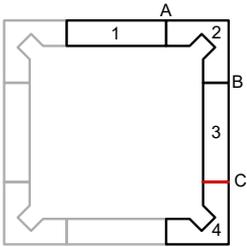
$$U_{y,2} + U_{y,3} = 2,9 + 3,0 = 5,9 \text{ cm}$$



Spostamenti causati dal sisma in direzione Y sul blocco 2 della balconata perimetrale.



Spostamenti causati dal sisma in direzione Y sul blocco 3 della balconata perimetrale.



Giunto C:

Piano primo:

$$U_{y,3} = 0,8 \text{ cm}$$

$$U_{y,4} = 0,7 \text{ cm}$$

$$U_{y,3} + U_{y,4} = 0,8 + 0,7 = 1,5 \text{ cm}$$

Piano secondo:

$$U_{y,3} = 2,0 \text{ cm}$$

$$U_{y,4} = 2,0 \text{ cm}$$

$$U_{y,3} + U_{y,4} = 2,0 + 2,0 = 4,0 \text{ cm}$$

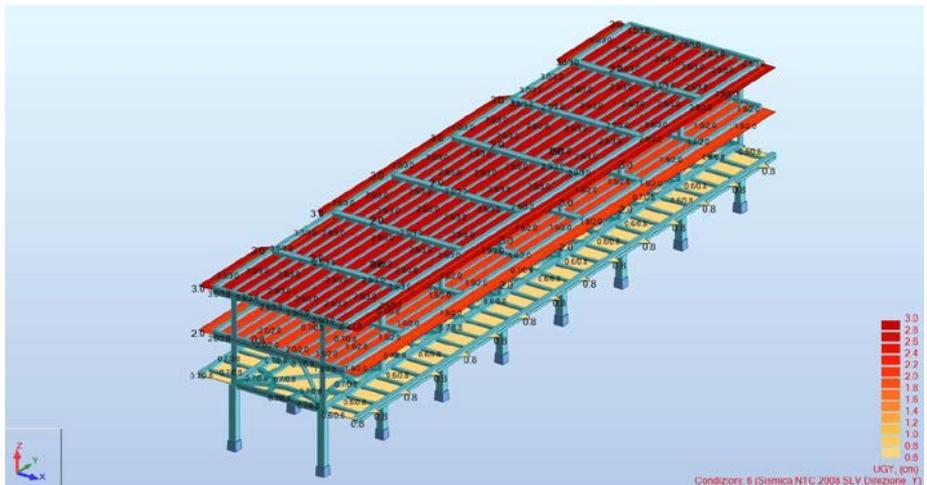
Piano terzo:

$$U_{y,3} = 3,0 \text{ cm}$$

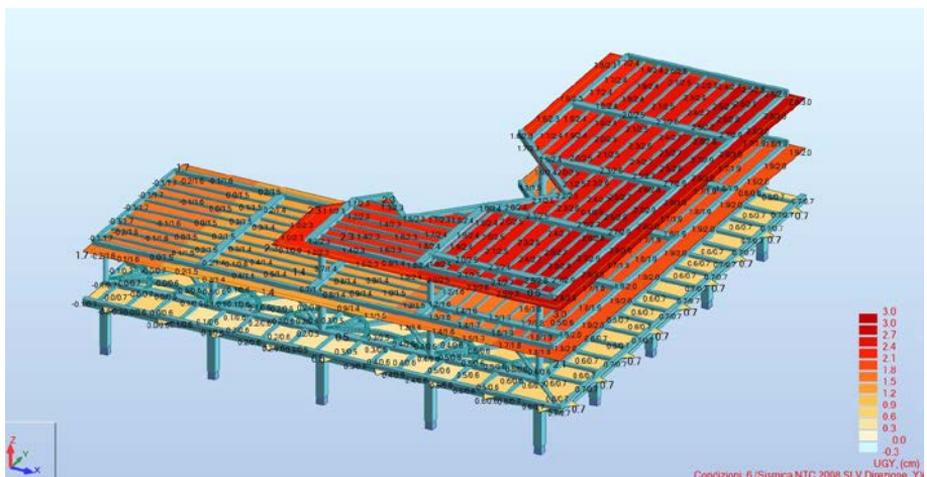
$$U_{y,4} = 3,0 \text{ cm}$$

$$U_{y,3} + U_{y,4} = 3,0 + 3,0 = 6,0 \text{ cm}$$

Spostamenti causati dal sisma in direzione Y sul blocco 3 della balconata perimetrale.



