

---

# POLITECNICO DI TORINO

---

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

A. a. 2022/2023

Sessione di Laurea dicembre 2023

**TESI DI LAUREA MAGISTRALE**

HBIM DELLO SCALONE GUARINIANO PER L'ANALISI STRUTTURALE



**Politecnico  
di Torino**

**Relatrice:**

Prof.ssa Anna Osello

**Candidata:**

Daniela Scuderi 285053

## INDICE

1.	INTRODUZIONE.....	2
2.	METODOLOGIA.....	4
3.	PALAZZO CARIGNANO: CAPOLAVORO DELL'ARCHITETTURA BAROCCA E TESTIMONIANZA DELLA POLITICA ITALIANA.....	6
	2.1 Il palazzo nel Seicento .....	8
	2.2 Il palazzo nel Settecento.....	14
	2.3 Il palazzo nell'Ottocento.....	20
	2.3.1 Le opere di adattamento.....	26
	2.4 Il progressivo declino e i nuovi progetti del '900 .....	31
	2.4.1 L'ultima trasformazione .....	33
4.	LO SCALONE GUARINIANO: UN'ANALISI STORICO-ARCHITETTONICA .....	35
	3.1 I materiali utilizzati e le iconografie.....	37
	3.2 La preservazione dello Scalone Guariniano.....	40
5.	LA MODELLAZIONE STRUTTURALE CON REVIT.....	42
	4.1 Famiglia Scala .....	42
	4.2 Famiglia Pavimento .....	45
	4.3 Famiglie locali .....	49
	4.4 Revit - Robot .....	55
	4.4.1 Revit – CAD .....	55
5.	L'ANALISI STRUTTURALE CON SOLIDWORK.....	58
	5.1 Il modello di dati Industry Foundation Classes.....	59
	5.2 Definizione dei materiali.....	63
	5.3 Analisi statica.....	68
	5.4 Analisi a fatica.....	83
6.	eDdrawings VIEWER .....	95
7.	RISULTATI.....	99
8.	CONCLUSIONI .....	102
a.	BIBLIOGRAFIA .....	103
b.	SITOGRAFIA .....	104
c.	ENTI PUBBLICI.....	104

## 1. INTRODUZIONE

L'obiettivo di questa tesi è lo sviluppo di un HBIM (Heritage Building Information Modeling) per condurre un'analisi strutturale su una porzione di una struttura storica di notevole importanza, ovvero lo scalone di Palazzo Carignano. Questo approccio integrato si propone di sfruttare le potenzialità del Building Information Modeling (BIM) e di strumenti avanzati di modellazione e calcolo strutturale, con particolare enfasi sulla visualizzazione immersiva attraverso la Realtà Virtuale (VR).

Nei settori dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni, le procedure basate sul Building Information Modeling (BIM) sono adottate sempre di più. Si tratta di un metodo progettuale innovativo. Infatti, mentre la progettazione tradizionale si basa principalmente su disegni bidimensionali e documenti cartacei, il BIM è un processo che utilizza un modello virtuale tridimensionale per rappresentare un progetto.

Una delle principali differenze tra la progettazione tradizionale e il BIM è il livello di dettaglio e precisione dei modelli. Nella progettazione tradizionale, i disegni sono spesso limitati a viste bidimensionali, rendendo difficile comprendere completamente l'aspetto e le caratteristiche di un edificio. Al contrario, il BIM permette di creare modelli virtuali 3D estremamente dettagliati, che consentono di visualizzare e analizzare ogni aspetto del progetto, dal design architettonico ai dettagli strutturali e alle installazioni impiantistiche.

Un'altra differenza significativa è il tipo di informazioni che possono essere incluse nei modelli. Nella progettazione tradizionale, le informazioni sull'edificio, come le specifiche dei materiali o le caratteristiche degli impianti, sono spesso separate dai disegni e possono essere difficili da trovare o aggiornare. Con il BIM, invece, tutte le informazioni relative all'edificio possono essere integrate



FIGURA 1. LO SCALONE GUARINIANO

direttamente nel modello, rendendole facilmente accessibili e aggiornabili. Questo è particolarmente utile durante la fase di costruzione e durante il ciclo di vita dell'edificio, poiché permette una migliore pianificazione, gestione e manutenzione dell'edificio stesso. Inoltre, il BIM facilita la collaborazione tra i vari professionisti coinvolti nel progetto. Grazie al modello virtuale condiviso, tutti i membri del team di progettazione possono lavorare simultaneamente sullo stesso progetto, facilitando la comunicazione e riducendo i possibili errori o incomprensioni. Questo aspetto collaborativo del BIM è particolarmente importante nella progettazione di grandi edifici o complessi, che richiedono il coordinamento di diverse discipline come l'architettura, l'ingegneria strutturale e gli impianti.

Infine, il BIM offre una serie di vantaggi in termini di efficienza e riduzione dei costi. Grazie alla possibilità di analizzare il modello virtuale in modo approfondito, è possibile individuare e risolvere potenziali problemi fin dalla fase di progettazione, evitando costosi interventi correttivi in fase di costruzione. Inoltre, il BIM permette una migliore pianificazione dei tempi e delle risorse, consentendo di ottimizzare i processi di costruzione e di ridurre i tempi di realizzazione.

In definitiva, sebbene la progettazione tradizionale sia ancora utilizzata, l'adozione del BIM sta diventando sempre più diffusa nel settore dell'edilizia. Grazie alle sue caratteristiche innovative e all'approccio collaborativo, il BIM offre vantaggi significativi in termini di precisione, efficienza e riduzione dei costi, migliorando la qualità del processo di progettazione e realizzazione degli edifici.

Sebbene il metodo BIM sia per lo più utilizzato per le nuove costruzioni, negli ultimi anni, l'implementazione di questa tecnologia ha anche attirato una crescente attenzione per le strutture esistenti per ricostruire la loro geometria e raccogliere dati rilevanti, in particolare per gli edifici storici. In questo caso, ci si riferisce a Heritage BIM (HBIM).

Una procedura HBIM richiede un approccio multidisciplinare che coinvolga non solo considerazioni storiche, di conservazione e di restauro, ma anche adeguati piani di manutenzione, bilanciando debitamente le esigenze strutturali con la conservazione del valore storico dell'edificio e del suo contenuto. Sebbene l'integrazione della valutazione strutturale nel processo HBIM sarebbe estremamente vantaggiosa, la sua attuazione pratica è spesso nelle fasi iniziali.

La procedura inizia con l'utilizzo di programmi comunemente impiegati nel contesto BIM, tra cui 'Revit'. Questo software permette di creare un modello digitale tridimensionale della struttura storica, includendo informazioni dettagliate sulla geometria, materiali, relazioni tra gli elementi e altri dati pertinenti. Durante questa fase, sarà fondamentale integrare informazioni storiche e dettagli architettonici per garantire un modello HBIM completo e accurato.

Successivamente, la procedura si estende all'utilizzo di programmi specializzati di modellazione e calcolo strutturale, come 'SOLIDWORKS'. Questo software consente di affrontare aspetti più specifici legati alla struttura e alle sue caratteristiche strutturali. Sarà possibile definire e simulare carichi, condizioni al contorno e altre variabili fondamentali per un'analisi strutturale approfondita.

Una volta completata l'analisi strutturale, il passo successivo coinvolge l'integrazione di una visualizzazione VR del modello HBIM. Questa fase aggiunge un elemento di esperienza immersiva, consentendo agli utenti di esplorare il modello in modo più intuitivo e coinvolgente. La VR può facilitare la comprensione del contesto storico e strutturale, offrendo una prospettiva più realistica e dettagliata.

In sintesi, la tesi si propone di combinare le capacità del BIM con strumenti avanzati di modellazione strutturale e di calcolo, arricchendo l'esperienza con la visualizzazione VR.

## 2. METODOLOGIA

La metodologia utilizzata che parte dal BIM (Building Information Modeling) e arriva al FEM (Finite Element Method) implica una sequenza organizzata di passaggi (Figura 2).

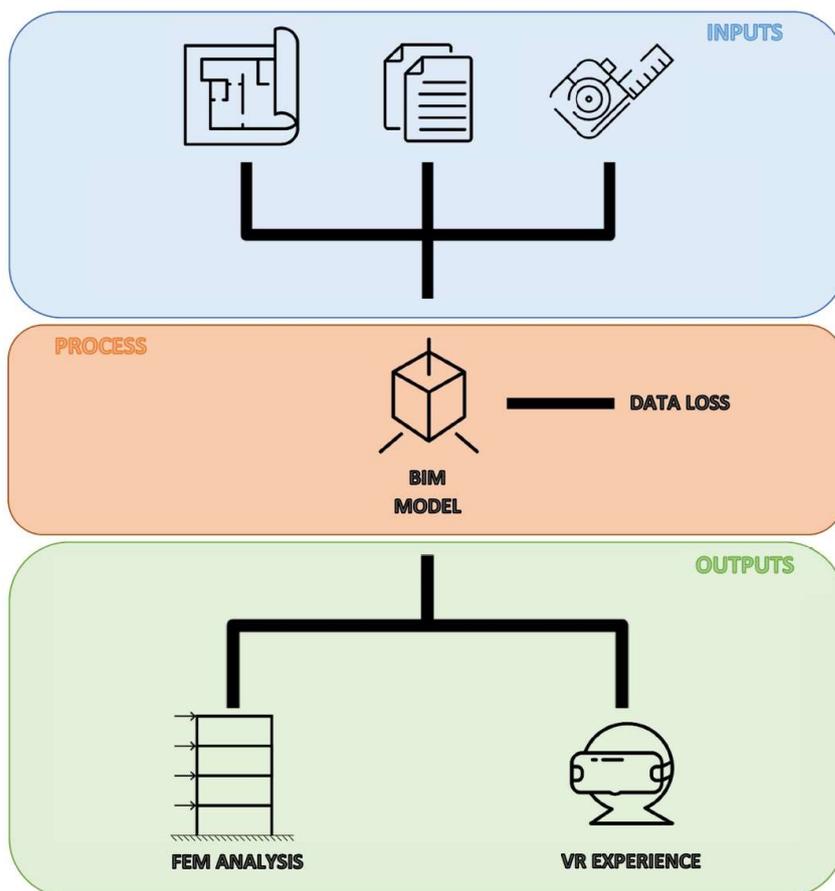


FIGURA 2. METODOLOGIA UTILIZZATA

È necessario reperire i dati necessari, che possono includere disegni architettonici, documenti tecnici, dati di rilievo topografico, dati storici e qualsiasi altra informazione rilevante. La raccolta accurata di questi dati è fondamentale per una modellazione e analisi precise. In particolar modo si sono consultate le biblioteche di Architettura e di Ingegneria del Politecnico di Torino, l'archivio di stato e l'archivio storico di Torino al fine d'ottenere le planimetrie e la documentazione storica. In più si è effettuato un sopralluogo dello scalone al fine di realizzare un rilievo.

Ottenuti tutti i dati necessari, si deve poi utilizzare un software BIM per tradurre i dati raccolti in un modello digitale tridimensionale della struttura. La fase di modellazione rappresenta parte sostanziale di questa tesi in quanto la geometria dello scalone risulta essere piuttosto complessa così come la realizzazione del suo modello. Questo modello BIM deve rappresentare non solo la geometria, ma anche le proprietà dei materiali, le

relazioni tra gli elementi e altre informazioni pertinenti alla costruzione, la resistenza, i carichi di esercizio e tutte le variabili necessarie per l'analisi strutturale successiva.

Realizzato il modello BIM, è necessario esportarlo in un formato compatibile con il software di analisi agli elementi finiti (FEM). Ciò potrebbe coinvolgere la conversione del modello in un formato standard come IFC (Industry Foundation Classes). In questa fase è necessario assicurarsi che tutte le informazioni di costruzione vengano trasferite correttamente e, quindi, verificare la compatibilità del modello con il software FEM.

Al fine di ottenere risultati accurati dall'analisi agli elementi finiti è necessario creare una mesh (griglia di elementi finiti) basata sulla geometria del modello, definire e applicare i carichi, le condizioni al contorno e altri parametri necessari per simulare il comportamento strutturale della costruzione nel software FEM.

Avendo definito tutti gli elementi necessari, è possibile avviare l'analisi agli elementi finiti per ottenere risultati dettagliati sul comportamento strutturale sotto diverse condizioni di carico.

È possibile anche utilizzare tecnologie di visualizzazione avanzate, come la Realtà Virtuale (VR), per esplorare in modo immersivo il modello realizzato.

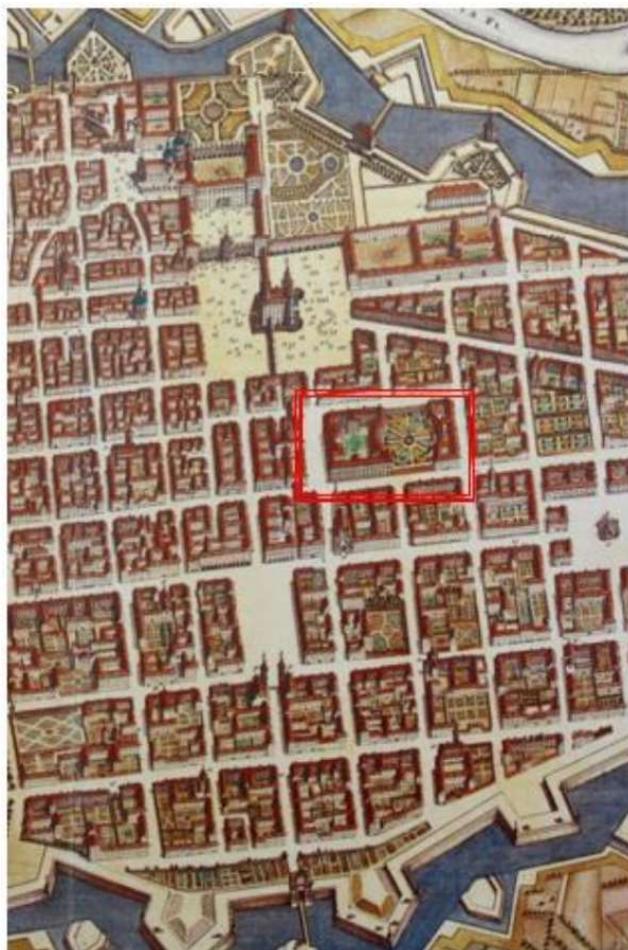
### 3. PALAZZO CARIGNANO: CAPOLAVORO DELL'ARCHITETTURA BAROCCA E TESTIMONIANZA DELLA POLITICA ITALIANA



FIGURA 3. PALAZZO CARIGNANO

Lo Scalone Guariniano è un elemento architettonico e storico di grande importanza, sia dal punto di vista artistico che culturale. Il contesto in cui si trova aggiunge ulteriori strati di significato a questa straordinaria opera: Palazzo Carignano. Situato nel cuore di Torino, è un capolavoro dell'architettura barocca e una testimonianza vivente della storia culturale e politica dell'Italia. Questo palazzo, costruito tra il 1679 e il 1685 dall'architetto Guarino Guarini, su commissione di Emanuele Filiberto di Savoia detto "il Muto", rappresenta non solo un'opera d'arte architettonica ma anche un monumento intriso di significato storico tale da essere riconosciuto dall'UNESCO dal 1997 come patrimonio culturale dell'umanità.

Il fabbricato è sito a Torino a pochi passi da Piazza Castello nel centro della città storica. Il palazzo, che attualmente presenta una superficie di 8000 m<sup>2</sup>, nasce con una configurazione completamente differente da quella con cui oggi si presenta. Infatti, al giorno d'oggi, Palazzo Carignano si impone tra le odierne Piazza Carignano e Piazza Carlo Alberto. Anticamente, invece, la piena proprietà dei Carignano si estendeva sull'area oggi compresa tra Piazza Carignano e via Giambattista Bogino.



**FIGURA 4. «PIANTA DI TORINO», INCISIONE ANONIMA SU DISEGNO DI TOMASO BORGONIO, IN THEATRUM SABAUDIAE, 1682 (PARTICOLARE). IL PALAZZO CARIGNANO È RAPPRESENTATO A PIANTA QUADRATA CON CORTILE INTERNO E SI AFFACCIA SUL GIARDINO E ALLE SCUDERIE PROSPICIENTI**

Il fabbricato eretto da Guarino Guarini a Torino, conosciuto come Palazzo Carignano, nacque con l'obiettivo di diventare la nuova residenza per il ramo cadetto della famiglia Savoia-Carignano. Questa residenza aveva una duplice finalità: offrire un ambiente lussuoso per i membri della famiglia e rappresentare il prestigio e la grandezza della casata dei Savoia.

Il progetto architettonico del palazzo, affidato a Guarino Guarini, evidenziava la maestosità e l'eleganza tipiche del barocco piemontese. Le linee curve e sinuose della facciata, abbellite da decorazioni scultoree e ornamenti ricchi, conferivano al palazzo un aspetto regale e sontuoso.

All'interno, le stanze erano decorate con affreschi, stucchi, specchi e mobili pregiati, creando un ambiente di straordinaria bellezza e raffinatezza. Gli spazi erano concepiti per ospitare eventi e ricevimenti di grande importanza, che mettevano in mostra il lusso e lo splendore della famiglia Savoia-Carignano.

Oltre ad essere una residenza per i membri della famiglia, il Palazzo Carignano aveva anche un ruolo di rilievo nella rappresentazione del potere e della grandezza dei Savoia. La sua posizione strategica, nel cuore di Torino, ne faceva un punto di riferimento per la città e i suoi abitanti.

Il palazzo, con la sua facciata imponente e maestosa, diventò un simbolo di prestigio per la famiglia Savoia-Carignano, riflettendo la loro posizione sociale e il loro predominio politico nella regione.

Tuttavia, il ruolo più significativo di Palazzo Carignano si esprime durante il periodo del Risorgimento italiano. Durante il XIX secolo, l'Italia era ancora divisa in vari stati e il concetto di unificazione nazionale stava guadagnando terreno. In questo contesto, il palazzo divenne un luogo di incontri e discussioni politiche di rilevanza storica.

Palazzo Carignano fu testimone di importanti dibattiti e negoziati che portarono alla fondazione del Regno d'Italia nel 1861. Durante il processo di unificazione, numerose figure di spicco dell'epoca si riunirono in questo edificio per discutere e prendere decisioni cruciali per il futuro dell'Italia. Le discussioni politiche e i negoziati che vi si tennero contribuirono a plasmare il percorso verso l'indipendenza e l'unificazione italiana.

Successivamente, una volta che Palazzo Carignano cessò di essere residenza nobiliare, fu trasformato in un museo che porta il nome di Museo Nazionale del Risorgimento Italiano. Il museo ospita una vasta collezione di documenti, oggetti e opere d'arte legati all'unità italiana e alle vicende storiche dell'epoca del Risorgimento. Attraverso le sue esposizioni, il museo offre ai visitatori la possibilità di immergersi nella storia e di approfondire i processi politici e culturali che hanno portato all'unificazione dell'Italia. L'opera di Guarini, architetto torinese del XVII secolo, ha a lungo sofferto di un apprezzamento limitato e talvolta persino di critiche negative da parte della critica di derivazione illuminista. Tuttavia, solo nei primi decenni del XX secolo è stata finalmente riconosciuta nella sua piena qualità e ha acquisito fama universale come uno dei risultati più significativi dell'architettura barocca, diventando così un simbolo del pieno Seicento.

La critica illuminista, infatti, aveva spesso preferito l'architettura classica e razionale dei tempi passati, considerando il barocco come un'arte decadente e eccessivamente ornata. In questo quadro, l'opera di Guarini era stata sottovalutata e talvolta addirittura denigrata. Tuttavia, grazie all'impegno di alcuni studiosi e alla riscoperta di numerosi edifici progettati da Guarini, la sua opera ha finalmente ricevuto la considerazione che meritava. Le sue architetture, caratterizzate da una grande inventiva e da un uso audace degli elementi decorativi, sono diventate oggetto di studio e ammirazione da parte degli specialisti del settore.

L'architettura di Guarini si caratterizza per una combinazione unica di elementi tradizionali e innovativi. Questo palazzo, con il suo cortile interno e l'audace scala ellittica, è un esempio straordinario di come Guarini abbia saputo coniugare bellezza estetica e funzionalità.

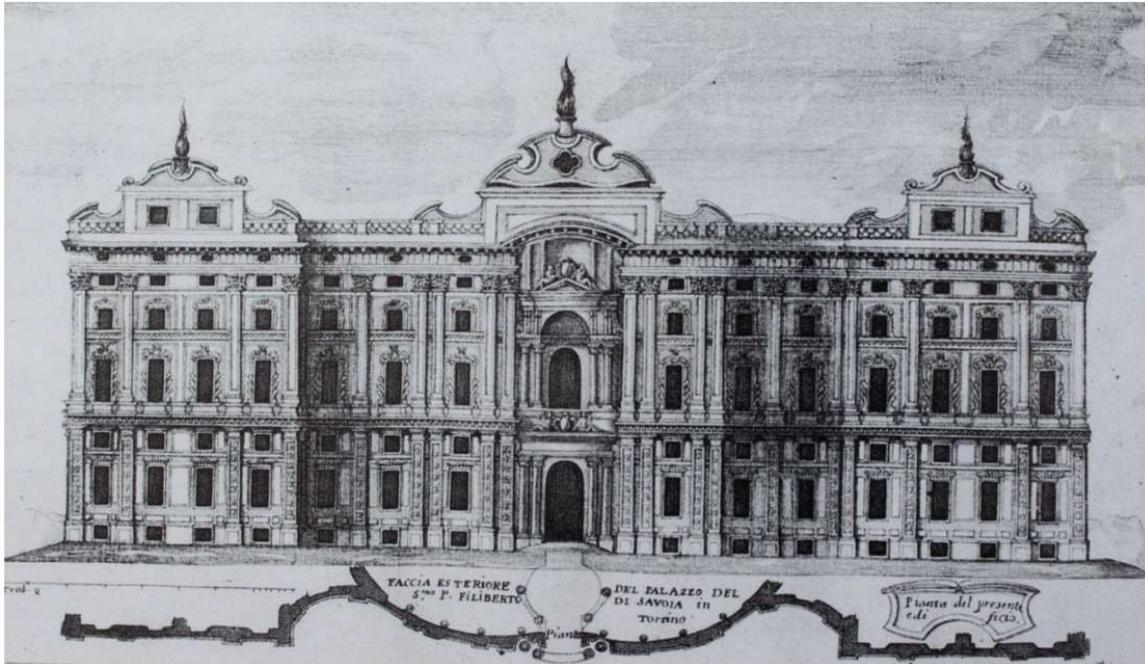
Oggi, l'opera di Guarini è finalmente considerata tra le più alte espressioni dell'architettura barocca e viene universalmente apprezzata per la sua originalità e la sua complessità. La sua architettura, con la sua fusione di arte e scienza, rappresenta un punto di riferimento per gli architetti contemporanei che desiderano trarre ispirazione da un passato ricco di innovazioni.

Il percorso costruttivo del palazzo, dal cantiere di Guarini (1679-1683) fino agli ultimi decenni dell'Ottocento, è illustrato dai disegni conservanti negli archivi riguardanti sia progetti realizzati che solo proposti, molti appartenenti a quest'ultima categoria.

## 2.1 Il palazzo nel Seicento

Unica impronta e testimonianza degli originali prospetti dell'edificio sono delle incisioni in rame su disegno di Guarini, eseguite dal De Pienne, divulgate nel trattato *Disegni d'architettura civile et ecclesiastica inventati et delineati dal Padre D. Guarino Guarini modenese de Chierici Regulari Theatini matematico dell'Altezza Reale di*

*Savoia*, In Torino 1686 per Domenico Paulino. In Figura 2 e Figura 6, vengono raffigurati il prospetto verso l'attuale Piazza Carignano e il prospetto verso il giardino privato (attuale cortile interno e Piazza Carlo Alberto).