Spostamenti causati dal sisma in direzione Y sul blocco 4 della balconata perimetrale.



Non essendo stato possibile verificare la dimensione dei giunti, a causa della mancata reperibilità delle informazioni sulla costruzione della balconata e dell'impossibilità di accedervi per ragioni di sicurezza, non è possibile stabilire con certezza se i giunti esistenti riescano a sopperire agli spostamenti massimi ottenuti.

CONCLUSIONI

Oggigiorno all'interno dell'ambiente accademico si promuovono sempre più workflow basati sull'interoperabilità di molteplici software. In questo flusso di lavoro, le informazioni di diverse discipline sono contenute all'interno di modelli di tipologia BIM, dai quali i diversi professionisti attingono e aggiornano le informazioni presenti a seconda delle necessità.

Nonostante ciò, il divario con il mondo lavorativo è evidente, soprattutto in ambito italiano, dove, solo ultimamente, gli studi (normalmente piccolissime realtà) si stanno faticosamente avvicinando a questa metodologia di lavoro. Una delle principali cause di questo divario tra i due ambiti è rappresentata dal lento aggiornamento della tipologia di elaborati richiesti dall'amministrazione pubblica, che, solamente nell'ultimo anno, ha iniziato a richiedere il modello BIM oltre agli elaborati grafici. Sarà quindi indispensabile capire come sfruttare al meglio le potenzialità del Building Information Modeling per tutti gli ambiti di progetto.

In questo lavoro si vuole analizzare, con i mezzi attualmente disponibili, quanto il Building Information Modeling possa portare beneficio ad uno degli ambiti fondamentali della progettazione, ovvero l'analisi strutturale. Si è pertanto studiato uno dei possibili workflow per l'interoperabilità tra due ambienti digitali differenti solitamente utilizzato sulla costruzione ex novo e di applicarlo all'analisi di una struttura esistente. Il Palazzo del Lavoro, una delle opere moderne che grazie alle sue peculiarità meglio rappresenta il dialogo tra struttura e architettura, ha fornito l'occasione di poter sperimentare questa metodologia su una struttura già esistente. Questa Architettura, apparentemente semplice data la sua regolarità, presenta specifiche componenti molto complesse, come ad esempio il solaio nervato della balconata.

Nella prima fase di lavoro, è stato necessario modellare l'edificio esistente in ambiente BIM, basandosi principalmente su fonti bibliografiche come tavole di progetto e fotografie d'archivio, questo a causa dell'impossibilità, per ragioni di sicurezza, di accedere a tutte le aree della struttura. Nonostante queste difficoltà iniziali, è stato possibile modellare efficacemente ogni componente necessario alla costruzione del modello completo dell'edificio. Particolare attenzione è stata spesa nell'assegnare le informazioni relative ai materiali che caratterizzano le componenti edilizie e alla generazione del modello analitico, ovvero la sezione del modello che contiene tutte le informazioni geometriche necessarie all'analisi strutturale.

Una volta ottenuto il modello analitico, questo necessita quasi sempre di correzioni e affinamenti. Questa procedura è necessaria affinché il modello utilizzato in fase di calcolo reagisca correttamente alle procedure a cui verrà sottoposto.

La seconda fase è quella relativa al trasferimento dei dati dall'ambiente BIM all'ambiente di calcolo FEM. Il concetto "ideale" dell'interoperabilità prevede che in questa fase tutte le geometrie necessarie, informate precedentemente, vengano trasferite correttamente senza alcuna perdita di informazioni.

Per questo lavoro di tesi sono stati utilizzati due software provenienti dalla stessa casa produttrice. In queste condizioni si immagina una compatibilità completa. Inoltre, grazie alla presenza di un componente aggiuntivo che permette di inviare e aggiornare il modello

premendo un solo tasto, le premesse erano promettenti.