**FIGURA 5.** «FACCIA ESTERIORE DEL PALAZZO DEL S.MO P.FILIBERTO DI SAVOIA IN TORINO», E «PIANTA DEL PRESENTE EDIFICIO», INCISIONE IN RAME DI ANTONIO DE PIENNE SU DISEGNO DI GUARINI, IN *DISSEGNI D' ARCHITETTURA CIVILE ET ECCLESISTICA INVENTATI ET DELINEATI DAL PADRE D. GUARINO GUARINI MODENESE DE CHIERICI REGULARI THEATINI MATEMATICO DELL'ALTEZZA REALE DI SAVOIA*, CIT. (BRT, V 38-39)

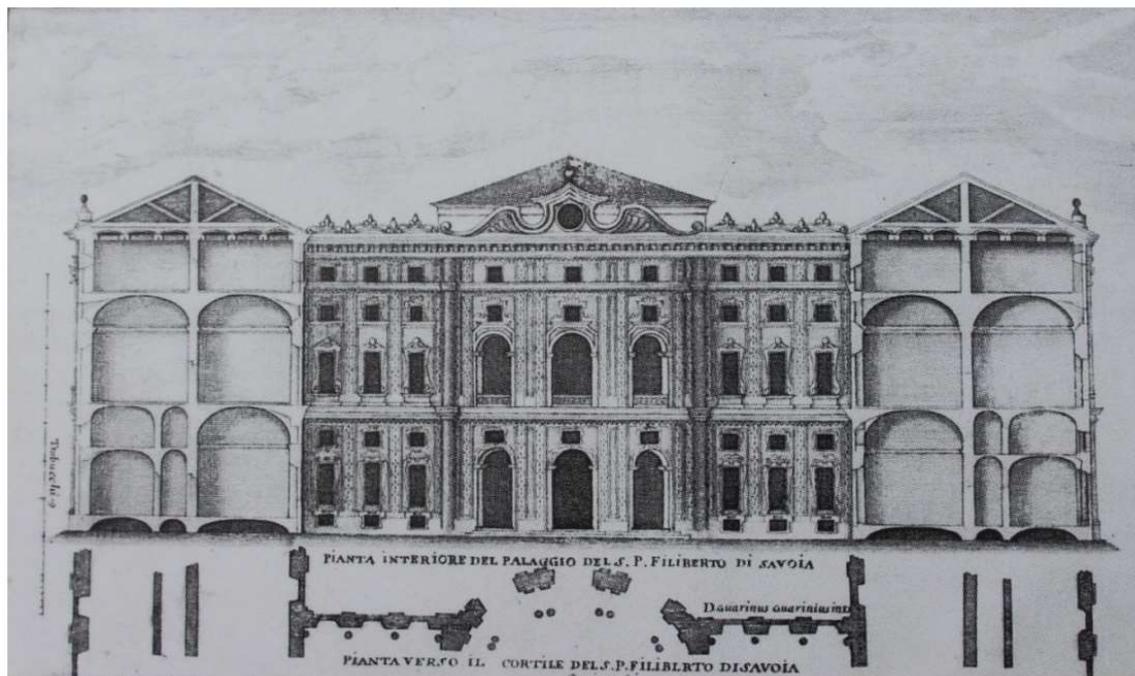


FIGURA 6. «PIANTA INTERIORE DEL PALAZZO DEL S.P. FILIBERTO DI SAVOIA» E «PIANTA VERSO IL CORTILE DEL S.P. FILIBERTO DI SAVOIA», INCISIONE IN RAME DI ANTONIO DE PIENNE SU DISEGNO DI GUARINI, IN *DISSEGNI D' ARCHITETTURA CIVILE ET ECCLESISTICA INVENTATI ET DELINEATI DAL PADRE D. GUARINO GUARINI MODENESE DE CHIERICI REGOLARI THEATINI MATEMATICO DELL' ALTEZZA REALE DI SAVOIA*, CIT. (BRT, V 38-39)

Si può notare che la partitura architettonica rispetta l'edificato visibile oggi, cosa che non vale per la copertura. Infatti, perimetralmente alla linea di gronda, si alternano fronti a cornice di balaustre, interrotti da elementi sopraelevati a forma di timpani curvi a linea spezzata, soluzione differente rispetto a quella giunta fino ai giorni nostri di una copertura a falde con manto in coppi e la presenza del padiglione centrale che domina l'ingresso all'attuale corte interna.

Riguardo la conclusione spaziale e strutturale del salone e del tetto, non si conosce una sezione completa della parte centrale dell'edificio, e ciò impedisce di verificare l'idea originale di Guarini. Sono, però, disponibili, due sezioni (Figura 7 e Figura 8), riferite l'una all'architettura degli atri a piano terra e l'altra allo sviluppo della scala in curva che illustrano in parte lo spaccato del palazzo.

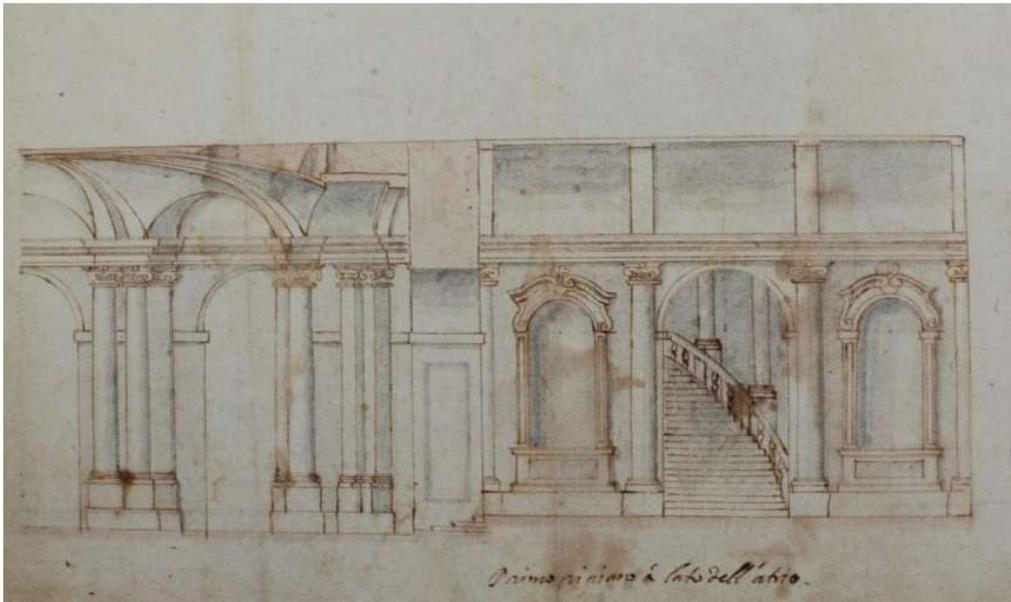


FIGURA 7. PRIMO RIPIANO A LATO DELL'ATRIO, S. F., S.D. (ASTR, AZ. SAVOIA-CARIGNANO, CAT.53, M.1, FASC.9). LA TAVOLA ILLUSTRRA UNA SEZIONE LONGITUDINALE DELL'ATRIO OVALE (DALLA MEZZANA) E DALL' ATRIO LATERALE

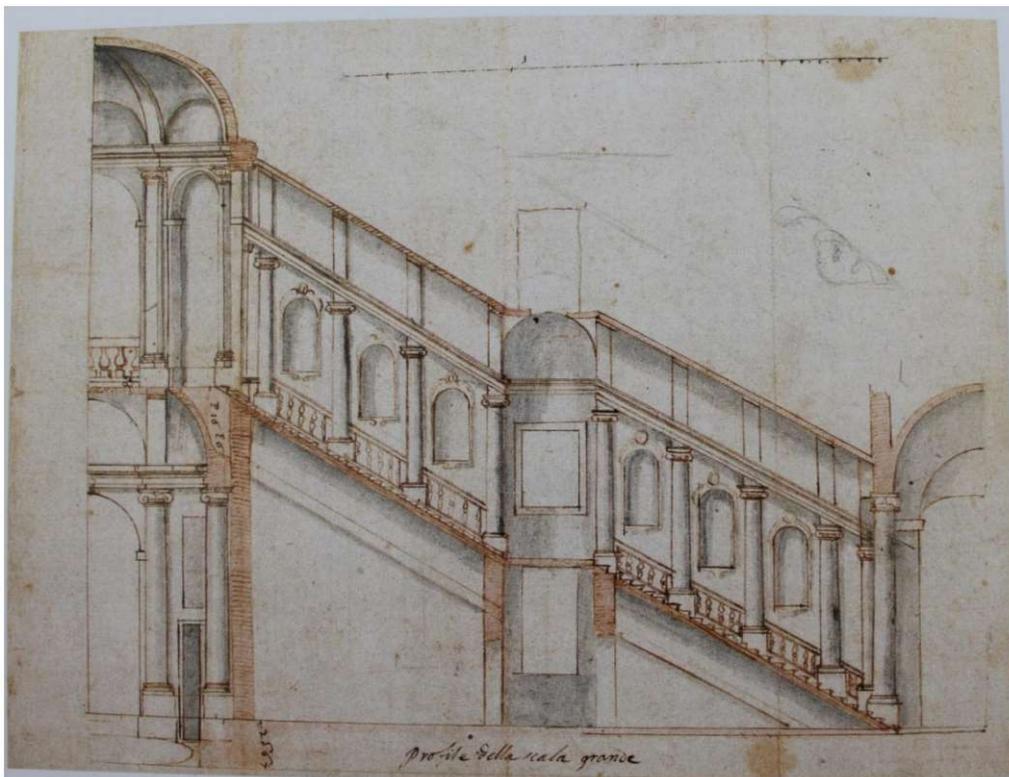
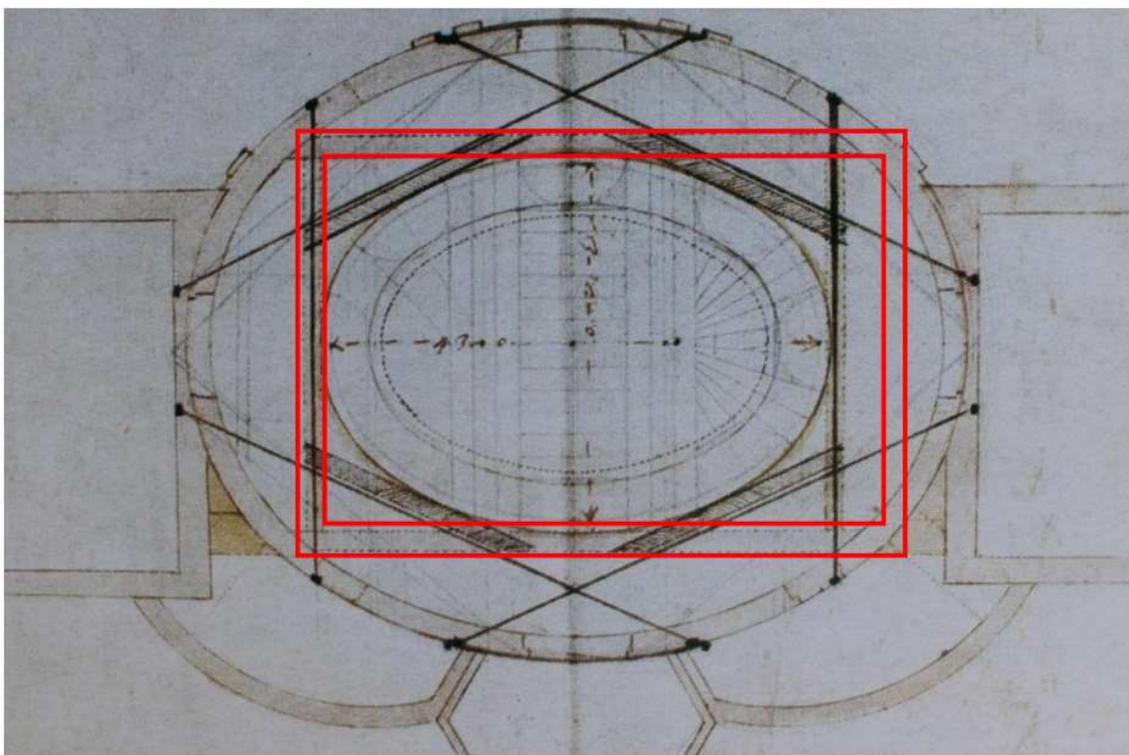


FIGURA 8. SEZIONE DELLA SCALA GRANDE, S. F., S.D. (ASTR, AZ. SAVOIA-CARIGNANO, CAT.53, M.1, FASC.9). LA GRAFIA RAFFINATA E L'ACCURATEZZA DI DETTAGLI DI QUESTO DISEGNO, E DEL SEGUENTE, LI COLLOCANO IN UN MOMENTO AVANZATO DEL PROCESSO PROGETTUALE.

Dal punto di vista costruttivo, è interessante soffermarsi sullo schema di volte a fasce piane tipico dell'architetto teatino da lui adottato per facilitare l'ingresso della luce dall'alto (Figura 9). Questa seconda volta del salone, oggi non più presente, chiarisce il proprio legame con i finestroni ovali ricavati nel padiglione che emerge in altezza, in quanto questi dovevano consentire alla luce di penetrare dall'alto e di attraversare la volta forata illuminando il salone sottostante. La mancanza di disegni di spaccato estesi a tutta altezza dell'edificio e la sopraggiunta morte di Guarini, con il passaggio completo della direzione del cantiere a Barocelli, non consentono sicurezze assolute, ma ancora oggi sono visibili, al disopra della prima volta del salone, quattro spuntoni di muratura che corrispondono agli innesti degli arconi indicati nel disegno di progetto.



**FIGURA 9. PROGETTO PER "L'ARMATURA" DELLA VOLTA DEL SALONE, S. F. S.D. (QUIRINALE, FONDO SAVOIA-CARIGNANO, CAT.95)**

Testimonianza di un momento significativo del processo progettuale è data dal disegno in cui compare l'intero corpo della proprietà e del profilo esterno dove la pianta ad isolato chiuso illustra la sistemazione definitiva dell'atrio e delle scale (Figura 10).

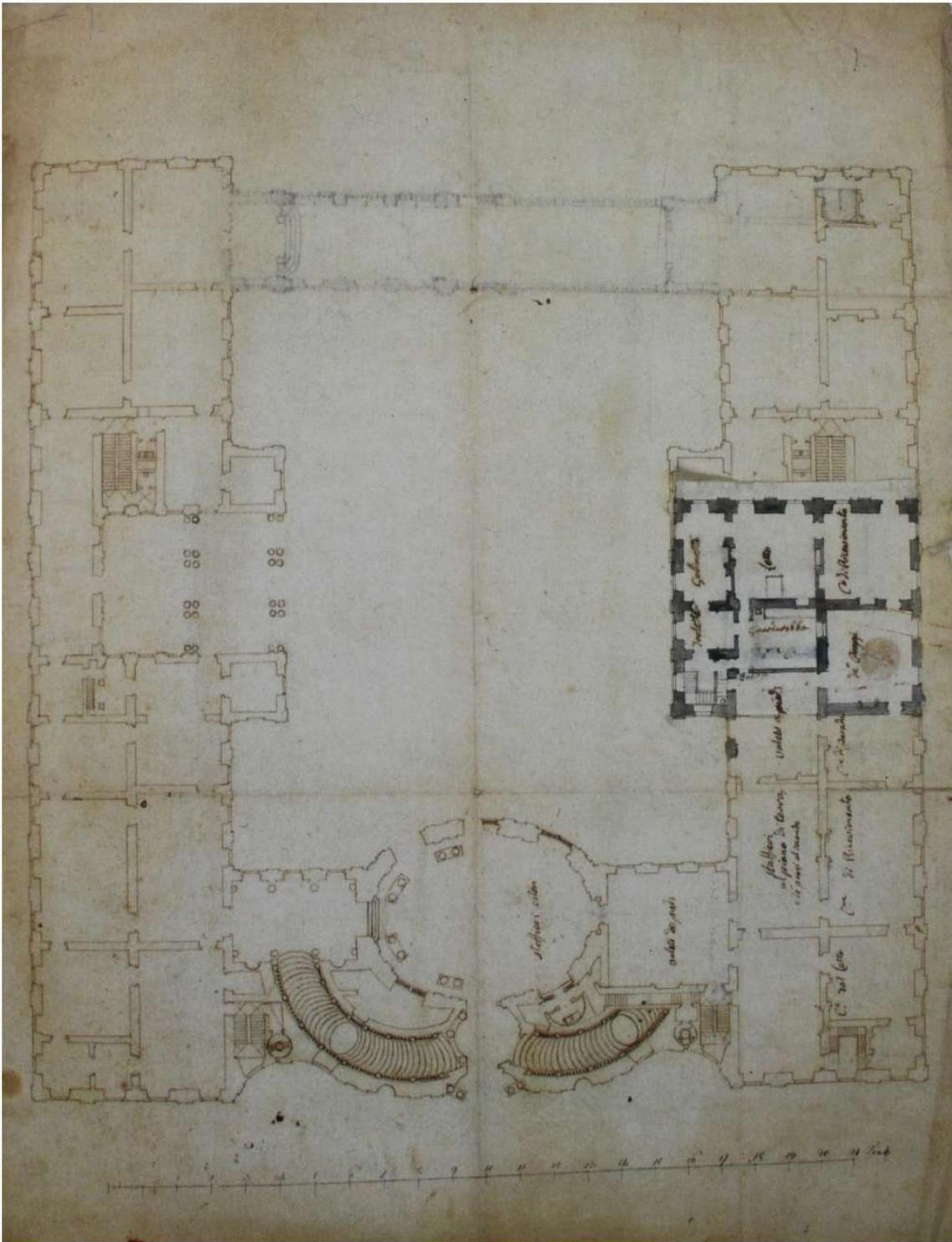


FIGURA 10. PIANTA DELL'INTERO PALAZZO, S. F., S.D. (ASTR, AZ. SAVOIA- CARIGNANO, CAT.53, M.1, FASC.9)

## 2.2 Il palazzo nel Settecento

Le notizie e la documentazione in merito all'aspetto e alle condizioni dell'edificio in epoca settecentesca sono piuttosto scarse. Gli unici disegni a carattere di rilievo della situazione esistente descrivono la destinazione abitativa delle zone secondarie del palazzo, il sottotetto ed i mezzanelli, riportando l'elenco dei dignitari e degli addetti che occupavano gli alloggi e le soffitte (Figura 11 e Figura 12).

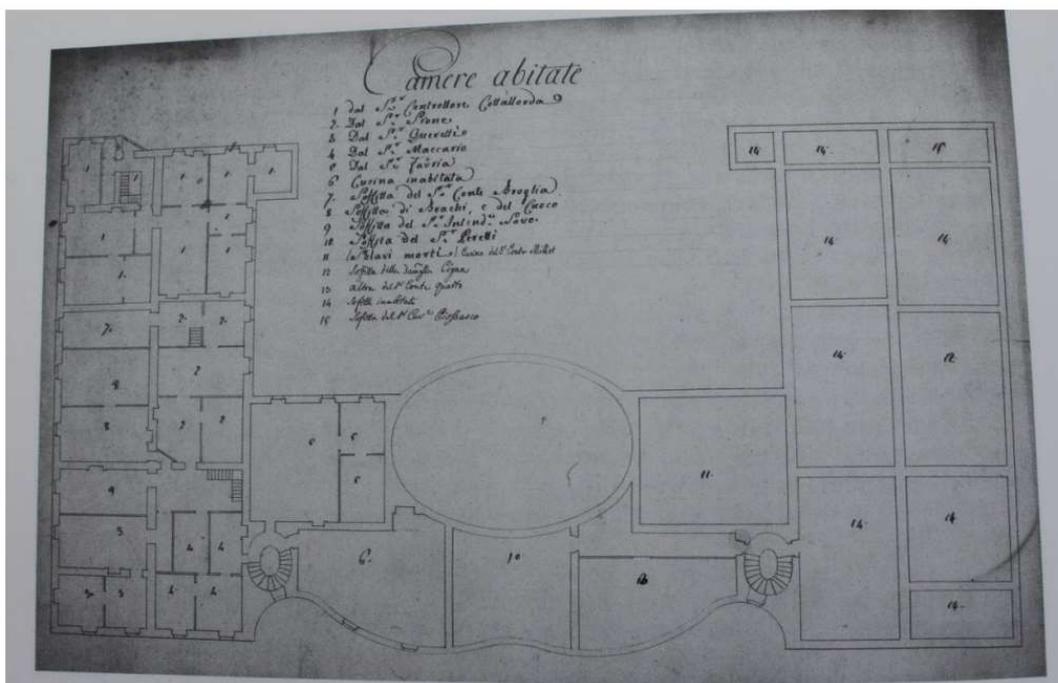


FIGURA 11. CAMERE ABITATE. RILIEVO DELLE SOFFITTE, S. F. S. D. (ASTR, AZ. SAVOIA-CARIGNANO, CAT.53, INV. 8 BIS, N.22).

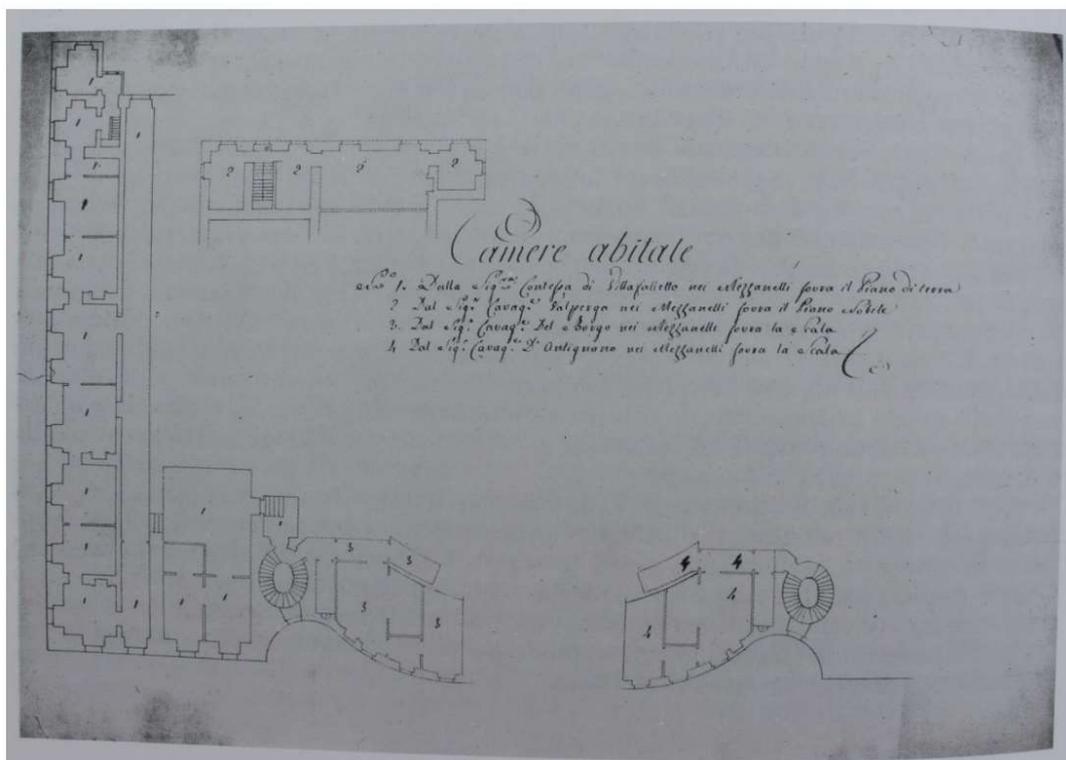


FIGURA 12. CAMERE ABITATE RILIEVO DEI MEZZANELLI, S. F., S. D. (ASTR, AZ. SAVOIA - CARIGNANO, CAT.53,M. 1, INV. 8 BIS, N.22).

Le rappresentazioni raffiguranti Palazzo Carignano hanno sempre privilegiato la facciata guariniana. Al fine di ricavare qualche informazione sulle variazioni subite nel tempo da questa facciata, la più iconografica del palazzo, si deve fare riferimento ad incisioni. L'incisione più antica, datata al 1730, è quella di F.B. Werner di Figura 13. Questa propone una vista frontale in cui spiccano il vistoso corpo cilindrico finestrato, sproporzionato rispetto alle dimensioni reali, e l'andamento delle falde di copertura, risolte a testa di padiglione sulle estremità delle maniche laterali. Queste suggeriscono l'ipotesi che in origine il tetto in carpenteria lignea fosse limitato alle maniche laterali e che la copertura della zona centrale fosse stata effettivamente realizzata a terrazzo piano (come indicato nei prospetti di Guarini), ed in seguito protetta da falde di tetto risolte "alla buona".



**FIGURA 13. FRIEDRICH BERNARD WERNER, «PALAZZO CARIGNANO CON SUA PIAZZA IN TORINO» 1730. DA A. PEYROT E V. VIALE, IMMAGINI DI TORINO NEI SECOLI, CATALOGO DELLA MOSTRA, TORINO 1969 LA VISTA, IN FALSA PROSPETTIVA, È RIPRESA DA UNA CERTA DISTANZA. IL PADIGLIONE EMERGENTE PREDOMINA SUL PALAZZO E SUGLI EDIFICI LIMITROFI; IL CORNICIONE È SPEZZATO IN CORRISPONDENZA DEL NICCHIONE CENTRALE, SOVRASTATO DA DUE FINESTRELLE INSERITE IN UN ELEMENTO CHE SEMBREREBBE PROVVISORIO.**

Un'incisione che inquadra lo stabile in scorcio prospettico nella veduta della piazza omonima è di Giovanni Battista Borra, del 1749 (Figura 14). Le partiture in altezza appaiono sensibilmente diverse dalle proporzioni reali e compare distintamente un occhio circolare al disopra del nicchione centrale. Il cornicione continuo segue l'andamento in curva della facciata ed è sovrastato, al centro, da un piccolo abbasino presumibilmente di invenzione. Il corpo cilindrico è emergente e riporta finestrature ovali completamente aperte e paraste intermedie.



**FIGURA 14. GIOVANNI BATTISTA BORRA, «PIAZZA AVANTI IL PALAZZO DEL PRINCIPE DI CARIGNANO CON IL DISEGNO DELLA FACCIATA DEL SUO TEATRO»1749 (IN VEDUTE PRINCIPALI DI TORINO DISEGNATE IN PROSPETTIVA, ED INTAGLIATE I RAME DALL' ARCHITETTO GIAMBATTISTA BORRA.... PARTE I,1749).**

L'incisione di Figura 15 di Beltramo Antonio Re, del 1753, si differenzia dal disegno di Guarini per la presenza del volume emergente e per l'assetto della copertura dove i quattro abbaini presentano lo schema decorativo seicentesco. L'incisione presenta per la prima volta i due balconcini posti alle estremità del piano nobile.

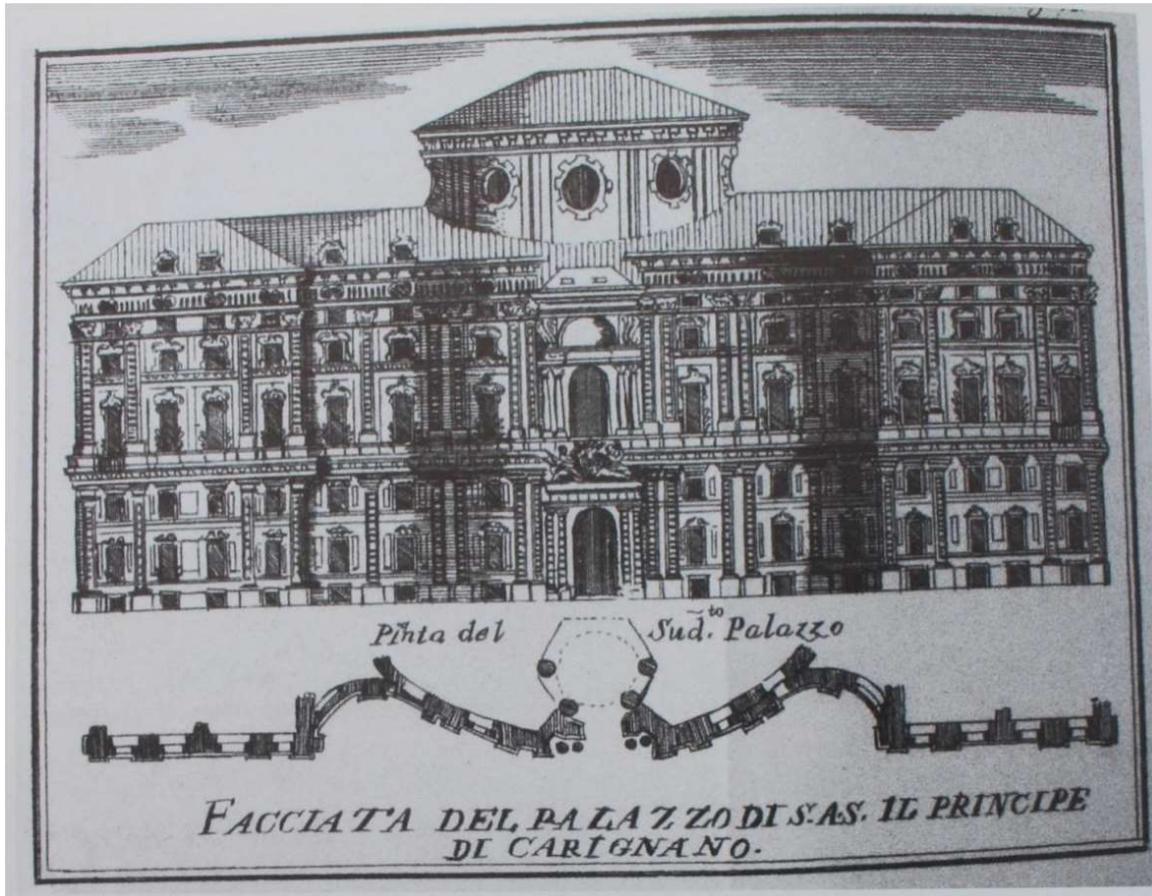


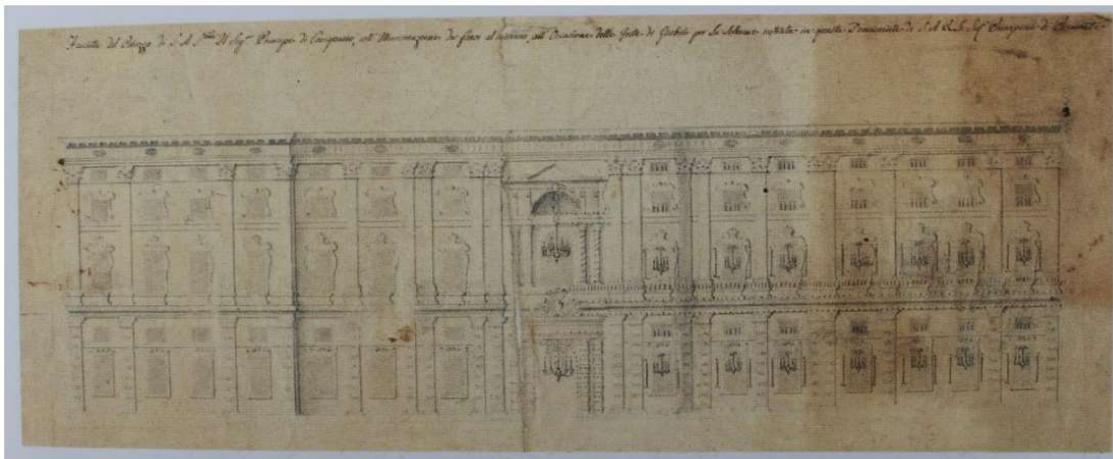
FIGURA 15. BELTRAMO ANTONIO RE, «FACCIATA DEL PALAZZO DEL PRINCIPE DI CARIGNANO» 1753. (BRT, BR III, 258)  
 LA RAPPRESENTAZIONE RIPRESA DA QUELLA GUARINIANA, RIPROPONE IL CORNICIONE SPEZZATO; IL TETTO È DISEGNATO IN MODO SCHEMATICO E RACCORDATO IN CURVA AL VOLUME CHE LO SOVRASTA.

L'incisione di Sclopis del Borgo di Figura 16, invece, riprende esattamente, per quanto riguarda l'opera del Guarini, l'immagine del Borra.



**FIGURA 16. IGNAZIO SCLOPIS DEL BORGO, «PALAZZO DEL PRINCIPE DI CARIGNANO», CIRCA 1775 (GALLERIA SABAUDA TORINO, N.2484; MA TRATTA DI PEYROT E VIALE, IMMAGINI CIT.) VI È RIPRESA FEDELMENTE LA RAPPRESENTAZIONE DI BORRA SALVO L'INSERIMENTO DEL PALAZZO IN PRIMO PIANO, CHE CONTIENE IL TEATRO CARIGNANO.**

Una delle poche testimonianze che attestino lo stato e la configurazione della facciata principale prospiciente a Piazza Carignano è un disegno di Giovanni Battista Ferroggio di Figura 17, per l'illuminazione dell'edificio in occasione della solenne entrata della Principessa Maria Ferdinanda di Spagna, giunta a palazzo per i festeggiamenti tenuti nel salone in seguito alle sue nozze con Vittorio Amedeo III tenutesi nel 1750. Lo sviluppo del prospetto è limitato alla quota del cornicione e non si hanno quindi indicazioni sull'andamento della copertura né sul padiglione emergente.



**FIGURA 17. GIOVANNI BATTISTA FERROGGIO, FACCIATA DEL PALAZZO DEL SIG. P. DI CARIGNANO, CON L'ILLUMINAZIONE DA FARSÌ AL MEDESIMO, ALL'OCCASIONE DELLE FESTE DI GIUBILO PER LA SOLENNE ENTRATA DELLA PRINCIPESSA, 1750**

### 2.3 Il palazzo nell'Ottocento

Con l'occupazione francese, seguita agli sconvolgimenti politici degli ultimi anni del Settecento, si era conclusa la fortuna del regno sabauda. Allontanati i Carignano e la loro corte, il palazzo fu occupato dal governo napoleonico che vi stabilì la prefettura del dipartimento del Po. Dopo la Restaurazione la famiglia Carignano riprese possesso della propria residenza nel maggio 1814 e vi rimase fino al 1831, anno dell'ascesa al trono di Carlo Alberto, dopo di che la proprietà passò al Demanio dello Stato, che ne detiene a tutt'oggi il titolo.

La situazione del palazzo prima dell'allontanamento definitivo dei Carignano è ben documentata dai disegni di Benedetto Cantello (Figura 18, 19, 20) e di Ferdinando Bonsignore (Figure da 21 a 24). Il primo ha eseguito i prospetti verso la piazza, verso il cortile e verso mezzogiorno, al secondo sono attribuiti i rilievi di pianta a tutti i livelli dell'edificio. Si ha motivo di ritenere che questi documenti archiviati come «Rilievi di Cantello e Bonsignore-1818» non siano di esecuzione contemporanea, infatti, nei rilievi di Cantello, è leggibile la data 1807.

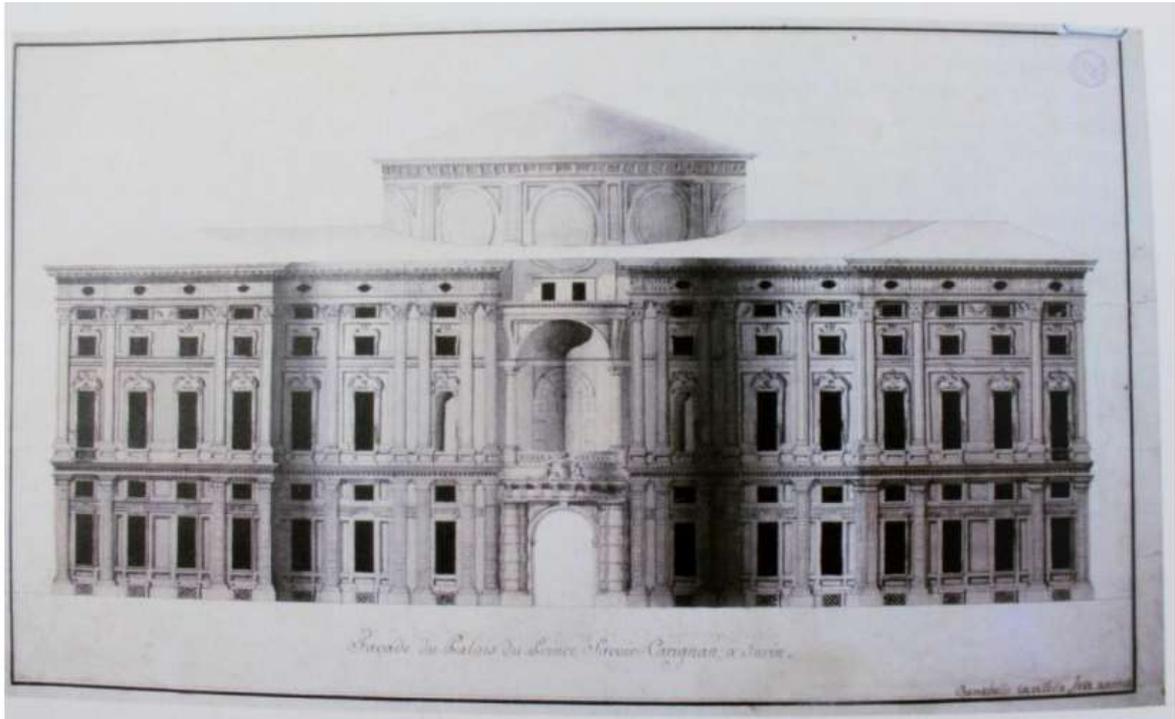


FIGURA 18. BENEDETTO CANTELLO, «FAÇADE DU PALAIS DU PRINCE SAVOIE-CARIGNAN À TURIN» 1807. (BRT, S VIII,114). IL RILIEVO CONFERMA L'ESISTENZA DEI BALCONCINI ALLE ESTREMITÀ LATERALI DEL PIANO NOBILE. IL TETTO, INDICATO SCHEMATICAMENTE, TAGLIA LA FORMA DEI FINESTRONI OVALI.

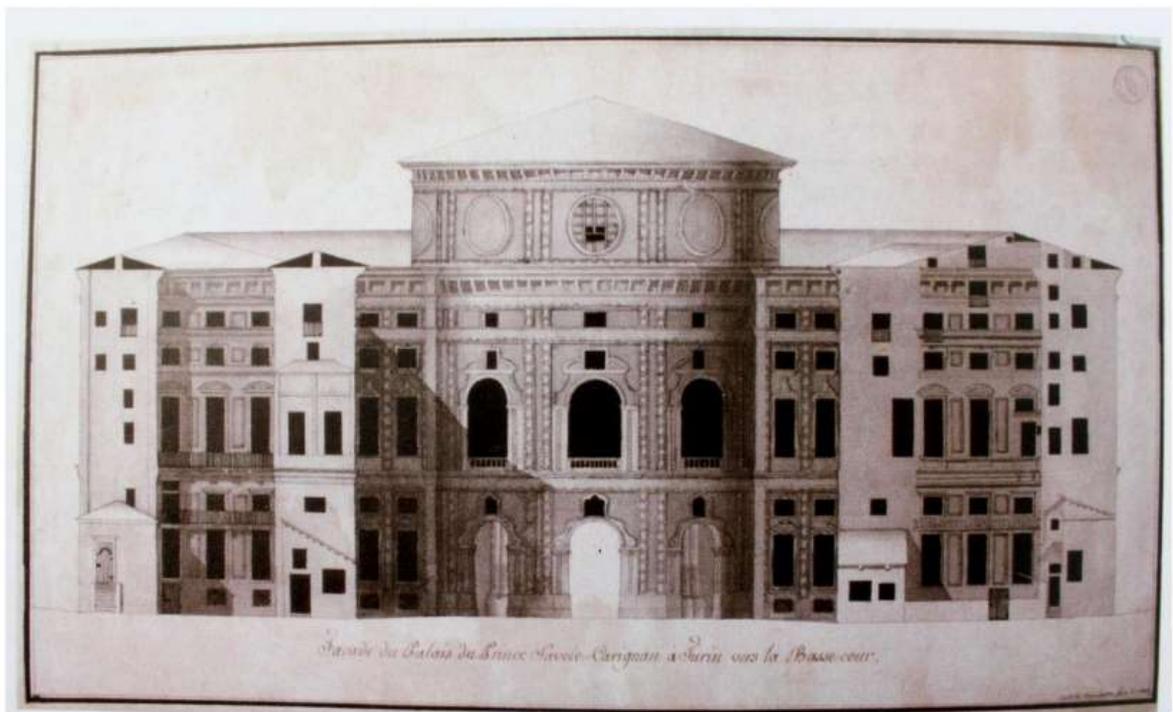


FIGURA 19. BENEDETTO CANTELLO, «FAÇADE DU PALAIS DU PRINCE SAVOIE-CARIGNAN À TURIN VERS LA BASSE-COUR» 1807. (BRT, S VIII,114).

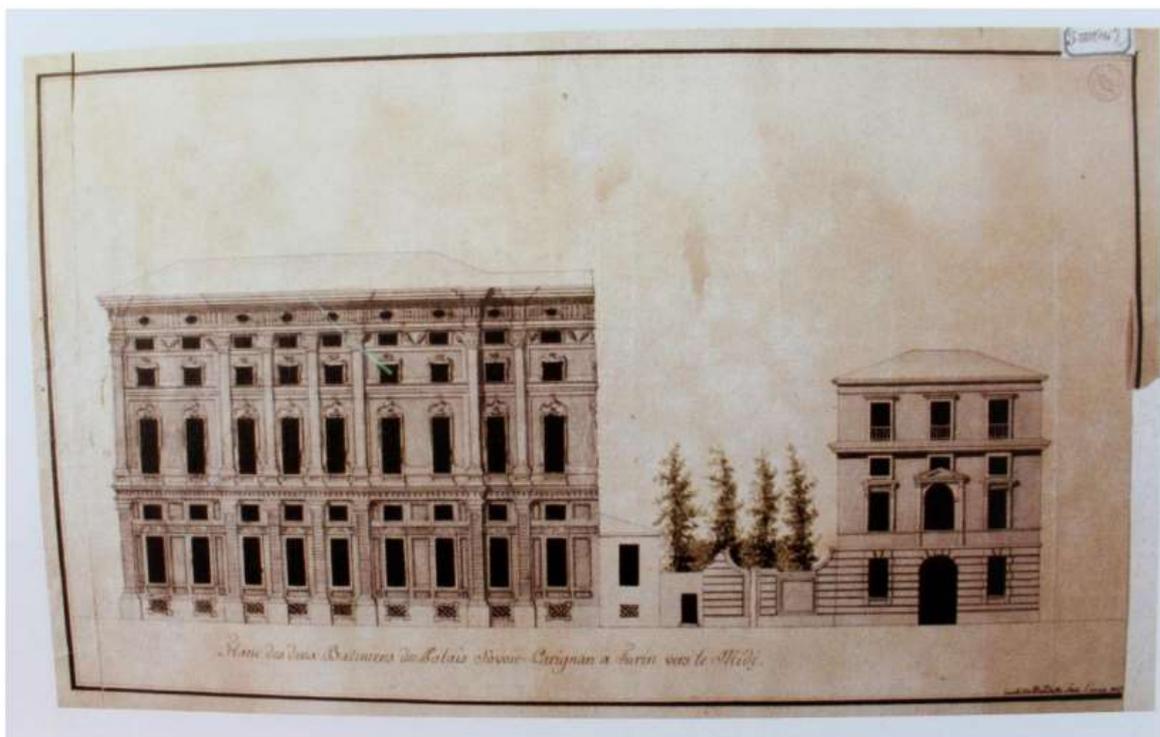


FIGURA 20. BENEDETTO CANTELLO, «FLANCS DES DEUX BATIMENTS DU PRINCE SAVOIE-CARIGNAN À TURIN VERS LE MIDI» 1807. (BRT, S VIII, 114).

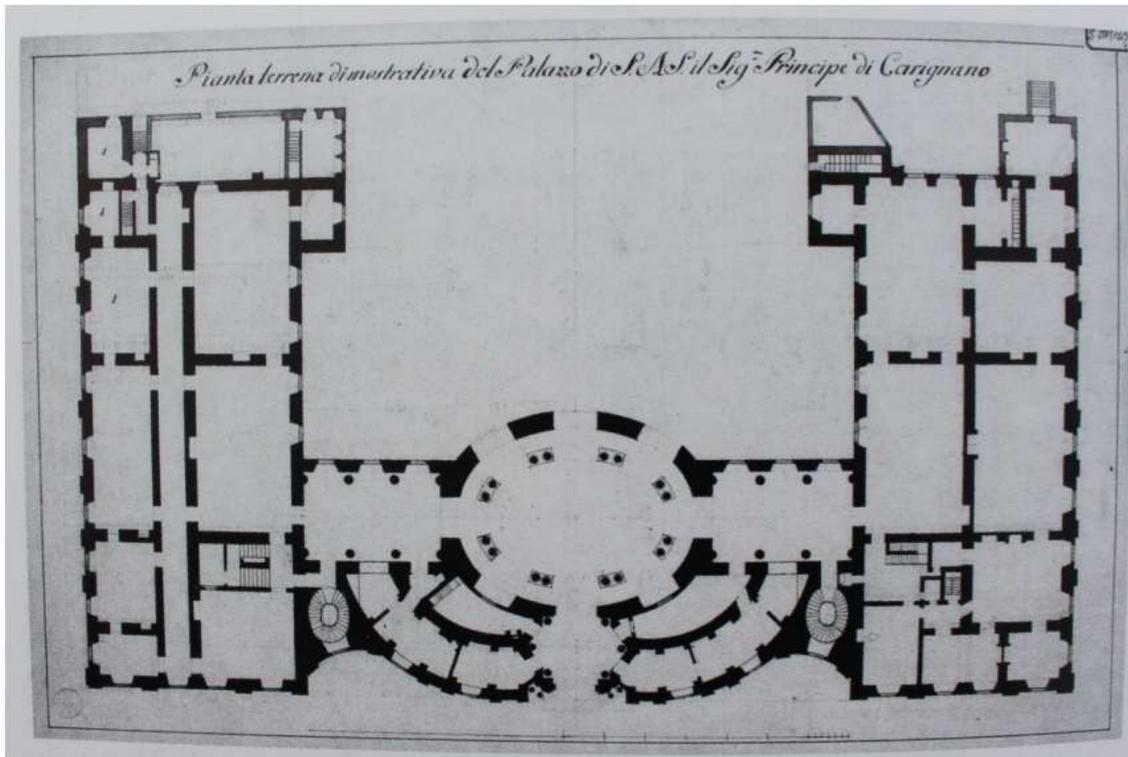


FIGURA 21 . FERDINANDO BONSIGNORE, «PIANTA TERRENA DEL PALAZZO DEL SIG. PRINCIPE DI CARIGNANO», S.D. [1818?]. (BRT, S VIII,114). I CORPI AGGIUNTIVI VERSO LEVANTE SONO DISEGNATI CON CAMPITURE PIÙ CHIARE.