Nonostante ciò, durante la verifica dei dati trasferiti sono state riscontrate alcune criticità. Una di queste, forse la più importante, è la perdita di informazioni che caratterizzano la geometria relativa ad alcuni elementi del modello, rappresentanti la struttura e la copertura. Una delle geometrie che in particolar modo non è stato possibile importare correttamente era quella del pilastro a sezione variabile, impendendo di conseguenza il trasferimento delle informazioni riguardante l'armatura. Infatti, non è stato possibile, all'interno del software di analisi, assegnare ai pilastri in calcestruzzo delle sezioni variabili non solo nelle dimensioni ma anche nella geometria, rendendo necessario attuare modifiche sul modello importato.

Nella terza fase, ovvero quella di calcolo, è stata analizzata la struttura per valutare se essa è ancora in grado di soddisfare i requisiti imposti dalla normativa vigente. Una volta terminata la fase di calcolo, è stato possibile confrontare i risultati ottenuti con quelli di progetto eseguiti da Nervi e con quelli ottenibili mediante un calcolo manuale ai sensi delle Norme attuali per valutare la correttezza del modello.

Durante l'ultima fase di lavoro è stato eseguito un confronto tra le azioni causate dal vento e quelle sismiche. L'accostamento dei due risultati ha permesso di verificare se la struttura risulti ancora idonea a soddisfare i requisiti minimi per la sicurezza in caso di evento sismico, nonostante questa caratteristica non fosse prevista in fase di progetto.

Da questo confronto, è possibile affermare che la struttura a fungo che regge la copertura soddisfa i requisiti richiesti dalla normativa applicabili agli edifici esistenti. Per quanto riguarda la struttura della balconata perimetrale non è stato possibile effettuare le stesse verifiche sulla sua resistenza poiché non si dispone delle tavole di armatura del progetto originale. Dal semplice confronto tra le azioni orizzontali previste dalle Norme tecniche vigenti all'epoca di costruzione, essenzialmente dovute al vento, e le azioni orizzontali previste dalle Norme oggi vigenti, comprendenti anche il sisma, queste ultime risultano assai più severe delle prime, al punto da lasciar presumere una possibile carenza sismica delle strutture esistenti. Il calcolo della risposta sismica degli stessi edifici ne evidenzia inoltre l'insufficiente ampiezza dei giunti strutturali, inadeguati a prevenire il martellamento sotto l'effetto del sisma di progetto.

In conclusione, dal lavoro svolto, è possibile riscontrare come i modelli BIM ed i modelli meccanici utilizzati nel calcolo strutturale nascano da due concezioni e scopi differenti. Mentre nel caso dei modelli BIM è necessario rappresentare il più accuratamente possibile l'edificio preso in analisi e inserire il maggior numero di informazioni utili, i modelli utilizzati dall'analisi agli elementi finiti non richiedono un alto livello di accuratezza. Al contrario, spesso è necessario semplificare il modello rappresentato per poterne capire il solo comportamento in seguito ad azioni esterne che interagiscono con la struttura.

Nonostante ciò, è possibile affermare che una grande quantità di dati, compresi i carichi applicati alla struttura, è stata trasferita correttamente e le analisi strutturali eseguite sui modelli trasferiti non risentono in alcun modo della provenienza dei dati analizzati. Perciò, il workflow di lavoro esposto può snellire, in molti casi, il tradizionale flusso di lavoro, nonostante siano presenti problematiche che possono, nel tempo, essere suscettibili di ulteriori

migliorie e affinamenti.

BIBLIOGRAFIA

(2008). Norme Tecniche delle Costruzioni.

Buscioni, M. (1990). *Esposizioni e "Stile nazionale" 1861-1925*. Firenze: Alina.

Calvano, M. (2019). *Disegno digitale esplicito. Rappresentazioni responsive responsive dell'architettura e della città*. Roma: Aracne.

cap. 3.3, Azioni del vento. (2008). In *NTC*.

cap. 3.3.8 - Coefficiente dinamico. (2008). In *NTC*.

cap. 3.4, Azioni della neve. (2008). In *NTC*.

cap. 3.4.3, Coefficiente di esposizione. (2008). In *NTC*.

Comitato nazionale per la celebrazione del primo centenario dell'Unità d'Italia. (1961). *La celebrazione del primo centenario dell'Unità d'Italia*. Torino.

Dimas, E., & Briassoulis, D. (1999). 3D geometric modelling based on NURBS: A review. *Advances in Engineering Software*, 741-751.