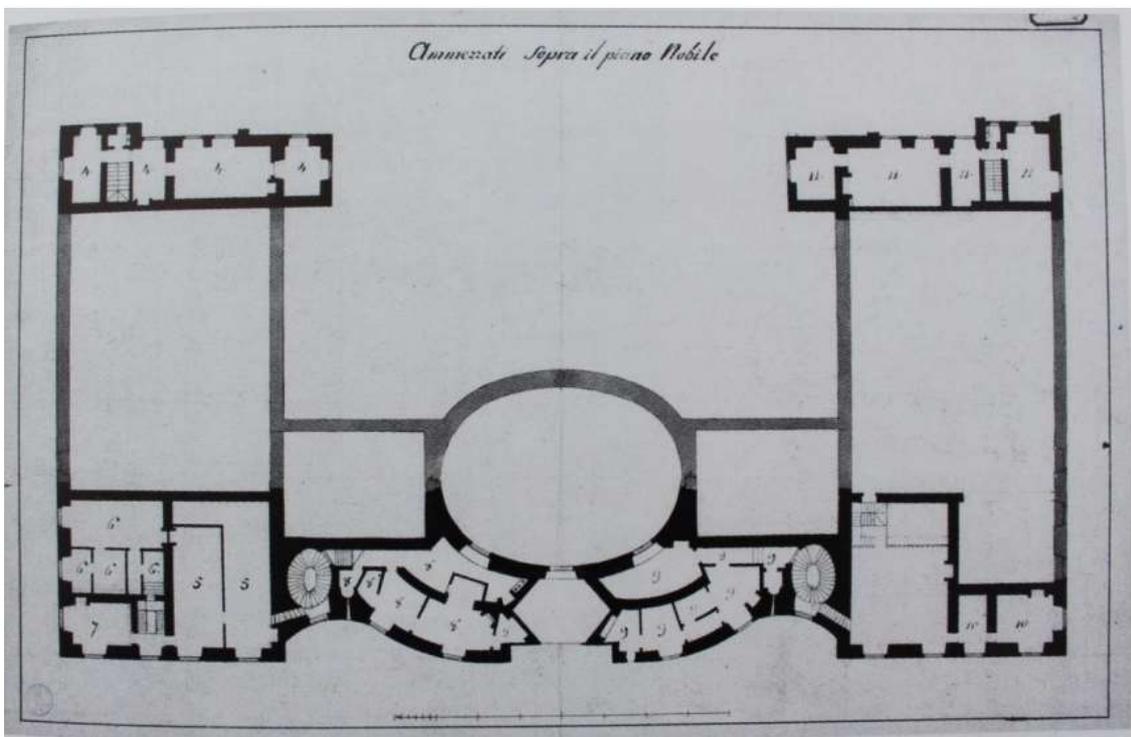


FIGURA 22. FERDINANDO BONSIGNORE, «AMMEZZATI SOPRA IL PIANO NOBILE», S.D. [1818?]. (BRT, S VIII,114).

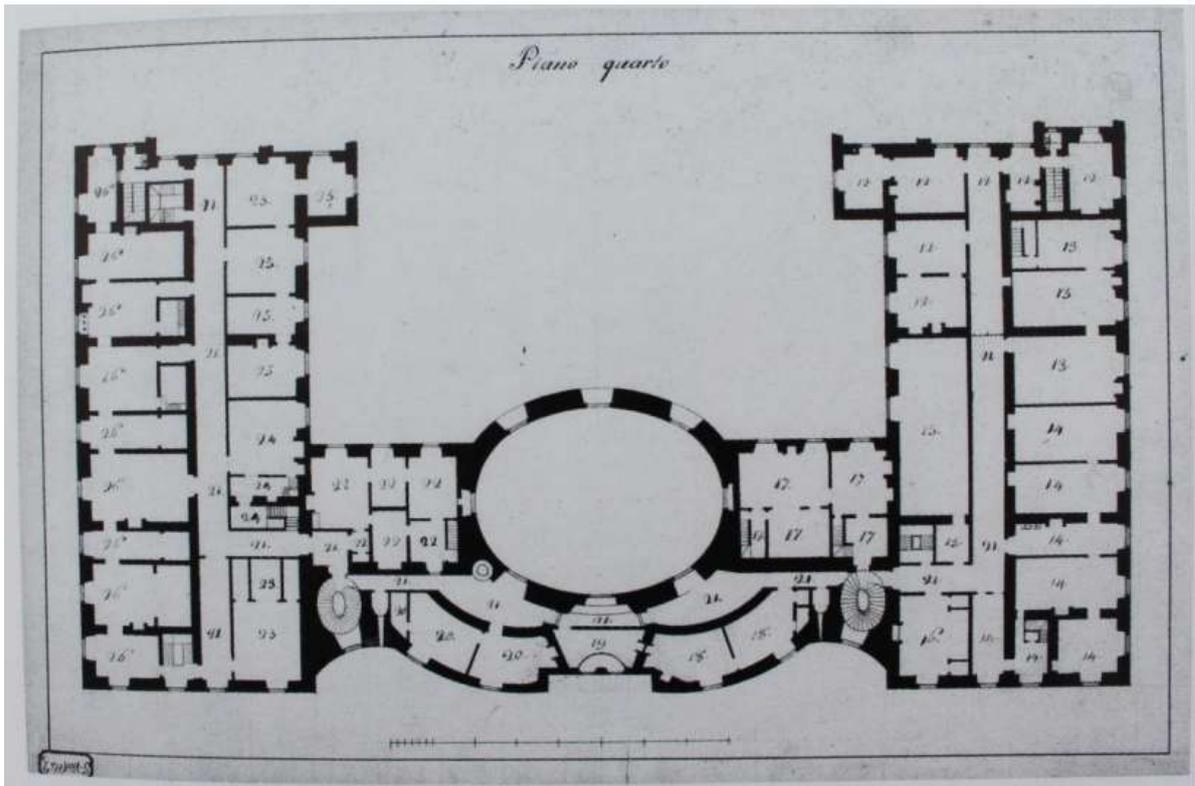


FIGURA 23. FERDINANDO BONSIGNORE, «PIANO QUARTO», S. F., S.D. [1818?]. (BRT, S VIII,114).

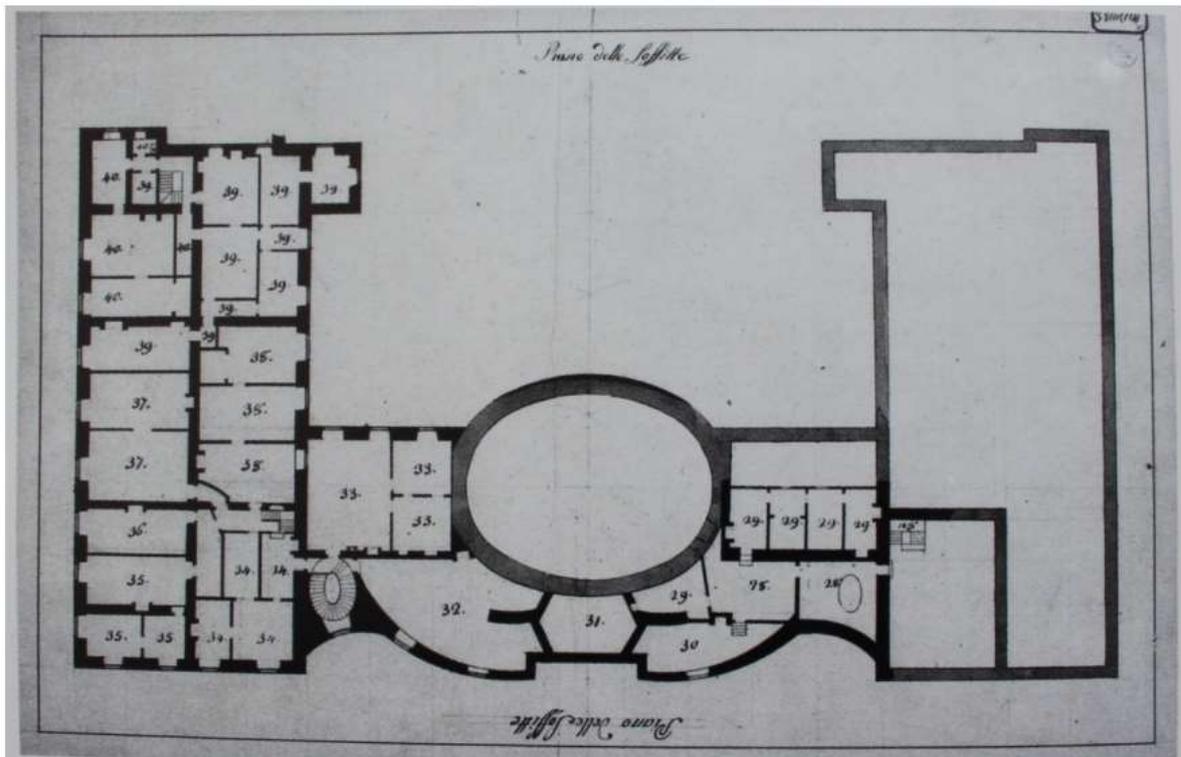


FIGURA 24. FERDINANDO BONSIGNORE, «PIANO DELLE SOFFITTE», S.D. [1818?]. (BRT, S VIII,114).

Altre interpretazioni sull'aspetto della facciata, non sempre coerenti tra di loro, sono date dalle incisioni ottocentesche. Al 1817 è datata quella di Zanconi su disegno di A. J. Moutier di Figura 25. Qui la facciata appare di scorcio. La partitura architettonica è rispettata, il cornicione è interrotto al di sopra del nicchione centrale e si indovina un terrazzino ricavato dall' arretramento della muratura, coperto da una falda fortemente aggettante. Abbaini e camini sovrastano il filo e il volume sopraelevato è disegnato accuratamente, per la parte che la veduta prospettica consente di apprezzare. L'osservazione di queste immagini è utile da confrontare con i rilievi di Cantello dell'inizio dell'Ottocento, e con la fotografia riprodotta in una guida di fine secolo (Figura 26).



**FIGURA 25 A.J. MOUTIER, «PIAZZA CARIGNANO IN TORINO» INCISIONE IN RAME DI ZANCONI, 1817. (IN RACCOLTA DI DODICI PRINCIPALI VEDUTE DI TORINO DEDICATE A SUA ECCELLENZA IL SIG. MARCHESE THAON DI REVEL..., EDITORI FRATELLI REYCEND E COMP., LIBRAI DI S.S.R.M. IN TORINO).**



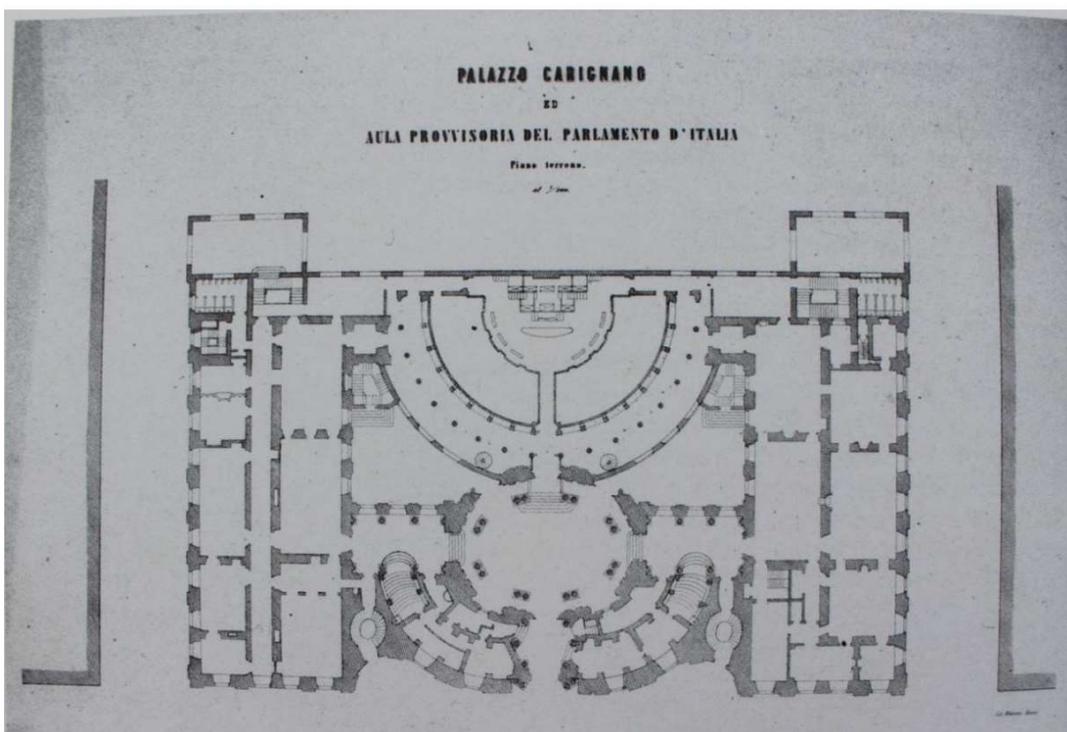
**FIGURA 26. FACCIATA DEL PALAZZO RIPRODOTTA IN UNA GUIDA DI FINE 1800**

### 2.3.1 Le opere di adattamento

Nel 1831, Carlo Alberto, divenuto re di Sardegna, si trasferì a Palazzo Reale cedendo al demanio la proprietà di Palazzo Carignano. Il salone del palazzo guariniano divenne sede del Consiglio di Stato, che Carlo Alberto aveva istituito nel 1831, ed altri locali furono destinati a funzioni governative.

Il 4 marzo 1848, in Piemonte, avviene il passaggio dall' assolutismo della monarchia alla riforma democratica. Torino diveniva di diritto il centro delle attività governative, la Camera dei deputati ed il Senato. Quest'ultimo trovò sede a Palazzo Madama mentre la Camera, il Parlamento Subalpino, venne insediato a Palazzo Carignano. Furono necessarie le opere di adattamento tra cui quello del salone ad aula parlamentare. Dei lavori, di cui non si sono riusciti a reperire i progetti, venne incaricato Carlo Sada, architetto di fiducia di Carlo Alberto. L'aula venne aperta l'8 maggio 1848 con qualche ulteriore aggiustatura già nel 1852, ma senza variazioni strutturali rilevanti.

La situazione di dissesto nelle mura dell'aula parlamentare, iniziò a manifestarsi sin dal 1853 e nel 1857 vennero realizzati interventi di consolidamento su progetto dell'ingegner Amedeo Peyron. La soluzione del problema statico non era però sufficiente a risolvere il problema dell'insufficienza funzionale dell'aula. Si fece ricorso, perciò, alla costruzione di un palazzo apposito, in ampliamento all'esistente. L'aula provvisoria, progettata e costruita con una struttura in ferro fu inaugurata il 18 febbraio 1861 con la prima seduta del nuovo Parlamento italiano. L'aspetto dell'aula è documentato da diversi disegni (Figure da 27 a 31).



**FIGURA 27. AMEDEO PEYRON, «PALAZZO CARIGNANO ED AULA PROVVISORIA DEL PARLAMENTO D' ITALIA». PIANOTERRENO 1861 (ARCHIVIO PRIVATO).**

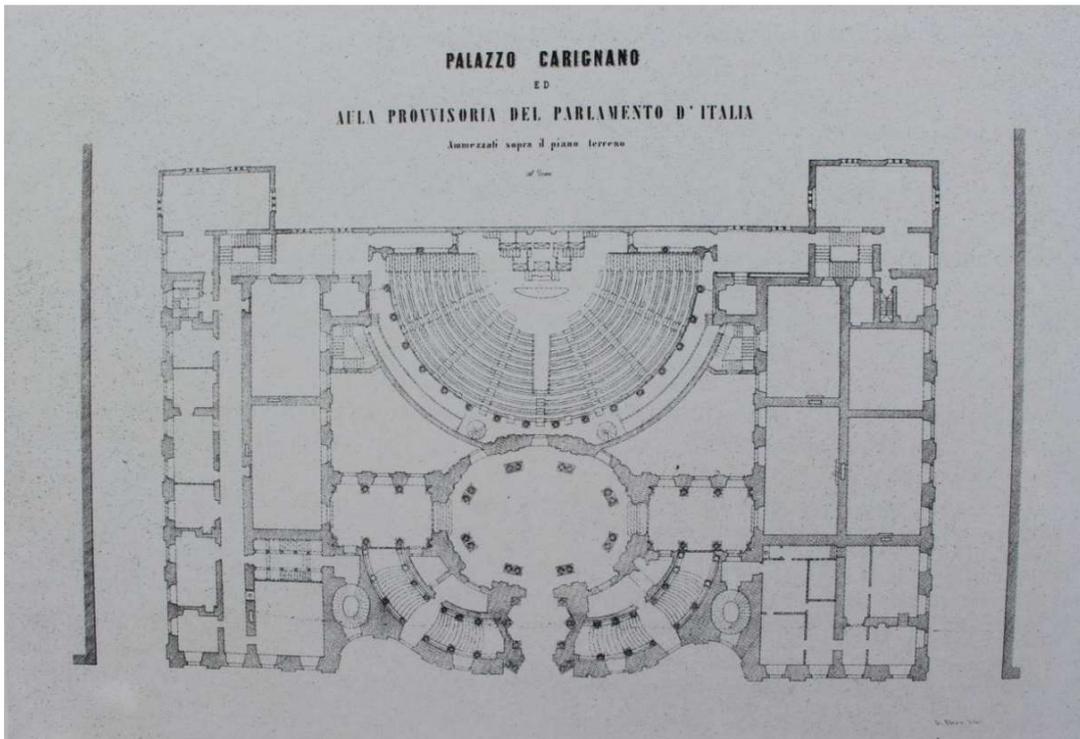


FIGURA 28. AMEDEO PEYRON, «PALAZZO CARIGNANO ED AULA PROVVISORIA DEL PARLAMENTO D' ITALIA». PIANO DEGLI AMMEZZATI

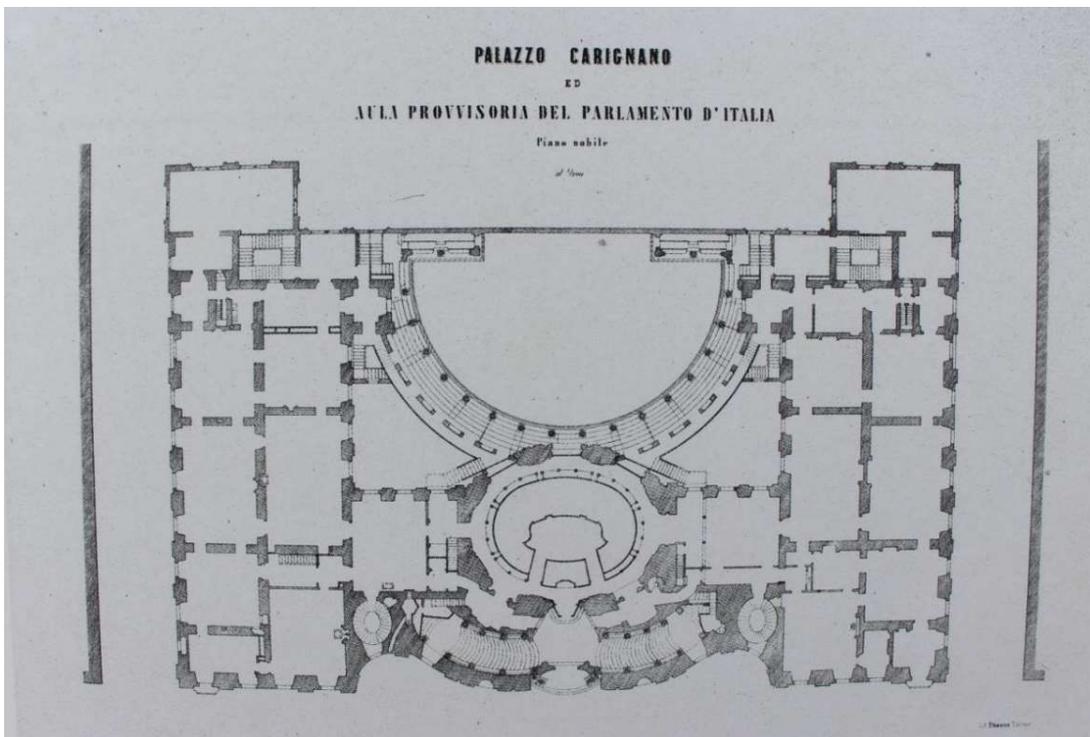
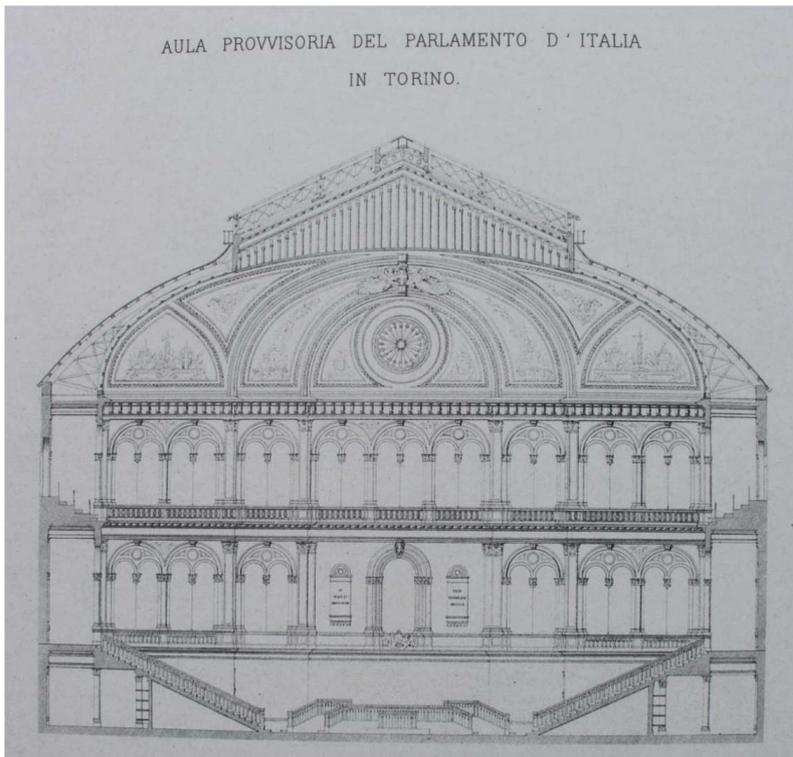
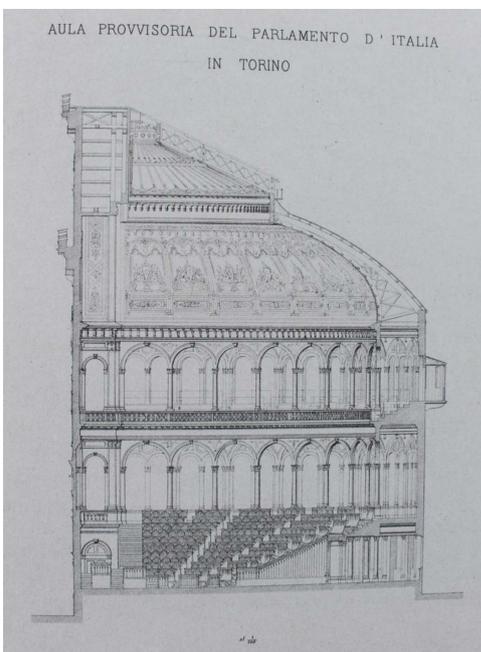


FIGURA 29. AMEDEO PEYRON, «PALAZZO CARIGNANO ED AULA PROVVISORIA DEL PARLAMENTO D' ITALIA». PIANO NOBILE 1861 (ARCHIVIO PRIVATO)

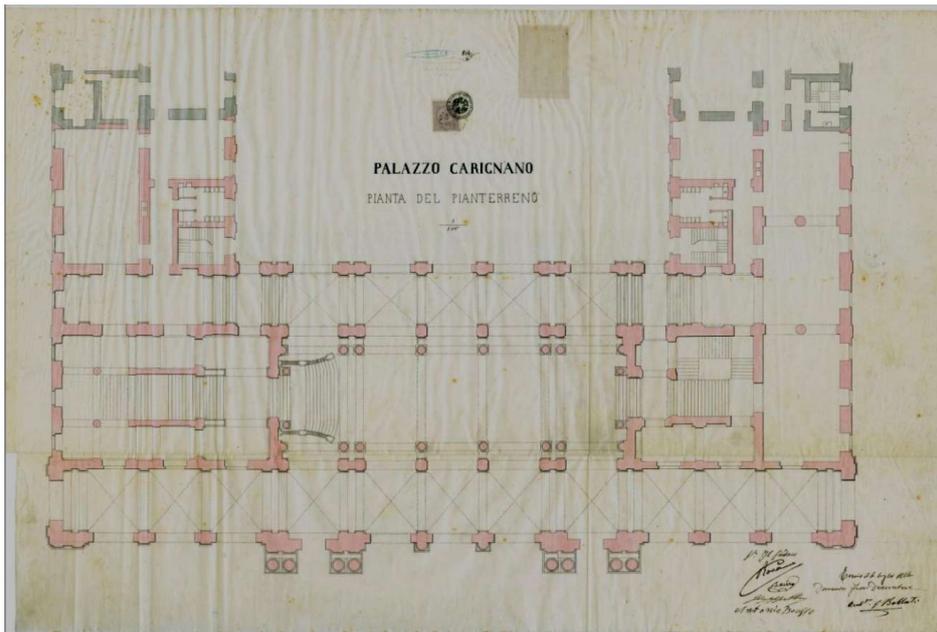


**FIGURA 30. AMEDEO PEYRON, «PALAZZO CARIGNANO ED AULA PROVVISORIA DEL PARLAMENTO D' ITALIA». SEZIONE LONGITUDINALE DELL'AULA 1861 (ARCHIVIO PRIVATO).**



**FIGURA 31. AMEDEO PEYRON, «PALAZZO CARIGNANO ED AULA PROVVISORIA DEL PARLAMENTO D' ITALIA». SEZIONE TRASVERSALE DELL'AULA 1861 (ARCHIVIO PRIVATO).**

Per la costruzione definitiva della nuova sede del Parlamento italiano, non fu indetta una gara. Molti progettisti si erano cimentati a studiare diverse soluzioni in ampliamento al palazzo regalando così, ciascuno la propria proposta alla città. Tra molti progetti presentati la giunta cittadina decise di appoggiare una nuova soluzione presentata da Domenico Ferri e Giuseppe Bollati raffigurata nelle Figure da 32 a 34 . In seguito alla prima stesura del progetto risalente al 1863, si deliberò di costruire una nuova ala che contenesse una sala di 35x20 metri e i necessari locali annessi. Il 2 gennaio 1864 venne presentato ed approvato il nuovo progetto.