Duff, T. (1992). Interval arithmetic recursive subdivision for implicit functions and constructive solid geometry. *ACM SIGGRAPH computer graphics*.

Eastman, C. (1974). An Outline of the Building Description System. *Research Report No.50*.

Eastman, C. (1975). The use of computers instead of drawings in building design. *AIA Journal*, 46-50.

Fofi, G. (1964). *L'immigrazione meridionale*. Milano: Feltrinelli.

Kiviniemi, A. (2012). Where BIM goes; challenges and promises for the AEC industry. *Il Building Information Modelling: come sta cambiando l'industria delle costruzioni*. Torino.

MacLeamy, P. (2004). Collaboration, integrated information and the project lifecycle. *The Construction Users Roundtable*.

Meossi, M. (2007). *Info-Architecture. L'architettura performativa dell'età dell'informazione*. Saonara: Il Prato.

Mostra delle regioni. (1961). In *Catalogo guida*. Torino.

Nervi, P. (1954). *Costruire correttamente*. Milano: Hoepli.

Nervi, P. L. (2011). *Torino, la committenza industriale, le culture architettoniche e politiche italiane*. (S. Pace, A cura di) Cinisello Balsamo - Bruxelles: Silvana editoriale - PLN Project.

- Osello, A., Provisiero, G., Sirago, V., Pavan, A., Levin, E., Vinci, R., & Osegna, F. (2012). *Il BIM, nuove opportunità per l'industria delle costruzioni. Il Building Information Modeling: come sta cambiando l'industria delle costruzioni?* Torino.
- Pace, S., Chiorino, C., & Rosso, M. (2005). *Italia '61 la nazione in scena. Identità e miti nelle celebrazioni per il centenario dell'Unità d'Italia*. Torino: Umberto Allemandi & C.
- Rugarli, P. (2003). *Calcolo strutturale con gli elementi finiti, una spiegazione di base del metodo degli elementi finiti applicato all'ingegneria strutturale*. Roma: EPC LIBRI.
- UNI 11337-7. (2018).
- Wooyoung, J., & Ghan, L. (2015). The Status of BIM Adoption on Six Continents. *International journal of civil, environmental, structural, construction and architectural engineering*, 444-448.
- Zevi, B. (1971). *Cronache di architettura*. Bari: Laterza.

SITOGRAFIA

- Atlas of Places*. (s.d.). Consultato in Dicembre 2019 da <https://www.atlasofplaces.com/architecture/palazzo-del-lavoro/>
- Autodesk. (2019). *Autodesk Revit 2019, creazione di un'unione*. Consultato in Aprile 2019 da <https://help.autodesk.com/view/RVT/2019/ITA/?guid=GUID-674E9A83-9743-4470-BB3E-A05E3DEA23A7>
- Museo TORINO*. (s.d.). Consultato in Novembre 2019 da <http://www.museo-torino.it/view/s/21876f77e7bb4b4dad8df5ab55882de4>

ALLEGATI

INGG. NERVI & BARTOLI

ANONIMA PER COSTRUZIONI - CAPITALE L. 3.000.000

ROMA

LUNGOTEVERE MARZIO, 3 - TELEF. 561.261 - 561.333

CALCOLI STATICI

LAVORO:

PALAZZO DEL LAVORO - TORINO

CALCOLI STATICI DELLE STRUTTURE

IN C.A.

PROG. N. 4558

CALCOLI

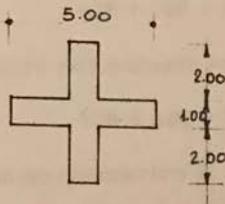
Roma,

5 Marzo

1960

PALAZZO DEL LAVORO = TORINOFILASTRONI PRINCIPALISEZIONE ALLA SOMMITA'

$$\pi \frac{2,50^2}{4} = 4,90 \text{ mq.}$$

Sezione alla base :

$$2 \times 5,00 \times 1,00 - 1,00 \times 1,00 = 9,00 \text{ mq.}$$

Sezione media :

$$\frac{4,90 + 9,00}{2} = 7,00 \text{ mq.}$$

Peso proprio su una altezza di m. 20,50

$$7,00 \times 20,50 \times 2.500 = 360 \text{ T.}$$

Per i pilastri adiacenti allo scantinato e perciò fondati a q. inferiore, si ha in più un peso proprio di :

$$9,00 \times 5,20 \times 2,5 = 118 \text{ T.}$$

Peso plinto e riempimento per pilastri alti :

$$13,60 \times 2,40 \times 1,50 \times 2.500 + \\ + (32,60 - 9,00) \times 0,50 \times 1.600 = 123 + 17 = 140 \text{ Tonn.}$$

Peso plinto e riempimento per pilastri adiacenti scantinato (tenendo conto degli accessi) :

$$123 + \frac{32,60 - 9,00}{2} \times 5,70 \times 1.600 = 231 \text{ Tonn.}$$

Peso proprio totale pilastri con fondazione alta :

$$360 + 131 = 491 \text{ Tonn.}$$

Peso proprio totale pilastri adiacenti scantinato:

$$360 + 118 + 231 = 709 \text{ Tonn.}$$

Carico permanente della copertura (100 Kg/mq.)

$$40 \times 40 \times 100 = 160 \text{ Tonn.}$$

Carico permanente totale pilastri alti :

$$492 + 160 = 652 \text{ Tonn.}$$

Carico permanente totale pilastri vicino scantinato :

$$709 + 160 = 869 \text{ Tonn.}$$

Con sovraccarico di 150 Kg/mq. si ha un ulteriore contributo di

$$150 \times 1.600 = 240 \text{ Tonn.}$$

E perciò in assenza di azioni dissimmetriche i carichi trasmessi ai pali di fondazione (16 pali Franki \varnothing 500) risultano :

Pilastri alti :

$$\frac{652 + 240}{16} = \frac{892}{16} = 55 \text{ Tonn.}$$

Pilastri fondati a q. superiore :

$$\frac{869 + 240}{16} = \frac{1.109}{16} = 69 \text{ Tonn.}$$

Carichi dissimmetrici.

Per i pilastri centrali (alti o bassi che siano) considereremo un momento flettente massimo convenzionale, quale sarebbe provocato da un sovraccarico di 50 Kg/mq. limitato ad una sola metà della copertura.

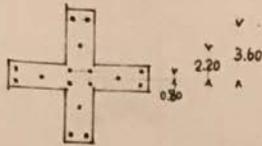
Il carico normale e il momento risultano cioè :

$$M = 10 \times N = 50 \times 40 \times 20 \times 10 = 400.000 \text{ Kgm.} = 400 \text{ Tonn.} \times m$$

Corrispondentemente si hanno da verificare i plinti per una sollecitazione :

$$N = 652 + 40 = 692 \text{ Tonn.}$$

$$M = \quad \quad \quad 400 \text{ Tonn.}$$



Disponendo i pali come in figura, il momento d'inerzia della sezione puntiforme di appoggio risulta :

$$I_x = 4 \times 3,60^2 + 2 \times 2,20^2 + 8 \times 0,80^2 = 66,60 \text{ m}^2$$

E perciò il carico massimo sui pali riesce :

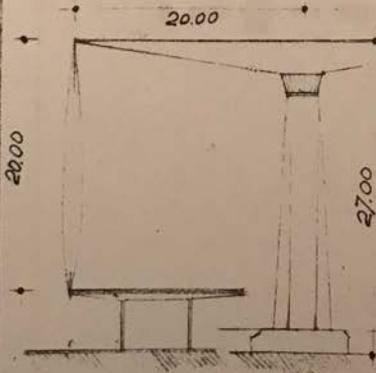
$$N = \frac{909}{16} + \frac{400 \times 3,60}{66,60} = 56 + 21 = 77$$

oppure :

$$N = \frac{692}{16} + \frac{400 \times 3,60}{66,60} = 43 + 21 = 64$$

secondo che si tratti di plinti alti o adiacenti allo scantinato .

Per i pilastri di perimetro considereremo invece il momento dovuto all'azione del vento.



Poichè la superficie investita dal vento è di ben $20 \times 40 = 800 \text{ mq.}$ per ognuno dei pilastri, la pressione del vento può essere globalmente valutata in 50 Kg/mq.