**FIGURA 32. GIUSEPPE BOLLATI, DOMENICO FERRI, «PALAZZO CARIGNANO, PIANTE DEL PIANTERRENO», 16 LUGLIO 1864 SCALA 1:100(ASCT, DISEGNI VOL.6, CART. 24).**

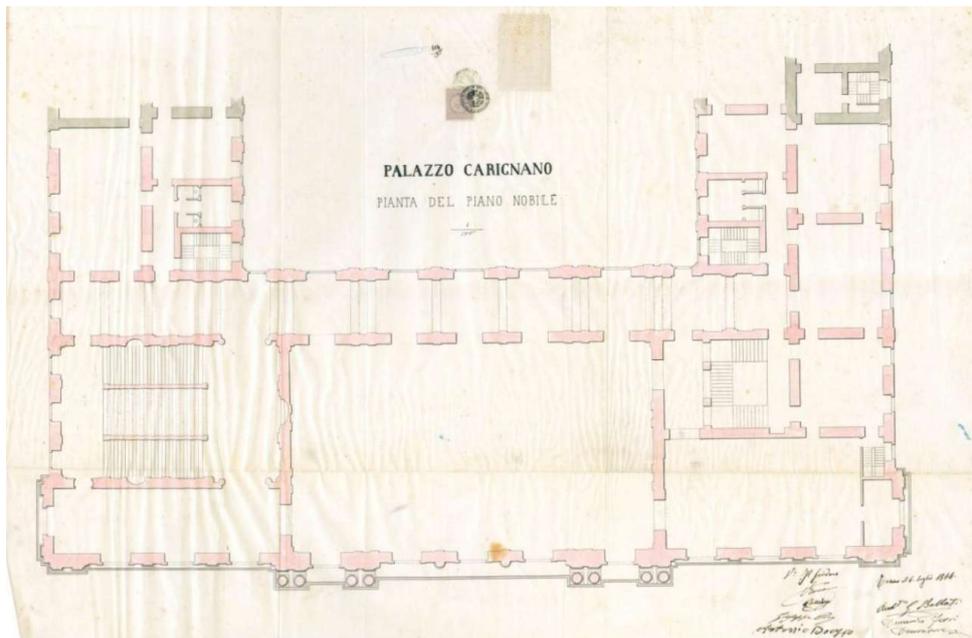


FIGURA 33. GIUSEPPE BOLLATI, DOMENICO FERRI, «PALAZZO CARIGNANO, PIANTE DEL PIANO NOBILE», 16 LUGLIO 1864 SCALA 1:100 (ASCT, DISEGNI VOL.6, CART. 24)



FIGURA 34. «PROSPETTO VERSO LA PIAZZA CARLO ALBERTO», 1860, RIPRODUZIONE FOTOGRAFICA. (ASCT, DISEGNI VOL.6, CART. 24).

La tanto desiderata aula del Parlamento non entrò mai in uso perché, nel 1865, Torino cessò la funzione di capitale del Regno d'Italia lasciando il posto a Firenze.

Nacquero i primi problemi di riutilizzo del palazzo. I locali del quarto piano e del tetto, ed altri simili aventi accesso dalle scalette a chiocciola, vennero affittati a privati inquilini. L'intenzione di collocare nel Palazzo il Museo Egizio, il Museo Civico e la Pinacoteca governativa non ebbe attuazione. Di fatto, a partire dal 1876, saranno insediati nell'edificio i Musei di Zoologia e Mineralogia e le facoltà di Geologia, Paleontologia e Anatomia comparata. Ai due musei erano assegnati il primo ed il secondo piano con la realizzazione dei corridoi centrali di disimpegno e la costruzione di tramezzi, mentre al pianterreno era assegnata la funzione di alloggi per gli addetti ai musei.

## 2.4 Il progressivo declino e i nuovi progetti del '900

Passato il periodo dei grandi progetti e delle grandi trasformazioni, il palazzo cominciò a presentare quei problemi di manutenzione che, aggravati dalla frammentarietà e dall'alternanza delle diverse destinazioni d'uso, sarebbero stati causa del suo progressivo declino. Ad aggravare la situazione il palazzo è messo alla prova dai bombardamenti del secondo conflitto mondiale. Infatti, si rilevano innumerevoli danni alla copertura e incendi. Durante i due bombardamenti notturni dell'estate del 1943, entrambi ad opera della RAF, il palazzo riportò danni riguardanti la copertura, i lucernai e gli infissi (Figure da 35 a 38).



**FIGURA 35. I DANNI PRODOTTI DAI BOMBARDAMENTI DEL 13 AGOSTO 1943 ALLE STRUTTURE DELLO SCALONE OTTOCENTESCO. (SBAAP, ARCH. FOT.)**



FIGURA 36. I DANNI PRODOTTI DAI BOMBARDAMENTI DEL 13 ALLA COPERTURA (SBAAP, ARCH. FOT.)



FIGURA 37. LA DISTRUZIONE DELLA COPERTURA NELLA ZONA MERIDIONALE DELL'ALA OTTOCENTESCA. (SBAAP, ARCH. FOT.)



**FIGURA 38. LA DISTRUZIONE DELL'ULTIMO SOLAIO NELLA ZONA MERIDIONALE DELL'ALA OTTOCENTESCA. (SBAAP, ARCH. FOT.)**

I danni non interessarono gli elementi portanti e per l'intero lasso di tempo compreso tra il 1890 e il 1980 non si sono modificate in alcun modo le strutture portanti. Infatti, le opere maggiori riguardano la demolizione di tramezzi e sopralchi e consolidamento di volte e solai.

Nel febbraio del 1980, i tecnici incaricati dalla Regione per la ricognizione delle strutture, presentarono una relazione sulla situazione statica del tetto e dei solai sottotetto dell'ala seicentesca. Veniva evidenziato lo stato di precarietà generale delle strutture. Gli otto gruppi di colonne binate dell'androne di entrata del Palazzo Carignano presentano da tempo fenomeni di degrado e di ammaloramento tali da costituire motivo di grande preoccupazione. I fenomeni di deformazione e fessurazione consistono in fessurazioni delle lastre in pietra del rivestimento dei piedistalli e/o apertura di grosse lesioni in corrispondenza dei giunti, e in deformazioni e rotture, in corrispondenza dei basamenti delle colonne, e più precisamente nei tori e nei plinti. All'inizio di giugno si prevedeva di sostituire il tetto dell'ala seicentesca verso via Principe Amedeo con una nuova struttura in legno lamellare. I finestroni ovali sarebbero stati riaperti permettendo alla luce di penetrare all'interno e di illuminare, attraverso il lucernario, il sottostante salone.

#### 2.4.1 L'ultima trasformazione

Il progetto successivamente eseguito fu quello elaborato da Andrea Bruno il quale ha previsto il restauro generale dell'edificio compreso il rifacimento delle coperture, l'inserimento di nuovi corpi scala e la costruzione di una nuova sala ipogea per conferenze, una ridistribuzione funzionale degli spazi interni, con la realizzazione di due corpi scala, nuovi percorsi, uscite di sicurezza e impianti.

I materiali usati per l'adeguamento statico delle strutture del tetto e del sottotetto sono stati il legno lamellare, l'acciaio e il laterizio. La struttura della nuova copertura è stata realizzata in legno lamellare con bielle verticali in acciaio, il manto di copertura in coppi è stato mantenuto sostituendo solo gli elementi danneggiati, agli attacchi dell'ala ottocentesca in fase di rifacimento delle coperture, sono state inserite fasce vetrate che interrompono la continuità del manto di copertura, segnando così i punti di innesto di questa seconda fase costruttiva.

I nuovi solai di sottotetto sono stati realizzati con profili a caldo, lamiera zincata grecata e getto in calcestruzzo collaborante e utilizzando tecniche di risanamento delle parti in legno tramite resine e barre in fibra di vetro.

Le antiche travi state sostituite con profilati a caldo, in acciaio Fe360B tipo HE ed IPE. Sulle travi è stata appoggiata una lamiera zincata grecata che collabora strutturalmente con il getto di completamento in calcestruzzo. In altri casi data la fatiscenza dei solai originali, si è deciso di sostituire gli stessi integralmente con nuovi solai in acciaio.

Si è rivelato essere indispensabile il rifacimento dell'intera rete impiantistica, e la creazione di centrali aggiornate alle norme di sicurezza vigenti.

Fu anche necessario lo sbancamento completo del cortile fino a una profondità di 11 m. La volumetria consentì di realizzare un grande salone sotterraneo, pensato come fulcro di interazione tra il Museo del Risorgimento e gli organismi culturali circostanti (Museo Egizio, Galleria Sabauda, Teatro Carignano e la città).

#### 4. LO SCALONE GUARINIANO: UN'ANALISI STORICO-ARCHITETTONICA

*«Le scale sono le più difficili parti che abbia la casa di allogare, massime che Vitruvio non ne diede regola, se non delle loro salite». E, passando a forme più complesse, continua così: «Le scale a lumaca nel tondo o nell'ovato, benché da alcuni siano stimate men comode, se però la più stretta parte del gradino avrà proporzioni di uno a due, o almeno tre a cinque, sarà comodissima, e forse meglio che le scale uguali; perché agli uomini quelle talora sono troppo comode; onde sono obbligati a fare due gradini in una volta; ma in questa ognuno trova quel declive, che è più proprio al loro piede».*

Con questa citazione di Guarino Guarini tratta dalla prima edizione dell'Architettura Civile del 1686 si vuole introdurre l'importanza che il padre teatino attribuisce a questo elemento architettonico, quale lo scalone Guariniano di Palazzo Carignano, che, con morbide linee curve che definiscono l'andamento delle rampe e dei gradini permetteva di accedere alla sala da ballo della residenza della famiglia nobile dei principi di Carignano, un ramo dei Savoia. Questa scala rappresentava il potere e la grandezza della nobiltà dell'epoca, evidenziando il prestigio e la ricchezza della famiglia. Contribuiva alla cultura barocca di Torino, che era all'apice nel XVII secolo.

Il XVII secolo è stato un periodo di fervente creatività artistica e architettonica. Il Barocco era un movimento culturale che cercava di impressionare e stupire, spesso attraverso l'uso di forme complesse, illusioni ottiche, e l'abbondanza di decorazioni. L'architettura barocca, di cui lo Scalone Guariniano è un esempio distintivo, spesso cercava di combinare elementi religiosi e secolari.

L'uso di una pianta ellittica è una delle caratteristiche più distintive dello Scalone. Mentre la maggior parte delle scale è costruita con piani rettangolari, questa scala segue una forma ellittica, che le conferisce una sensazione di dinamismo e movimento. La scala è situata all'interno di una torretta a base ellittica illuminata da una grande cupola ellittica che permette l'ingresso della luce naturale, creando una atmosfera eterea e teatrale all'interno della scala. La luce naturale filtrante dalla cupola ellittica è un elemento iconografico importante. La luce è spesso associata alla divinità e alla conoscenza. La luce che penetra nella scala può simboleggiare l'illuminazione spirituale o la ricerca della verità.

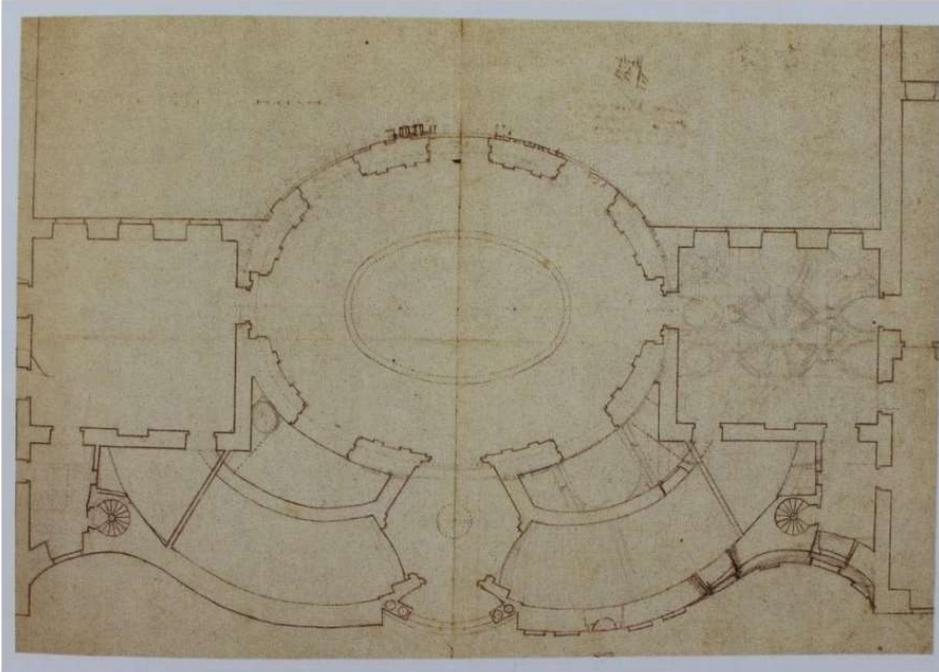


FIGURA 39. PIANTA DEL CORPO CENTRALE, S. F., S.D. (ASTR, AZ. SAVOIA - CARIGNANO, CAT.53, M.1, FASC.9) IL DISEGNO FA RIFERIMENTO ALLA PIANTA DEL PIANO NOBILE.

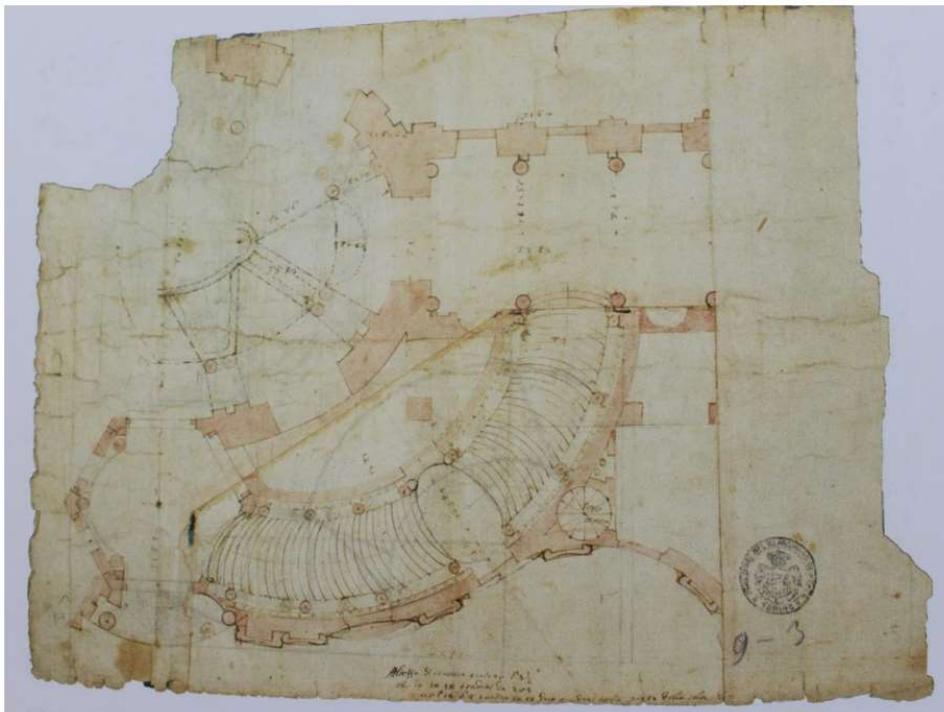


FIGURA 40. PIANTA DEL CORPO CENTRALE, DETTAGLIO, S. F. S.D. (ASTR, AZ. SAVOIA-CARIGNANO, CAT.53, M.1, FASC.9). È IL DISEGNO PIÙ COMPLETO DI TUTTI DAL PUNTO DI VISTA DELLE INFORMAZIONI RIPORTATE. SEPPUR POCO VISIBILI SONO PRESENTI QUOTE E NOTAZIONI; QUESTO STA A SIGNIFICARE CHE PUÒ ESSERE CONSIDERATO COME UN ELABORATO ESECUTIVO A TUTTI GLI EFFETTI PER LA COSTRUZIONE DELLE VOLTE DI COPERTURA DELL'ATRIO E DELLO SCALONE IN CURVA.

Illusioni ottiche, complessità geometrica e dettagli decorativi intricati lo rende un'opera d'arte architettonica unica nel suo genere. Guarini era noto per le sue abilità nel creare illusioni ottiche attraverso l'architettura. Lo Scalone presenta diverse illusioni, come il soffitto a cassettoni decorato con stucchi ricchi e dettagliati che sembrano sollevarsi verso il cielo. L'effetto di tridimensionalità è ulteriormente accentuato dalla luce che filtra dalla cupola ellittica, creando giochi di luce e ombra. La geometria è estremamente complessa. Con una serie di archi, curve, colonne e capitelli decorati. I dettagli architettonici sono ricchi e elaborati, con un forte senso di asimmetria e una profusione di forme decorative.

### 3.1 I materiali utilizzati e le iconografie

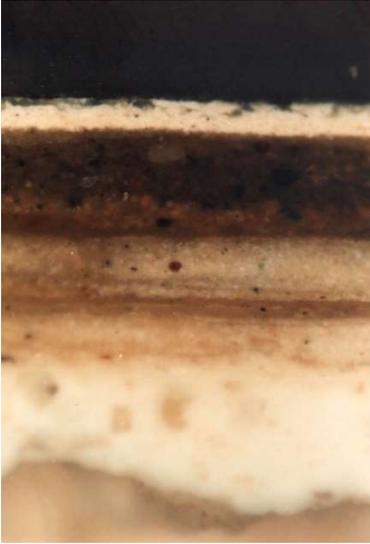
Nella costruzione dello Scalone Guariniano, sono stati utilizzati materiali di alta qualità, tra cui marmo, stucco, legno scolpito e dorature.

Il marmo è uno dei materiali predominanti nella costruzione dello Scalone Guariniano. È stato impiegato per pavimenti, colonne, pareti e altri elementi decorativi. Questo veniva spesso scolpito e intagliato con dettagli intricati per aggiungere ricchezza e bellezza all'architettura.

Il legno scolpito è stato utilizzato per creare dettagli decorativi su porte, cornici, corrimano delle scale e altri elementi interni. Questi dettagli erano spesso finemente lavorati con motivi floreali o figurativi.

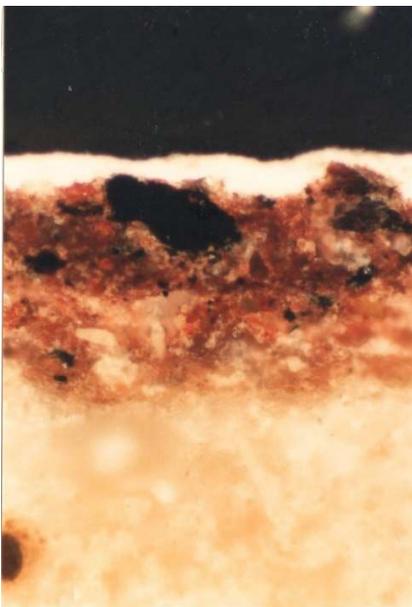
L'oro e le dorature sono stati ampiamente utilizzati per decorare i dettagli architettonici e gli ornamenti, conferendo un aspetto sfarzoso e lussuoso all'opera. In alcuni casi, sono state utilizzate pietre semipreziose per inserire dettagli decorativi all'interno del marmo o dello stucco, aggiungendo una dimensione di lusso e ricchezza.

Intonaci e stucchi sono stati utilizzati per creare dettagli ornamentali sulle pareti e sui soffitti. Gli stucchi erano spesso modellati in forme elaborate, come arabeschi, putti, e altri motivi decorativi, contribuendo così alla complessità visiva dell'opera. A tal proposito si vogliono riportare le analisi chimico-stratigrafiche degli stucchi e degli intonaci condotte nel 1987 dalla *Diagnostica dei beni culturali*. Su questi campioni sono state eseguite diverse analisi allo scopo di determinare la natura dei materiali costitutivi, eventuali prodotti di alterazione e successioni stratigrafiche. Sono state effettuate analisi in spettrofotometria IR che permettono di misurare l'assorbanza o la trasmittanza di una sostanza chimica in funzione della lunghezza d'onda della luce. Questa tecnica si basa sul principio che le diverse sostanze chimiche assorbono la luce in modo diverso in funzione della loro composizione chimica e della lunghezza d'onda della luce. Analisi in diffrattometria sono state utilizzate per studiare la struttura cristallina dei materiali. Esse sfruttano il principio della diffrazione delle onde, in particolare delle onde elettromagnetiche come i raggi X o i raggi gamma. Questa tecnica è ampiamente utilizzata in diverse discipline scientifiche, tra cui la chimica, la fisica, la geologia, la scienza dei materiali e la biologia cristallografica. Riguardo l'analisi prettamente chimica e morfologica delle superfici dei campioni è stata utilizzata l'analisi con microsonda a dispersione di energia spettroscopica (SEM-EDS). Questa tecnica combina il microscopio elettronico a scansione (SEM) con uno spettrometro a dispersione di energia (EDS), consentendo di eseguire misurazioni quantitativamente precise sugli elementi chimici presenti in un campione.



**FIGURA 41. SEZIONE STRATIGRAFICA DEGLI STUCCHI; MICROSCOPIA OTTICA E ANALISI CON MICROSONDA ELETTRONICA. DAL BASSO VERSO L' ALTO:**

- SUPPORTO DI INTONACHINO A BASE DI CALCE ED INERTI DI VARIA NATURA
- STRATO DI GESSO E POCA COLLA, CON RARI INCLUSI DI OSSIDO DI FERRO IDRATO (GOETHITE)
- STRATO DI GESSO E COLLA, DI COLORE GIALLO BRUNO, CON RARE DISPERSIONI DI OCRA ROSSA
- STRATO DI GESSO E PARTICELLE DI OCRA ROSSA E RARE PARTICELLE DI PIGMENTO VERDE
- STRATO DI OCRA BRUNA, GESSO, OSSIDI DI FERRO E IMPUREZZE DI PARTICELLE VERDI
- STRATO IN BIANCO DI TITANIO



**FIGURA 42. SEZIONE STRATIGRAFICA DEGLI INTONACI; MICROSCOPIA OTTICA E ANALISI CON MICROSONDA ELETTRONICA. DAL BASSO VERSO L' ALTO:**

- STRATO DI GESSO E CALCE CON QUALCHE INERTE CARBONATICO E SILICATICO
- STRATO DI OCRA ROSSA FRAMMISTA A GESSO, CON PARTICELLE DI NERO CARBONE E INCLUSI DI QUARZO
- STRATO DI GESSO E QUALCHE INCLUSO SILICATICO-QUARZOSO

Le decorazioni dello Scalone Guariniano sono ricche di iconografia, simboli e motivi ornamentali che hanno un significato specifico. Questi elementi decorativi sono stati accuratamente selezionati da Guarino Guarini per comunicare messaggi culturali, religiosi e politici. Gli stucchi che decorano lo Scalone includono numerose raffigurazioni di angeli e putti, che sono figure angeliche della tradizione cristiana. Questi simboli rappresentano la spiritualità, la protezione e la guida divina.