E perciò per ognuno dei pilastri si ha una forza concentrata di :

$$\frac{1}{2} 800 \times 50 = 20.000 \text{ Kg.}$$

alla sommità del pilastro. E perciò un momento rispetto alla base di fondazione di :

$$20 \times 27 = 540 \text{ Tonn. x m.}$$

Di conseguenza il carico massimo sui pali (plinti fondati superficialmente) è :

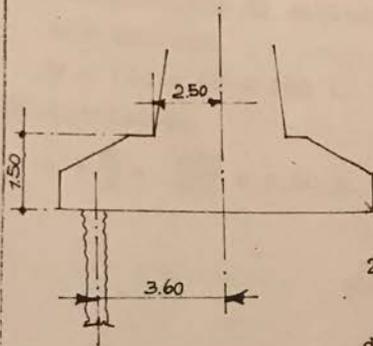
$$N_{\text{max}} = \frac{652}{16} + \frac{540 \times 3,60}{66,60} = 41 + 28 = 69 \text{ T.}$$

anche considerando agente insieme al vento un sovraccarico uniforme di 75 Kg/mq. (120 t. su tutta la copertura) si avrebbe :

$$N = \frac{652 + 120}{16} + \frac{540 \times 3,60}{66,60} = 48 + 28 = 76 \text{ T.}$$

Per il calcolo delle armature metalliche nel plinto considereremo

perciò il carico massimo di 77 T.



Poichè l'altezza del plinto è di m. 1,50 ($d = 1,45$) e poichè il braccio dei pali più caricati è di :

$360 - 2,50 = 1,10$ m., rispetto al filo del pilastro, il corrispondente momento flettente risulta :

$$2 \times 77 \times 1,10 = 166 \text{ Tonn.} = 166.000 \text{ Kgm.}$$

$$d = 0,550 \sqrt{\frac{166.000}{2,40}} = 145$$

$$A_f = \frac{16.600.000}{0,9 \times 145 \times 2.200} = 58 \text{ cmq.}$$

Disponendo 21 $\varnothing 20 = 66 \text{ cmq.}$, la sollecitazione unitaria risulterà di :

$$2.200 \frac{58}{66} = 1.940 \text{ Kg/cmq.}$$

VERIFICA SEZIONE DI SOMMITA' DEL PILASTRO

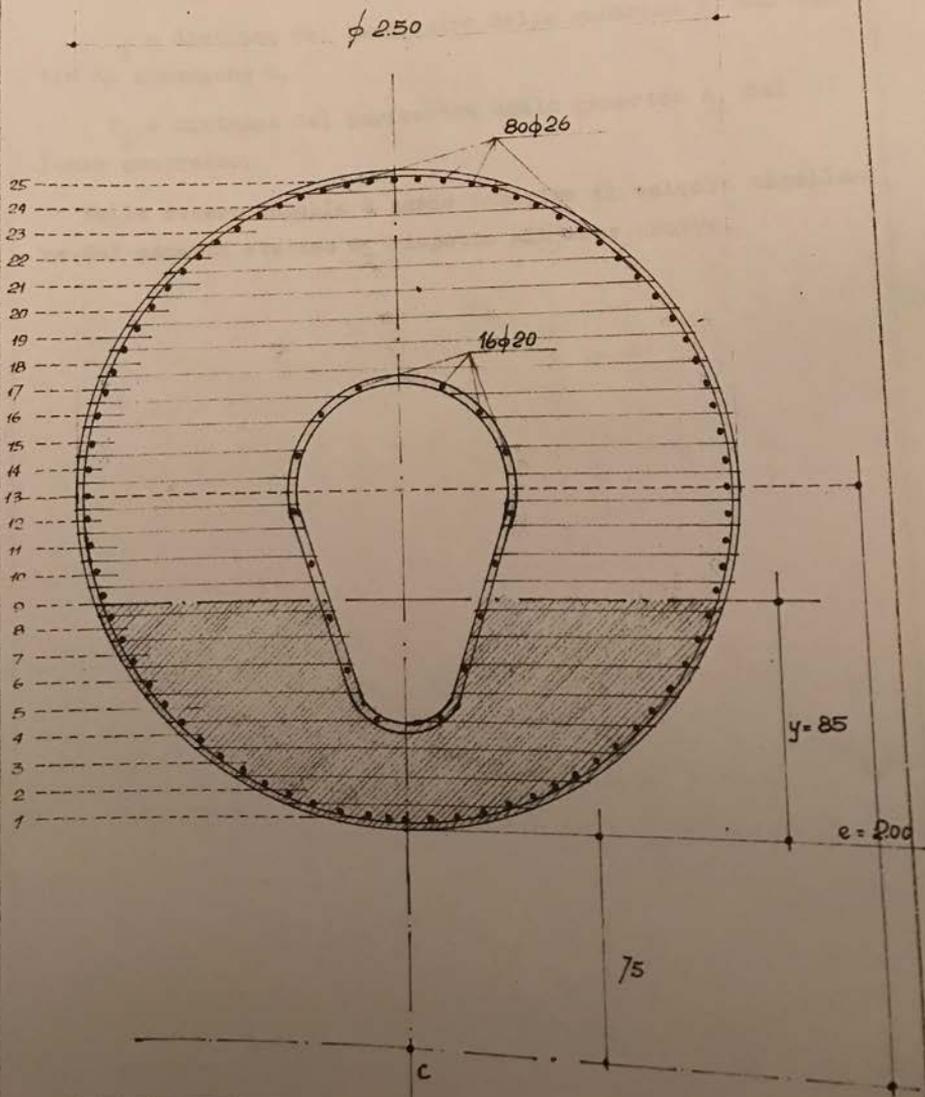
Caratteristiche di sollecitazione:

$$M = 400 \text{ t.m.}$$

$$N = 160 + 40 = 200 \text{ t.}$$

Eccentricità:

$$e = \frac{M}{N} = \frac{400}{200} = 2,00 \text{ m.}$$



Per la sezione circolare di sommità, del diametro di m. 2,50, armata con 80 \emptyset 26 equispaziati anularmente, si è proceduto tabellarmente alla determinazione dell'asse neutro.

La sezione di sommità è stata suddivisa in 25 strisce di 10 cm.

Nella seguente tabella sono riportati i seguenti valori:

A_1 = area della generica striscia di conglomerato oppure area della sola armatura (omogeneizzata) di una striscia.

V_1 = distanza del baricentro della generica A_1 dal centro di pressione C.

Y_1 = distanza del baricentro della generica A_1 dal lembo compresso.

Nella stessa tabella è anche inserito il calcolo tabellare del momento statico S_x rispetto all'asse neutro.

A_i	V_i	$A_i V_i$	Y_i	$A_i V_i Y_i$	$\sum A_i V_i Y_i$	$\sum A_i V_i$	$Y - Y_i$	Δs_x
296	320	94.720	245	23.206.400			160	- 47.360
254	310	78.740	235	18.503.900	41.710.300	173.460	150	- 38.100
170	300	51.000	225	11.475.000	53.185.300	224.460	140	- 23.800
127	290	36.830	215	7.918.450	61.103.750	261.290	130	- 16.510
127	280	35.560	205	7.289.800	68.393.550	296.850	120	- 15.240
85	270	22.950	195	4.475.250	72.868.800	319.800	110	- 9.350
85	260	22.100	185	4.088.500	76.957.300	341.900	100	- 8.500
170	250	42.500	175	7.437.500	84.394.800	384.400	90	- 15.300
135	240	32.400	165	5.346.000	89.740.800	416.800	80	- 10.800
135	230	31.050	155	4.812.750	94.553.550	447.850	70	- 9.450
85	220	18.700	145	2.711.500	97.265.050	466.550	60	- 5.100
135	210	28.350	135	3.827.250	101.092.300	494.900	50	- 6.750
85	200	17.000	125	2.125.000	103.217.300	511.900	40	- 3.400
135	190	25.650	115	2.949.750	106.167.050	537.550	30	- 4.050
85	180	15.300	105	1.606.500	107.773.550	552.850	20	- 1.700
135	170	22.950	95	2.180.250	109.953.800	575.800	10	- 1.350
85	160	13.600	85	1.156.000	111.109.800	589.400	-	0
177	150	26.550	75	1.991.250	113.101.050	615.950	10	+ 1.770