Ghirlande di fiori e festoni erano spesso utilizzati nel Barocco come simbolo di abbondanza, fertilità e vita. Nel contesto del Palazzo Carignano, potrebbero anche simboleggiare la prosperità e la ricchezza della famiglia nobile.

Le decorazioni floreali e le foglie sono comuni nel Barocco e rappresentano la natura e la vita. Nel contesto dello Scalone Guariniano, potrebbero riflettere l'abbondante giardino della residenza nobile.

Alcuni stucchi mostrano stelle e simboli astrali, che potrebbero simboleggiare l'ordine cosmico e la connessione tra il terreno e il divino.

Nelle decorazioni sono presenti anche raffigurazioni di santi, riflettendo la forte componente religiosa dell'epoca. Queste immagini potrebbero rappresentare la protezione spirituale e la devozione della famiglia nobile.



**FIGURA 43. L'UTILIZZO DI INTONACI E STUCCHI PER CREARE DETTAGLI ORNAMENTALI SULLE PARETI E SUI SOFFITTI.**

## 3.2 La preservazione dello Scalone Guariniano

La preservazione dello Scalone Guariniano richiede un impegno costante da parte delle autorità, delle istituzioni culturali e della comunità per garantire che questa straordinaria opera d'arte architettonica continui a ispirare e meravigliare le persone nei secoli a venire. Mantenere un ambiente interno stabile è cruciale. Ciò include il controllo dell'umidità, della temperatura e della qualità dell'aria all'interno del Palazzo Carignano. Questi fattori possono influenzare il deterioramento dei materiali e delle decorazioni. Il restauro e la pulizia regolare delle decorazioni sono fondamentali per preservare l'aspetto originale dello Scalone. Tuttavia, è essenziale che questi lavori siano effettuati da esperti in conservazione che rispettino la storicità dell'opera.

Se ci sono parti dell'opera che hanno subito danni significativi o che sono andate perse, è possibile pianificare restauri mirati per ripristinare la forma originale. Questi lavori dovrebbero essere basati su documentazione storica accurata e eseguiti da specialisti qualificati.

Informare il pubblico sull'importanza della preservazione e sulla storia dello Scalone Guariniano può contribuire a sensibilizzare le persone sulla necessità di trattare con rispetto questa opera d'arte. Assicurare finanziamenti adeguati per il mantenimento e la conservazione dello Scalone è essenziale. Questi fondi possono provenire da fonti governative, donazioni private e organizzazioni culturali.

Spesso, opere d'arte di importanza internazionale come lo Scalone Guariniano beneficiano della collaborazione tra istituzioni culturali e esperti provenienti da tutto il mondo. Questa collaborazione può portare a una migliore comprensione e preservazione dell'opera. Mantenere una documentazione accurata di tutti i lavori di conservazione, restauro e pulizia è essenziale. Questa documentazione può servire come riferimento per future generazioni e per coloro che si occupano della conservazione.

Il monitoraggio regolare delle condizioni fisiche dello Scalone è essenziale. Questo può essere fatto tramite ispezioni visive, analisi fotografiche e documentazione dettagliata. Le piccole crepe, il degrado dei materiali e altri segni di danneggiamento devono essere individuati e affrontati prontamente. La struttura dell'edificio dovrebbe essere valutata per determinare se ci sono falle o problemi strutturali che potrebbero consentire l'ingresso di acqua piovana o umidità. Il tetto, le finestre e le pareti esterne devono essere ben mantenuti per proteggere l'interno. In tal senso, l'utilizzo del Heritage Building Information Modeling (HBIM) è un approccio innovativo alla conservazione del patrimonio che offre numerosi vantaggi. Esso è una metodologia digitale che consente la creazione, la gestione e l'analisi di modelli 3D dettagliati di edifici e infrastrutture. Consente la creazione di modelli digitali dettagliati di edifici storici. Questi modelli includono non solo la geometria dell'edificio, ma anche informazioni sulle strutture, i materiali, le finiture e le componenti. Questa documentazione accurata è fondamentale per comprendere appieno la struttura e lo stato dell'edificio.

Utilizzando il BIM, è possibile eseguire analisi dettagliate dello stato di conservazione dell'edificio. Questo include la valutazione della struttura, il rilevamento di danni, la corrosione e il degrado dei materiali. Queste informazioni aiutano nella pianificazione di interventi di restauro e conservazione.

Facilita la progettazione e la pianificazione dei lavori di restauro. Gli architetti e gli ingegneri possono utilizzare il modello BIM per testare diverse opzioni di restauro, simulare gli effetti delle modifiche e pianificare i tempi e i costi dei lavori. Può includere documentazione storica e fotografie dell'edificio nel corso degli anni. Questo consente di tracciare l'evoluzione dell'edificio nel tempo e di comprendere meglio la sua storia.

In alcuni casi, i sensori possono essere integrati nel modello BIM per monitorare in tempo reale le condizioni dell'edificio, inclusi parametri come la temperatura, l'umidità e le vibrazioni. Questo monitoraggio può

rivelare i cambiamenti nel tempo e avvertire in caso di problemi. Può ridurre i costi e accelerare i progetti di restauro. La pianificazione accurata e la simulazione delle modifiche possono ridurre il rischio di costi imprevisti e ritardi nei lavori.

Favorisce la collaborazione tra diverse figure professionali coinvolte nella conservazione, come architetti, ingegneri, storici dell'arte e conservatori in quanto tutti possono accedere allo stesso modello e condividere informazioni in tempo reale.

L'utilizzo del BIM per la preservazione dei beni architettonici è, quindi, un importante passo avanti nell'approccio alla conservazione del patrimonio. Fornisce un quadro completo e dettagliato dei beni architettonici storici, migliorando la loro conservazione a lungo termine e la comprensione della loro storia e importanza culturale.

## 5. LA MODELLAZIONE STRUTTURALE CON REVIT

L'analisi storica eseguita correlata di planimetrie e sezioni, è stata fondamentale per la realizzazione del modello, unitamente ad una procedura classica di rilievo per verificare la corrispondenza tra quello che potremmo identificare come 'progetto esecutivo' e il progetto 'as built'.

Prima di procedere con la descrizione del *workflow* utilizzato per la realizzazione del modello, è necessario dare la definizione di modello architettonico e modello analitico. In Revit il modello architettonico rappresenta la struttura fisica dell'edificio, e viene realizzato mediante l'utilizzo di categorie, istanze e famiglie. L'istanza rappresenta il singolo elemento. La categoria è la classificazione per le famiglie, ad esempio porte, facciate continue, arredo, dispositivi di illuminazione e così via. Le famiglie vengono raggruppate ed ordinate per categoria nelle Content Libraries e nel Browser di progetto. Queste possono essere:

- Famiglie di sistema*, ovvero componenti dell'ambiente di Revit utilizzati per creare elementi di costruzione di base quali muri, tetti e pavimenti.

- Famiglie caricabili*, spesso ospitate da famiglie di sistema, quali porte e finestre

- Famiglie locali*, quali elementi personalizzati creati nel contesto di un modello. Questa viene creata quando in un modello è necessario disporre di una geometria univoca che non si prevede di riutilizzare.

La rappresentazione approssimativa degli elementi strutturali visualizzata nel modello architettonico non corrisponde al modello analitico. Un modello analitico corrisponde ad una rappresentazione 3D semplificata di un modello fisico strutturale. Esso è costituito da componenti strutturali, geometria, proprietà di materiali e carichi che insieme formano un sistema di progettazione. Il modello analitico di una struttura include una serie di modelli analitici di elementi strutturali, uno per ogni elemento della struttura. Questi possono essere modelli beam associati a pilastri strutturali, elementi del telaio strutturale quali travi e controventi, o shell, associati a pavimenti strutturali e muri strutturali ed elementi della platea. Nel caso di queste famiglie, il modello viene creato automaticamente durante la generazione del modello fisico e può essere esportato in applicazioni di analisi e progettazione.

Nel caso oggetto di studio non si può dire lo stesso. La realizzazione di un modello architettonico dello scalone che fornisca un modello analitico per l'analisi strutturale non è così banale.

### 4.1 Famiglia Scala

Si è provato a modellare lo scalone mediante l'utilizzo della famiglia 'scala'. Quando si crea una scala, è possibile selezionare tre famiglie di sistema predefinite: Scala gettata in opera, Scala prefabbricata e Scala assemblata. È disponibile una modalità di disegno (Figura 44) per creare rampe di scale e pianerottoli di forme

geometriche non comuni come nel caso in esame. Tali componenti disegnati possono poi essere collegati per creare un assieme scala.

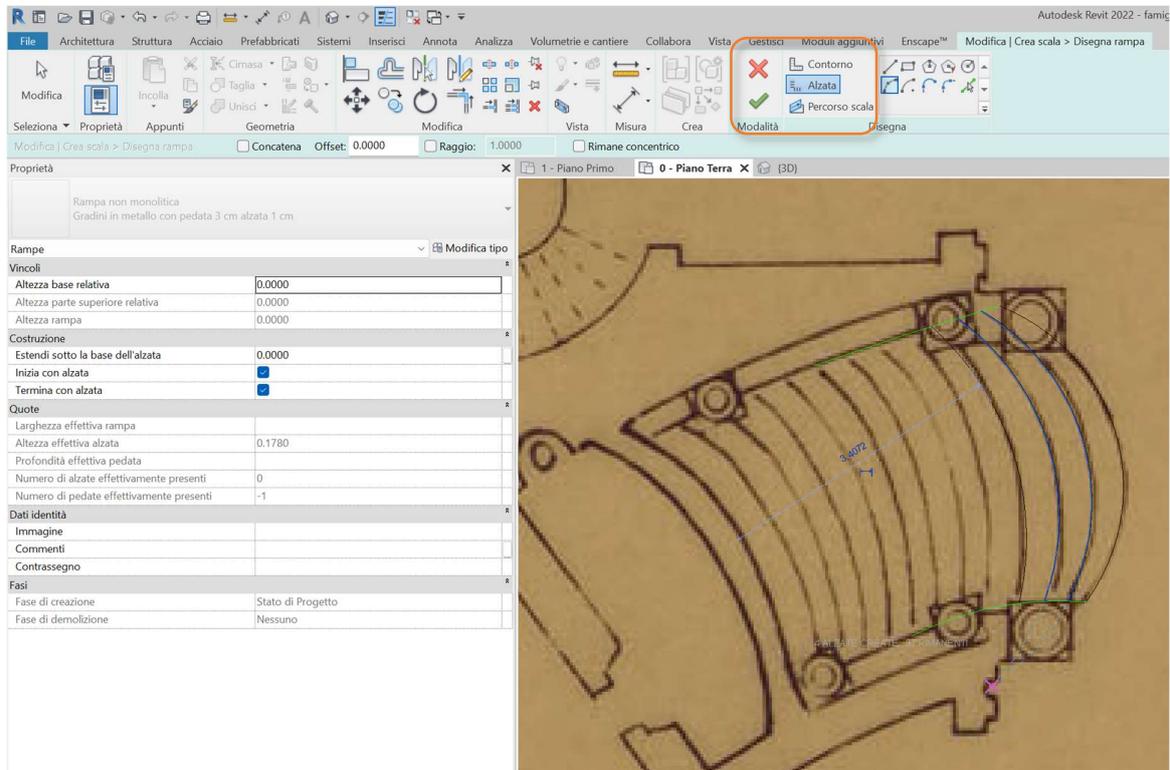


FIGURA 44. 'MODALITÀ DISEGNO' PER LA CREAZIONE DELLA RAMPA

Si è visto sperimentalmente, che, l'unica famiglia che permette la rappresentazione geometrica dello scalone è la scala assemblata (Figura 46) probabilmente a causa dei gradini molto stretti all'estremità che non permettono l'inserimento dei ferri d'armatura necessari nel caso di scala gettata o prefabbricata (Figura 45). Anche questa famiglia comunque non è utilizzabile in quanto non permette di modellarla utilizzando la muratura.

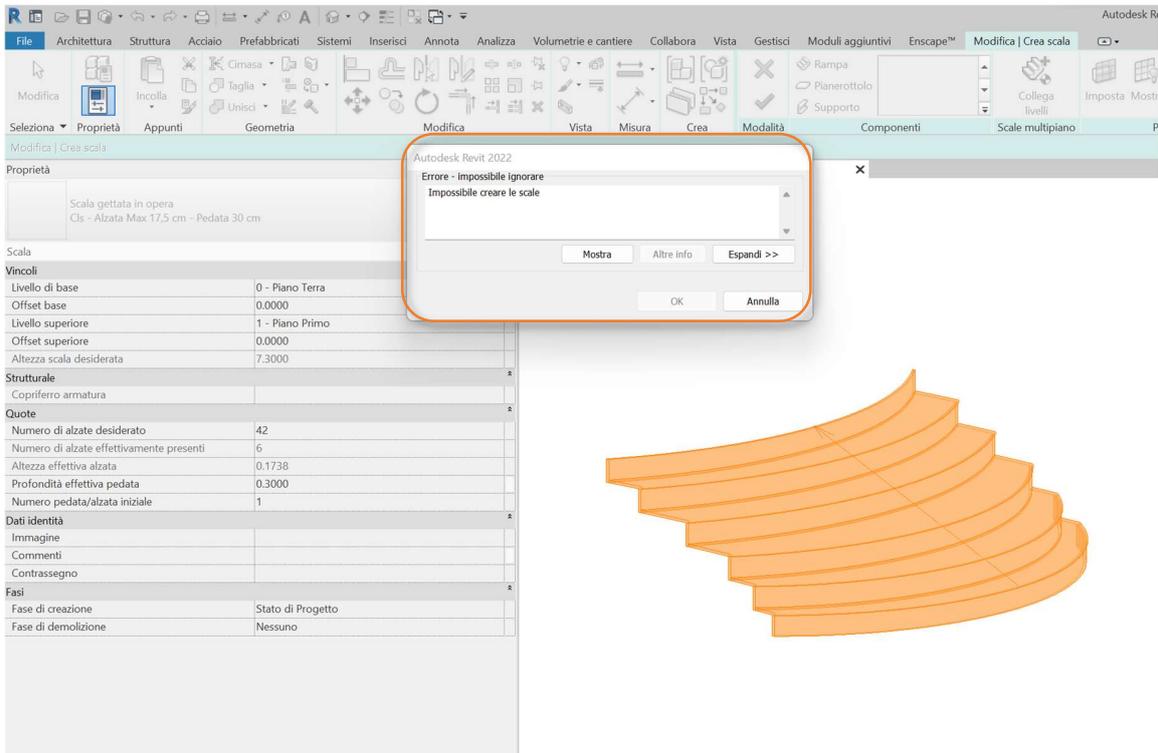


FIGURA 45. ERRORE NELLA MODELLAZIONE CON LA FAMIGLIA 'SCALA GETTATA IN OPERA' E 'SCALA PREFABBRICATA'

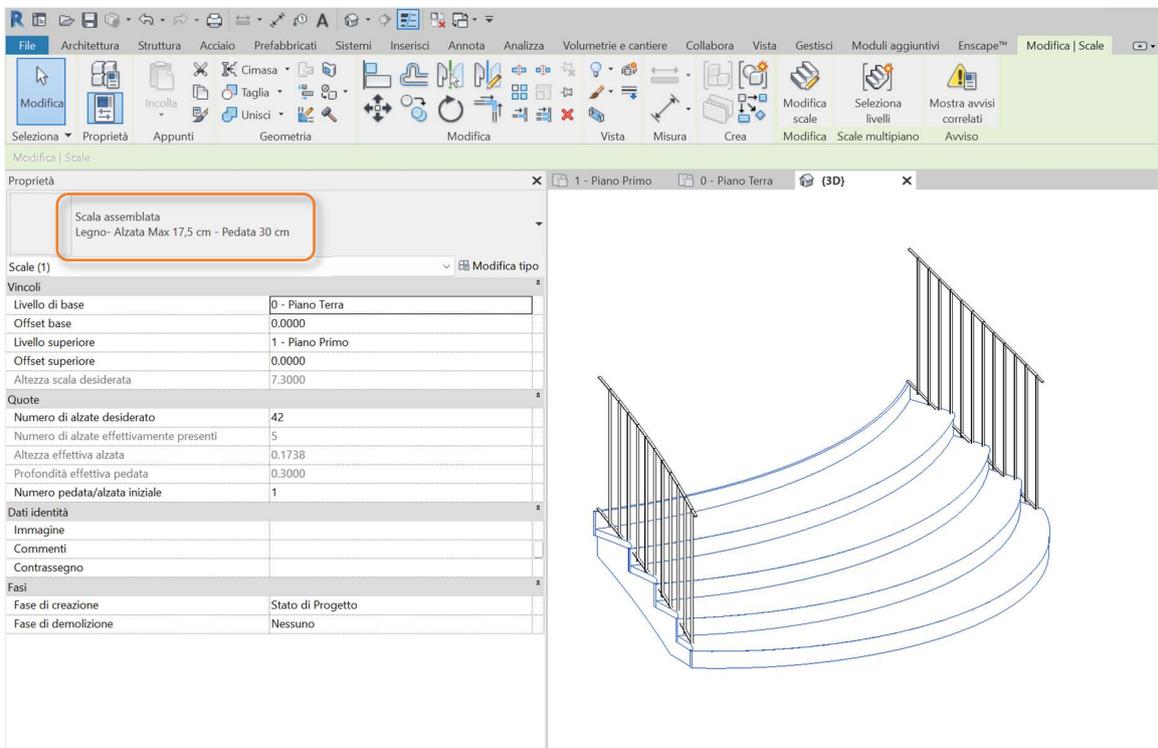


FIGURA 46. MODELLAZIONE DELLA FAMIGLIA CON 'SCALA ASSEMBLATA'

## 4.2 Famiglia Pavimento

Un metodo di modellazione potrebbe essere quello di utilizzare elementi analitici di tipo 'shell'. L'idea è quella di modellare le rampe e i pianerottoli come pavimenti in modo da ottenere un modello analitico bidimensionale. Infatti, questi elementi strutturali in cui una dimensione, lo spessore, è molto inferiore delle altre che ne definiscono la geometria, non possono essere assimilati a travi (strutture monodimensionali), in cui la lunghezza è preponderante rispetto alle altre due dimensioni e la loro schematizzazione in elementi solidi non è raccomandabile sia per i tempi di modellazione sia per quanto riguarda le limitazioni proprie dei modelli solidi. In questi casi, la modellazione a elementi finiti è sviluppata utilizzando gli elementi a guscio, più comunemente detti "shell", i quali riducono lo sviluppo della struttura alla sua superficie media. Le proprietà inerziali dell'elemento di interesse vengono assegnate definendo il valore dello spessore degli elementi che formano il modello FEM. La schematizzazione della parte è completata assegnando le proprietà del materiale.

Esistono diversi tipi di elementi shell con geometria che può essere triangolare e quadrangolare. I primi presentano funzioni di forma meno ricche daranno luogo a risultati meno precisi, a pari numero di elementi. Tuttavia, saranno più idonei ad una corretta modellazione di zona con geometria complessa, dove l'impiego di elementi a quattro lati potrebbe indurre problemi di distorsione di alcuni elementi posti in zone critiche, con il problema di una minore accuratezza dei risultati. In generale, per l'analisi di strutture curve, meglio usare elementi quadrangolari che forniscono una più fedele modellazione geometrica e una maggiore accuratezza dei risultati.

Una particolare tipologia di elementi shell è costituita dai cosiddetti "thick shell", utilizzati per la di strutture con spessore trascurabile. La principale differenza è che gli elementi shell presentano un comportamento alla Kirchhoff, ovvero viene considerata la deformabilità al taglio delle strutture in cui superfici piane perpendicolari alla superficie media in condizione indeformata restano normali a tale superficie una volta che questa si è deformata dopo l'applicazione del sistema dei carichi. Nella formulazione "thick shell" (alla Mindlin), invece, le superfici piane perpendicolari alla superficie media restano piane ma non perpendicolari a quest'ultima.

Revit permette la modellazione di un pavimento come pavimento architettonico o come pavimento strutturale. Anche in questo caso è necessario utilizzare la 'modalità disegno' in modo da definire i bordi complessi della rampa.