A_1	V_1	$A_1 N_1$	Y_1	$A_1 Y_1 Y_1$	$\sum A_1 V_1 Y_1$	$\sum A_1 V_1$	$Y - Y_1$	ΔS_x
127	140	17.780	65	1.155.700	114.256.750	633.730	20	+ 2.540
135	130	17.550	55	965.250	115.222.000	651.280	30	+ 4.050
135	120	16.200	45	729.000	115.951.000	667.480	40	+ 5.400
170	110	18.700	35	654.500	116.605.500	686.180	50	+ 8.500
170	100	17.000	25	425.000	117.030.500	703.180	60	+ 10.200
254	90	22.860	15	342.900	117.373.400	726.040	70	+ 17.780
296	80	23.680	5	118.400	117.491.800	749.720	80	+ 23.680
600	80	48.000	5	240.000	117.731.800	797.720	80	+ 48.000
1.150	90	103.500	15	1.552.500	119.284.300	901.220	70	+ 80.500
1.450	100	145.000	25	3.625.000	122.909.300	1.046.220	60	+ 87.000
1.720	110	189.200	35	6.622.000	129.531.300	1.235.420	50	+ 86.000
1.640	120	196.800	45	8.856.000	138.387.300	1.432.220	40	+ 65.600
1.670	130	217.100	55	11.940.500	150.327.800	1.649.320	30	+ 50.100
1.730	140	242.200	65	15.743.000	166.070.800	1.891.520	20	+ 34.600
1.780	150	267.000	75	20.025.000	186.095.800	2.158.520	10	+ 17.800
1.780	160	284.800	85	24.208.000	210.303.800	2.443.320	0	0
								$\sum \Delta S_x = 326.760$

La sezione si parzializza ed assume come asse neutro la fibra posta a cm. 85 (ordinata y) dal lembo compresso. Infatti per $Y = 85$ risulta proprio :

$$\frac{\sum Y_i V_i A_i}{\sum A_i V_i} = \frac{210.303.800}{2.443.320} = 85 \text{ cm.}$$

Il momento statico della sezione reagente risulta allora :

$$S_x = \sum \Delta S_x = 326.760 \text{ cm}^3$$

e perciò

$$\left[\begin{array}{l} \sigma_c = \frac{N}{S_x} y = \frac{200.000}{326.760} \cdot 85 = 52 \text{ Kg/cm}^2. \\ \sigma_f = n \frac{N}{S_x} (d - y) = 8 \cdot \frac{200.000}{326.760} \cdot 160 = 800 \text{ Kg/cm}^2. \end{array} \right.$$

Verifica della sezione di base del pilastro nelle condizioni più gravose (sotto azione del vento per i pilastri di perimetro).

$$M = 540 \text{ Tm.}$$

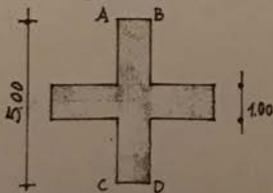
$$N = 652 \text{ T.}$$

oppure

$$M = 540 \text{ tm.}$$

$$N = 652 + 120 = 772 \text{ t.}$$

secondo che si consideri il solo carico permanente o si consideri anche agente metà del sovraccarico massimo.



La massima eccentricità si ha nel primo caso ed è :

$$e = \frac{540}{652} = 0,82 \text{ m.}$$

Poichè il solo elemento ABCD della sezione di base è un rettangolo di m. 1,00 x 5,00, anche trascurando totalmente la presenza dell'ac-

ciaio si avrebbe una sezione di conglomerato totalmente reagente con valori massimi della compressione del tutto ammissibili.

Infatti, la distanza del centro di pressione dal lembo compresso risulta :

$$y = \frac{h}{2} - e = 2,50 - 0,85 = 1,65$$

E perciò la sezione ABCD si parzializzerebbe reagendo soltanto per una altezza totale pari a $3y = 3 \times 1,65 = 4,95$ m..

Il massimo della compressione risulterebbe allora :

$$\sigma = 2 \frac{N}{A} = 2 \frac{652.000}{4,95 \times 100} = 26 \text{ Kg/cm}^2.$$

Nel secondo caso si avrebbe :

$$e = \frac{1.000}{1.109} = 0,91 \quad \frac{540}{772} = 0,70 \text{ m.}$$

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{Me}{I} = \frac{772.000}{500 \times 100} + \frac{540.000 \times 6}{100 \times 500^2} = 15,50 +$$

$$+ 13,00 = 28,50 \text{ Kg/cm}^2.$$