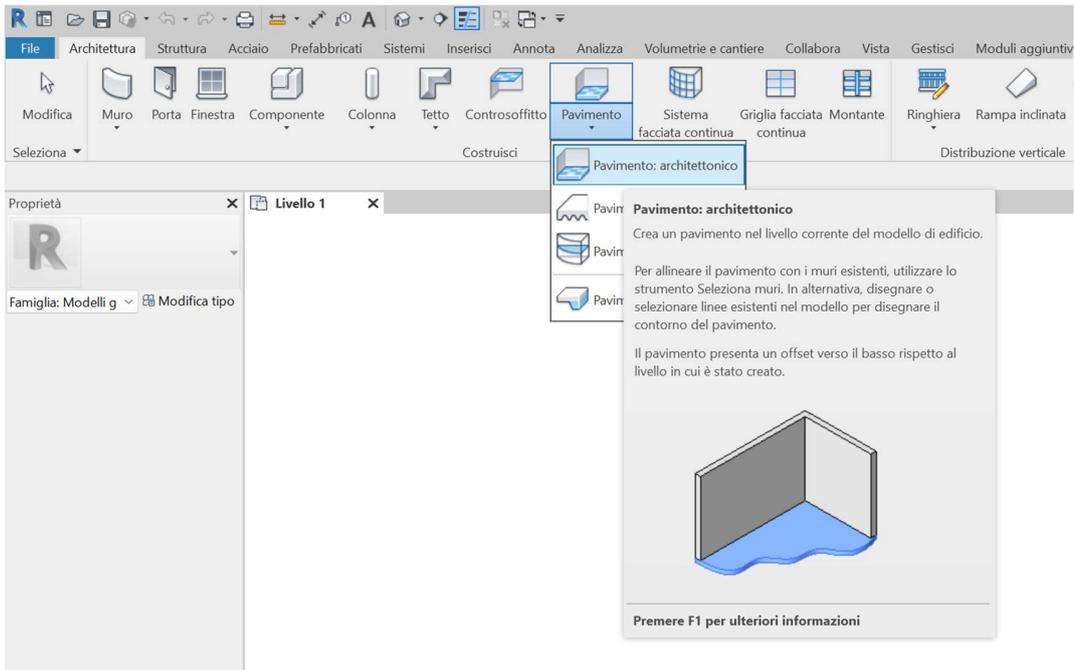


FIGURA 47. FAMIGLIA PAVIMENTO ARCHITETTONICO

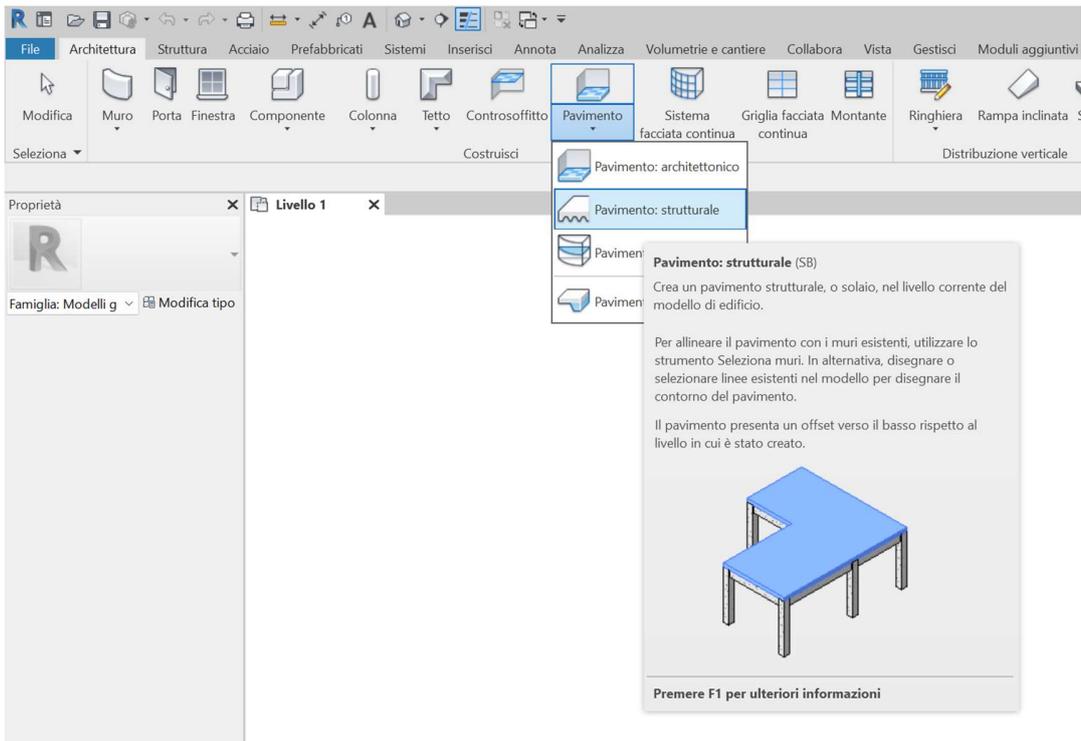
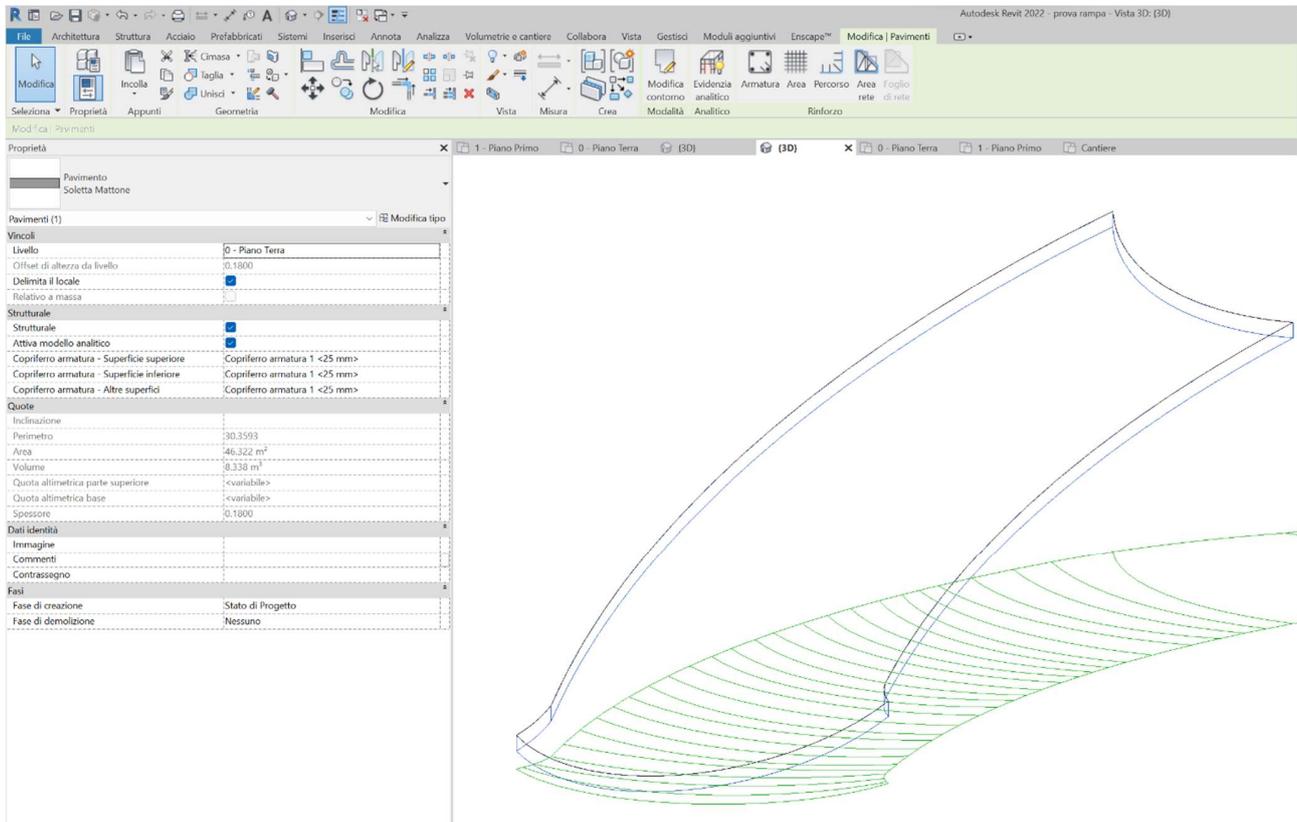


FIGURA 48. FAMIGLIA PAVIMENTO STRUTTURALE

Al fine di ottenere un modello analitico a guscio risulta logico modellare la rampa come un pavimento strutturale, ma, anche in questo caso si sono riscontrati dei problemi, in quanto con tale famiglia non è possibile modellare in modo corretto la geometria della rampa.



**FIGURA 49. MODELLAZIONE DELLA RAMPA CON LA FAMIGLIA 'PAVIMENTO STRUTTURALE'**

Al contrario, col modello architettonico (Figura 50), esiste un comando 'modifica elementi secondari' che permette di modificare la quota altimetrica del punto selezionato e, quindi, di adattare al meglio la geometria della rampa in modo da ottenere un modello più realistico possibile a livello geometrico.

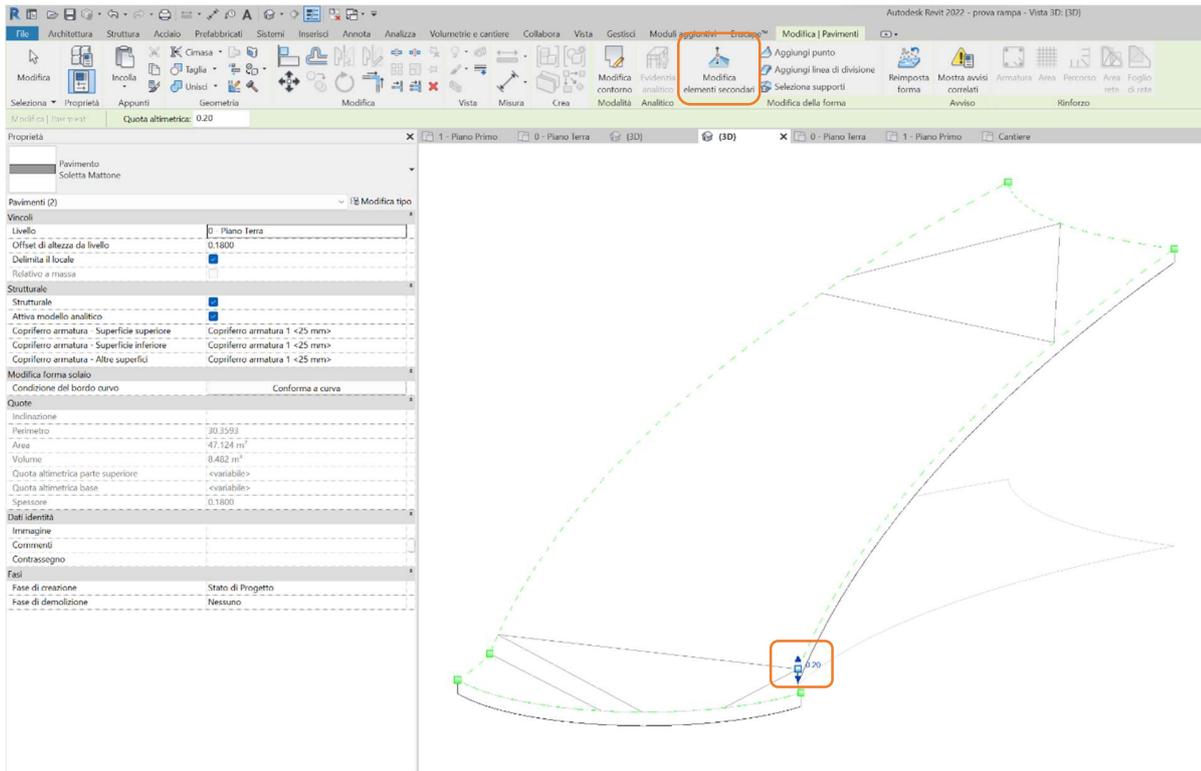


FIGURA 50. MODELLAZIONE DELLA RAMPA CON LA FAMIGLIA 'PAVIMENTO ARCHITETTONICO'

Come previsto, però, la realizzazione di una pavimentazione architettonica non fornisce un modello analitico corretto, al contrario della pavimentazione strutturale (Figura 49) che non permette di modellare geometricamente in modo corretto la rampa ma fornisce un modello analitico tipo 'shell' plausibile (Figura 51).

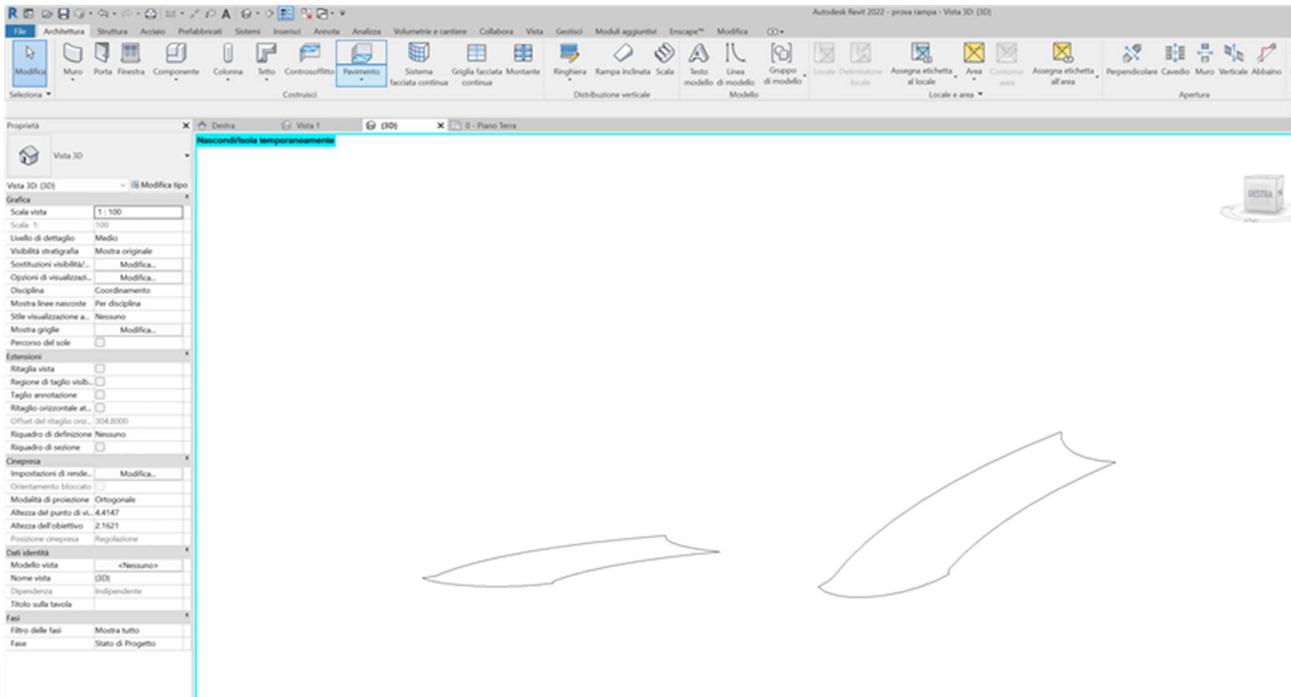


FIGURA 51. CONFRONTO TRA MODELLI ANALITICI

### 4.3 Famiglie locali

Un modello analitico dello scalone potrebbe essere realizzato modellando i singoli gradini come travi curve incastrate in corrispondenza dei muri di bordo. Si è pensato di modellare separatamente due famiglie locali, ovvero, la famiglia 'strutturale' e la famiglia 'rivestimento' in quanto trattasi di elementi personalizzati di geometria univoca che non si prevede di riutilizzare. In questo modo è possibile caricarle su un nuovo modello di costruzione Revit e ottenere il modello completo dello scalone separando la parte strutturale da quella prettamente decorativa.

A partire dalla sezione dello scalone di Figura 8 è stato possibile definire un piano di lavoro per ogni gradino e, a partire dalla planimetria, definire una vista in pianta del singolo gradino in modo da poterlo modellare utilizzando il comando 'estrusione'. Modellare il singolo gradino, quindi, significa prima di tutto definire il piano di lavoro, tracciare la sua geometria in pianta e successivamente impostare la dimensione dell'estrusione rispetto al piano di lavoro.

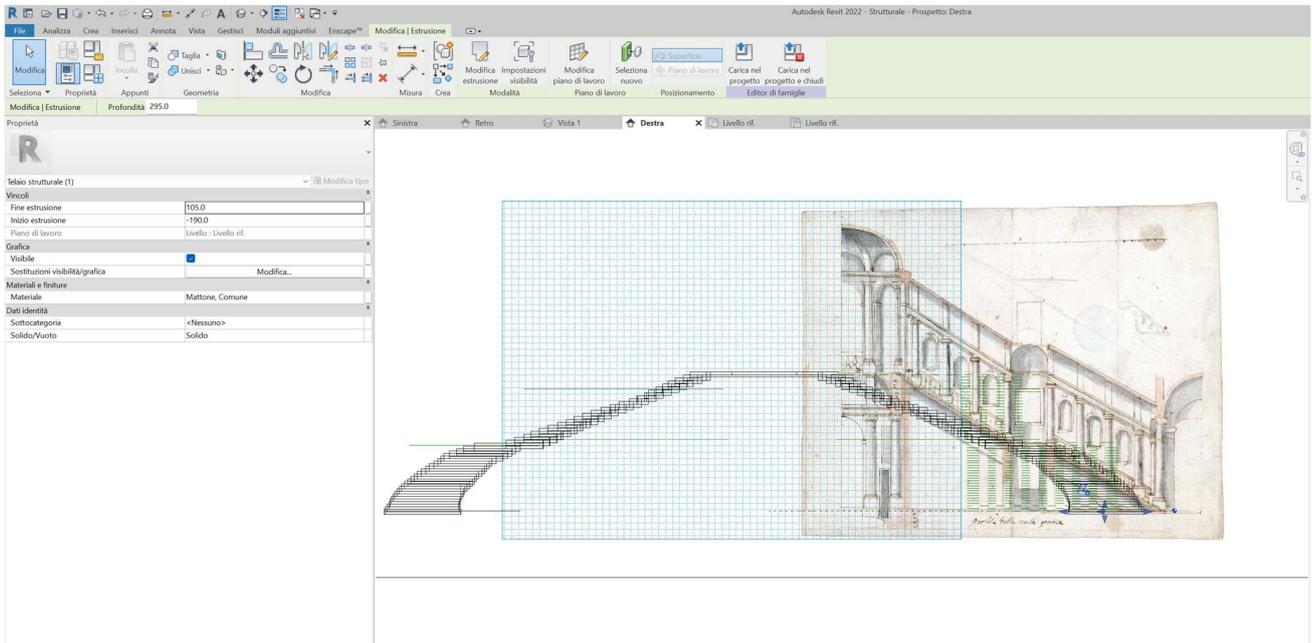


FIGURA 52. DEFINIZIONE DEI PIANI DI LAVORO A PARTIRE DALLA SEZIONE DELLO SCALONE.

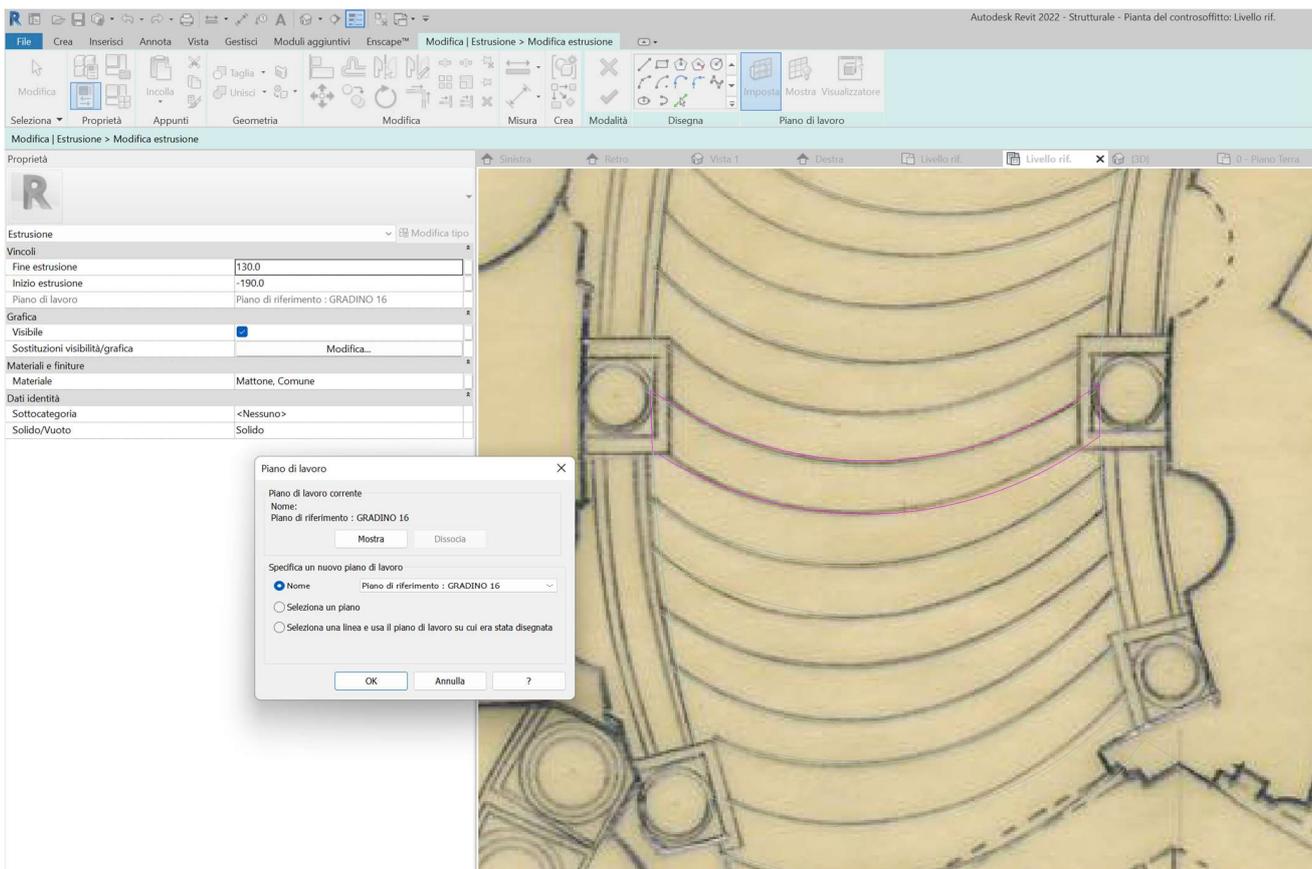
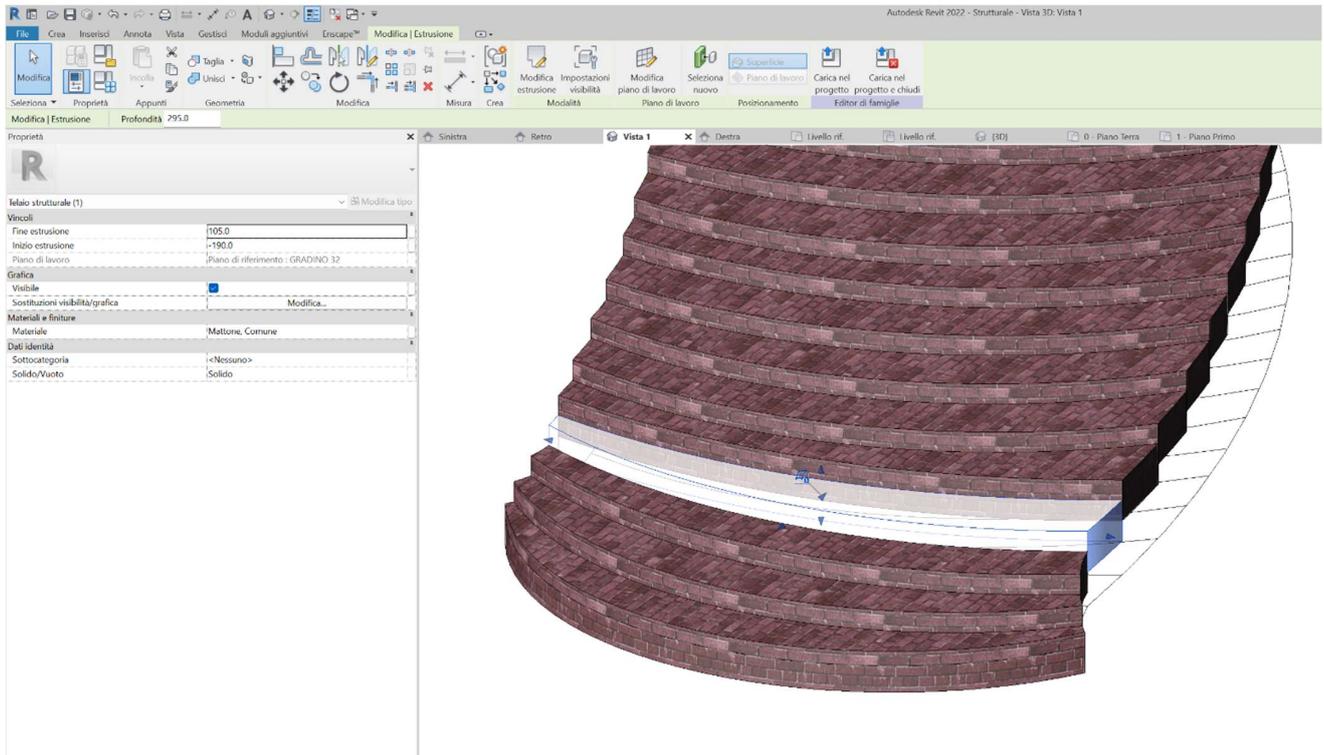


FIGURA 53. MODELLAZIONE DEL SINGOLO GRADINO CON IL COMANDO ESTRUSIONE.



**FIGURA 54. VISTA 3D DELLA PARTE STRUTTURALE DEL SINGOLO GRADINO.**

Si è utilizzata la famiglia 'telaio strutturale' per la modellazione della parte, per l'appunto, strutturale dello scalone. Si è invece utilizzata la famiglia 'modello generico' per la modellazione del rivestimento. Si è poi passato alla realizzazione di un modello Revit che considerasse l'unione delle due famiglie (Figura 56).

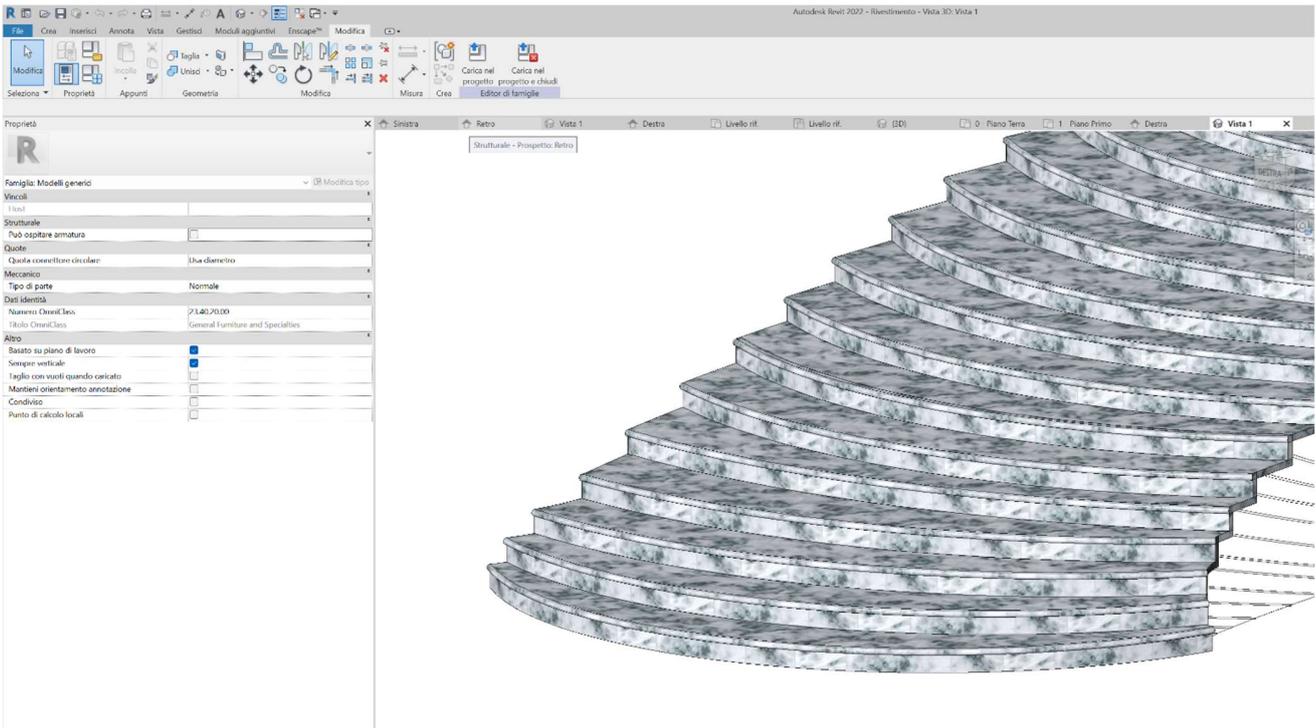


FIGURA 55. MODELLAZIONE DELLA FAMIGLIA 'RIVESTIMENTO'

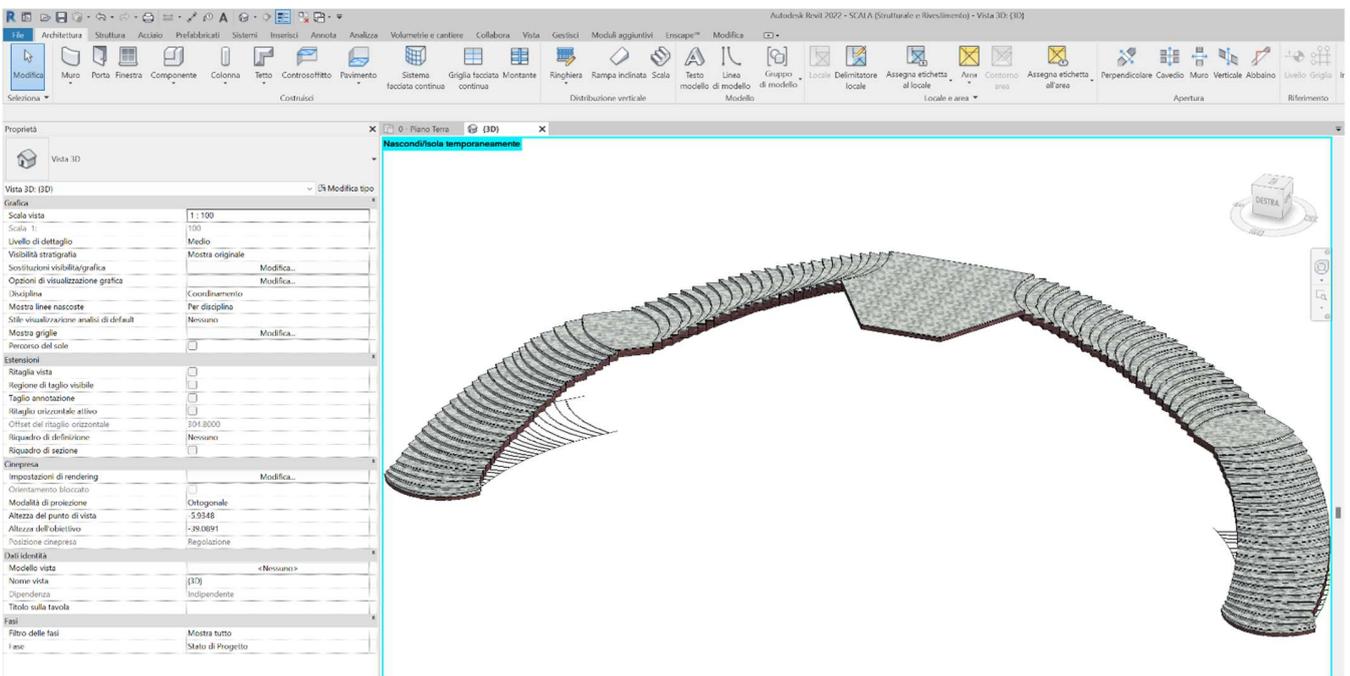


FIGURA 56. CREAZIONE DEL MODELLO DI COSTRUZIONE UNIFICANDO LE DUE FAMIGLIE.

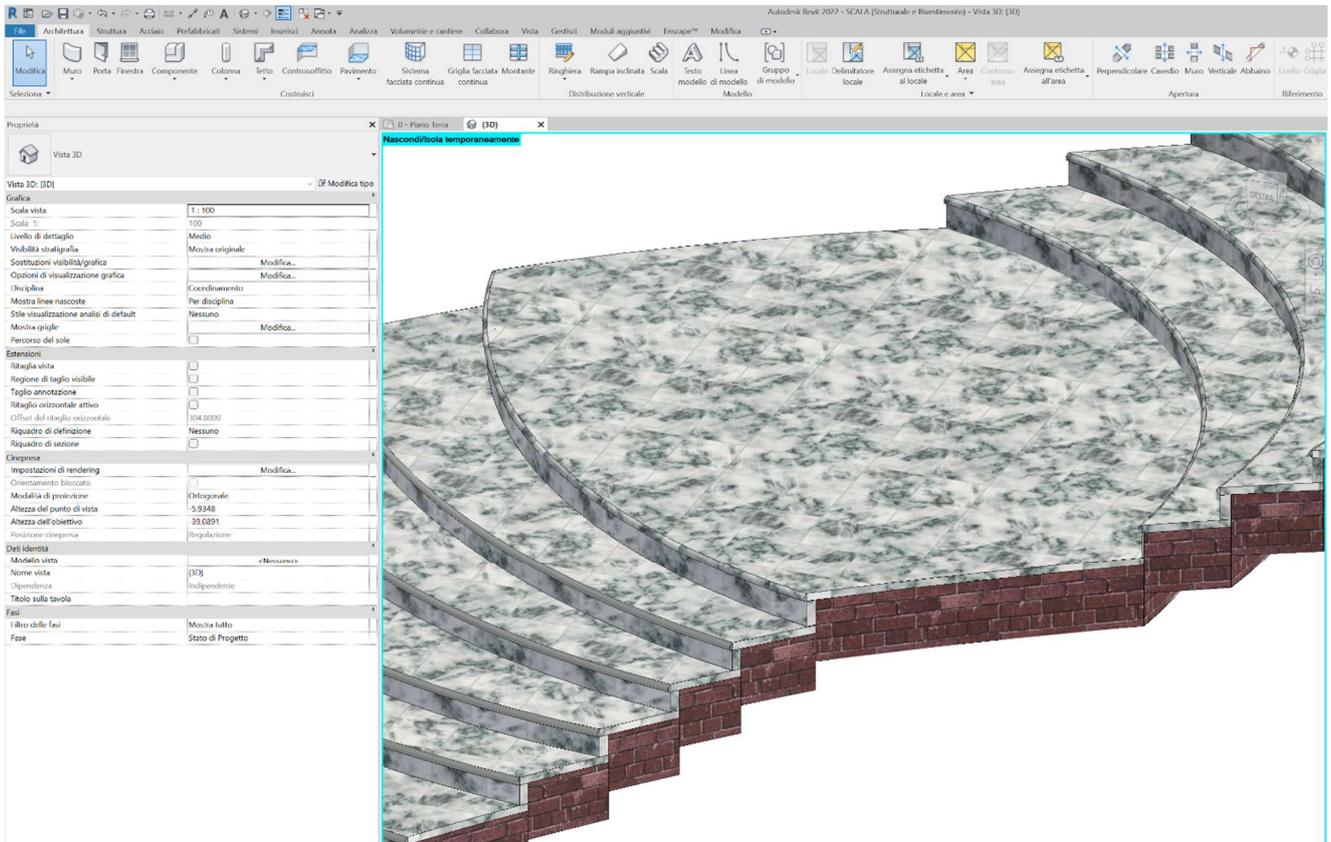


FIGURA 57. VISTA DI DETTAGLIO DELLO SCALONE ASSEMBLATO.

Nonostante l'uso della famiglia "telaio strutturale" in Revit, il software non è stato in grado di fornire un modello analitico per i gradini. Questa situazione evidenzia le sfide che possono sorgere quando si cerca di ottenere una rappresentazione accurata e dettagliata di determinate componenti strutturali in Revit.

Le famiglie "telaio strutturale" in Revit sono progettate per rappresentare elementi strutturali con una certa flessibilità, ma possono non essere ideali per la modellazione di componenti specifiche come i gradini di una scala. Questi dettagli possono avere forme e caratteristiche particolari che non si adattano facilmente a questo tipo di famiglie o richiedono una modellazione più avanzata.

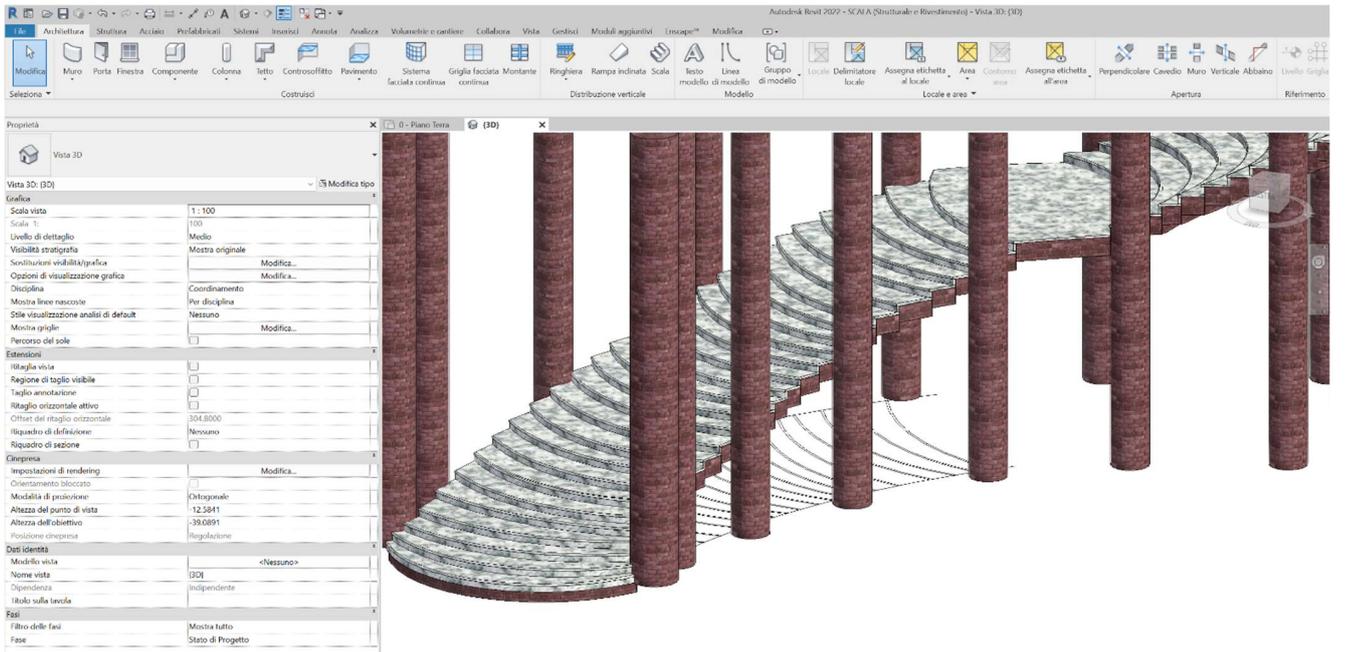


FIGURA 58. VISTA DELLO SCALONE COMPRESA LA MODELLAZIONE DEI PILASTRI STRUTTURALI

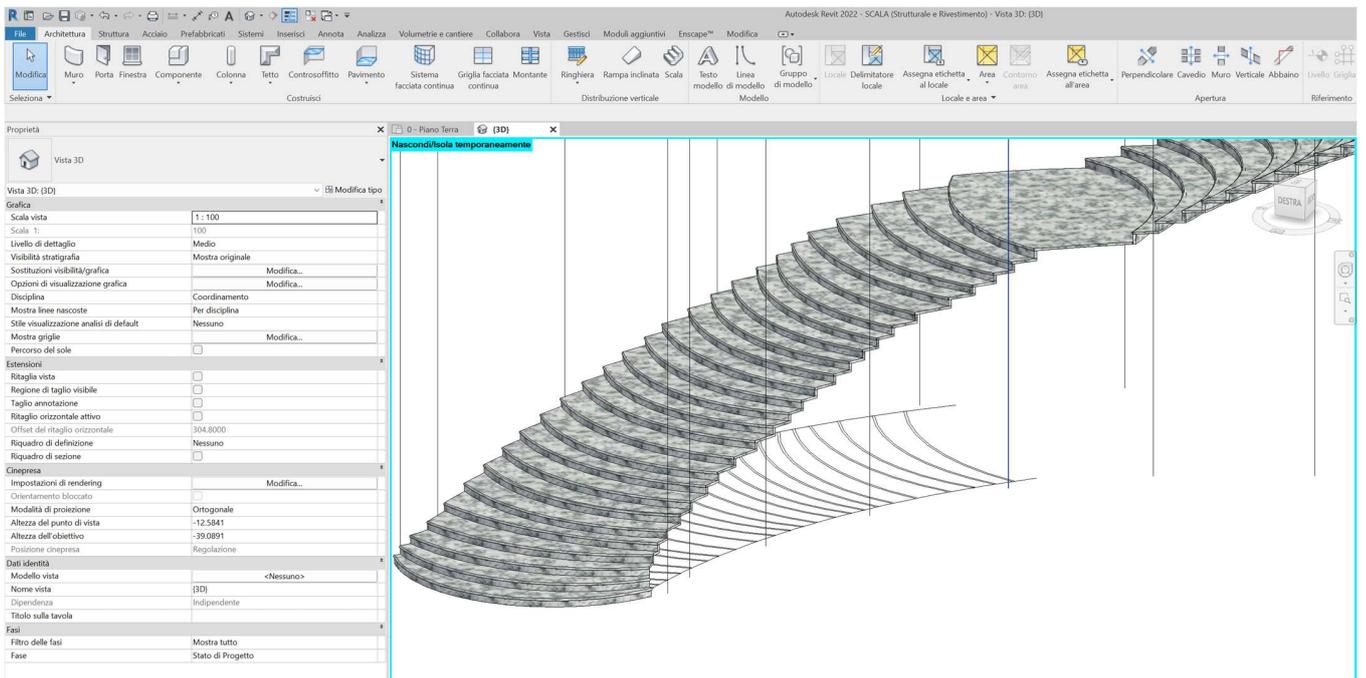


FIGURA 59. VISTA DEL MODELLO ANALITICO DEI PILASTRI.

Si può notare come, paragonando le due figure 58 e 59, Revit è stato efficace nel fornire il modello analitico dei pilastri strutturali, ma ha incontrato delle difficoltà nella creazione della componente strutturale dello scalone. Questa differenza nella rappresentazione dei due elementi architettonici riflette le sfide che possono sorgere nella creazione di modelli analitici dettagliati in Revit.

I pilastri strutturali spesso hanno una rappresentazione chiara e solida nel modello Revit, il che facilita l'estrarre un modello analitico preciso per scopi di analisi strutturale. Tuttavia, nello specifico caso dello scalone, la componente strutturale potrebbe essere più complessa da definire e rappresentare accuratamente all'interno di Revit. Questo può derivare dalla complessità della geometria o dall'uso di elementi architettonici che non si prestano facilmente alla creazione di un modello analitico strutturale.

La difficoltà nella rappresentazione dello scalone potrebbe richiedere ulteriori passaggi, come la creazione manuale di un modello analitico in un software di modellazione 3D o di analisi strutturale come Autodesk Robot. Questo processo potrebbe richiedere più tempo e sforzo per garantire una rappresentazione accurata della struttura dello scalone nei calcoli di analisi strutturale.

In sintesi, mentre Revit può essere un potente strumento per la progettazione architettonica e la creazione di modelli analitici per alcune parti strutturali, potrebbe essere necessario un approccio più mirato e specifico per rappresentare con precisione le componenti strutturali complesse come uno scalone. Questo implica spesso un lavoro aggiuntivo per garantire che il modello analitico rifletta fedelmente la realtà strutturale.

## 4.4 Revit - Robot

Il collegamento tra l'Integrazione con Robot Structural Analysis e l'Integrazione con Revit rappresenta uno strumento fondamentale che agevola lo scambio di informazioni in modo bidirezionale tra due importanti software di Autodesk quali Autodesk Robot™ Structural Analysis Professional e Autodesk Revit. Con esso è possibile spostare un modello di struttura da Revit a Robot o viceversa. Questo è di grande aiuto quando si desidera iniziare il progetto in un'applicazione e successivamente lavorarvi in un'altra.

È possibile apportare modifiche al modello in uno dei due programmi e poi sincronizzarle nell'altro. Questo facilita il processo di progettazione, in quanto si possono fare modifiche in uno degli ambienti di lavoro senza dover ricreare tutto da zero nell'altro.

Il collegamento consente anche di spostare i risultati dell'analisi statica e le informazioni sull'armatura calcolate in Robot nel modello di Revit. Questo è particolarmente utile per mantenere tutte le informazioni necessarie all'interno del progetto globale.

Un aspetto importante di questo strumento è la sua capacità di gestire progetti di grandi dimensioni. Invece di dover caricare l'intero progetto in entrambi i programmi, è possibile selezionare solo la parte rilevante e trasferirla. In questo modo, il processo diventa più efficiente e meno oneroso in termini di risorse.

Inoltre, il collegamento permette di salvare il modello in un file intermedio (.smxx), che può essere aperto sia in Robot sia in Revit. Questo file può anche essere utilizzato per lo scambio di dati tra programmi su computer diversi.

In definitiva, l'Integrazione con Robot Structural Analysis e Revit rappresenta un efficace strumento per l'ottimizzazione della progettazione e dell'analisi strutturale, semplificando la gestione dei dati ma, in questo caso, il problema sono i dati di input non forniti dal software principale quale Revit.

### 4.4.1 Revit – CAD

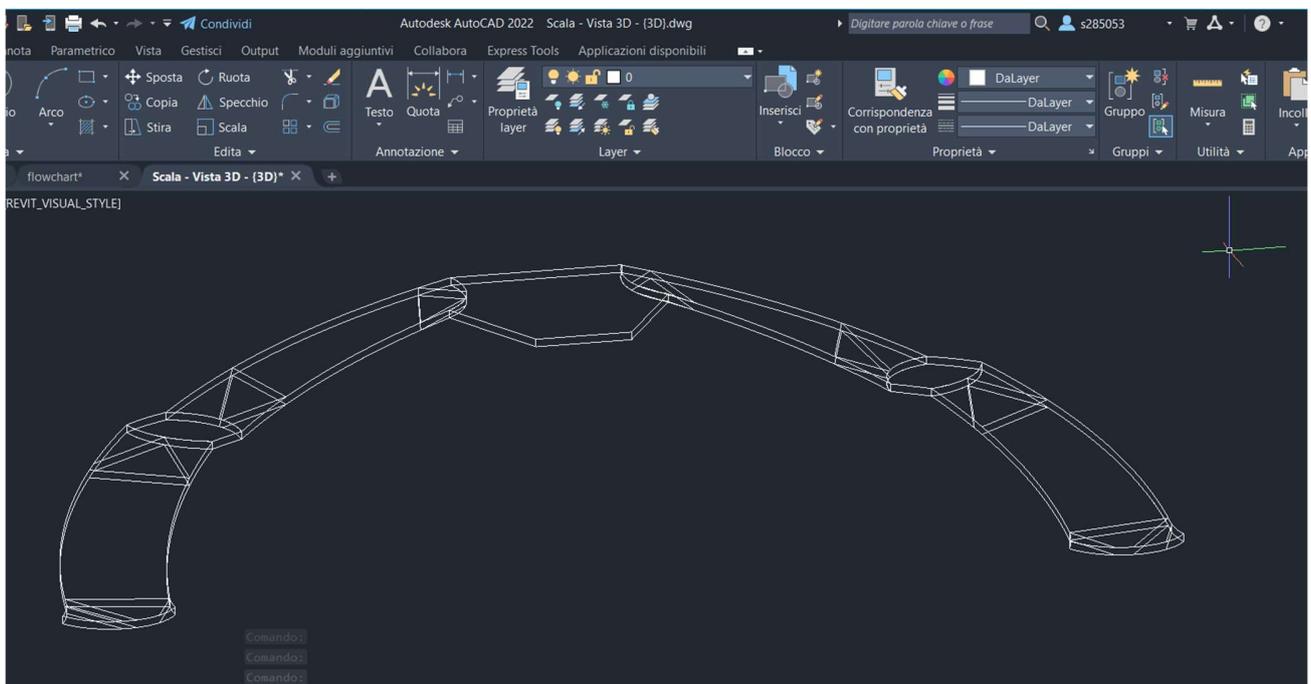
La decisione di estrarre il modello da Revit a CAD è stata presa con l'obiettivo di ottenere una geometria di base che potesse essere utilizzata come punto di partenza per il processo di modellazione in Autodesk Robot.

Questa transizione serve a facilitare l'integrazione tra i due software e a garantire una base di lavoro più compatibile con le esigenze dell'analisi strutturale.

Revit è un software di progettazione architettonica e ingegneristica che spesso genera modelli complessi, contenenti dettagli architettonici e informazioni non sempre necessarie per l'analisi strutturale. Trasferire direttamente un modello così dettagliato in Robot potrebbe comportare inefficienze e complessità aggiuntive nel processo di analisi.

Estrarre il modello da Revit a CAD consente di semplificare la geometria, rimuovendo elementi non rilevanti per l'analisi strutturale e garantendo che la geometria sia presentata in un formato più adatto a Robot.

In breve, l'estrazione del modello da Revit a CAD (Figura 60) rappresenta una tappa essenziale per preparare la geometria di base necessaria per il successivo lavoro di modellazione e analisi in Autodesk Robot. Questo approccio consente di ottimizzare il flusso di lavoro e di assicurare che le risorse siano concentrate sull'analisi strutturale anziché sulla gestione di dettagli non rilevanti.



**FIGURA 60. MODELLO 3D IN AUTOCAD**

Dall'interno del modello 3D, è stato estratto un insieme di geometrie semplificate che potrebbe essere utilizzato come modello analitico (Figura 61). Questa versione semplificata rappresenta un'astrazione delle principali caratteristiche del modello e potrebbe essere considerata come un'approssimazione che semplifica la complessità del modello originale.

L'obiettivo principale di questa versione semplificata è quello di essere pronta per l'importazione in Autodesk Robot, un software specializzato per l'analisi strutturale. La semplificazione del modello potrebbe comportare la rimozione di dettagli non rilevanti per l'analisi strutturale, la riduzione della complessità della geometria o la creazione di una rappresentazione più adatta alle esigenze dell'analisi.

Una volta che questa geometria semplificata è stata estratta e preparata, è possibile esportarla in formato compatibile con Autodesk Robot per condurre analisi strutturali più dettagliate. Questo processo semplificato

può essere particolarmente utile per ridurre la complessità dei calcoli e migliorare l'efficienza dell'analisi, poiché si concentra sugli aspetti più rilevanti per il comportamento strutturale senza dover elaborare dati superflui.

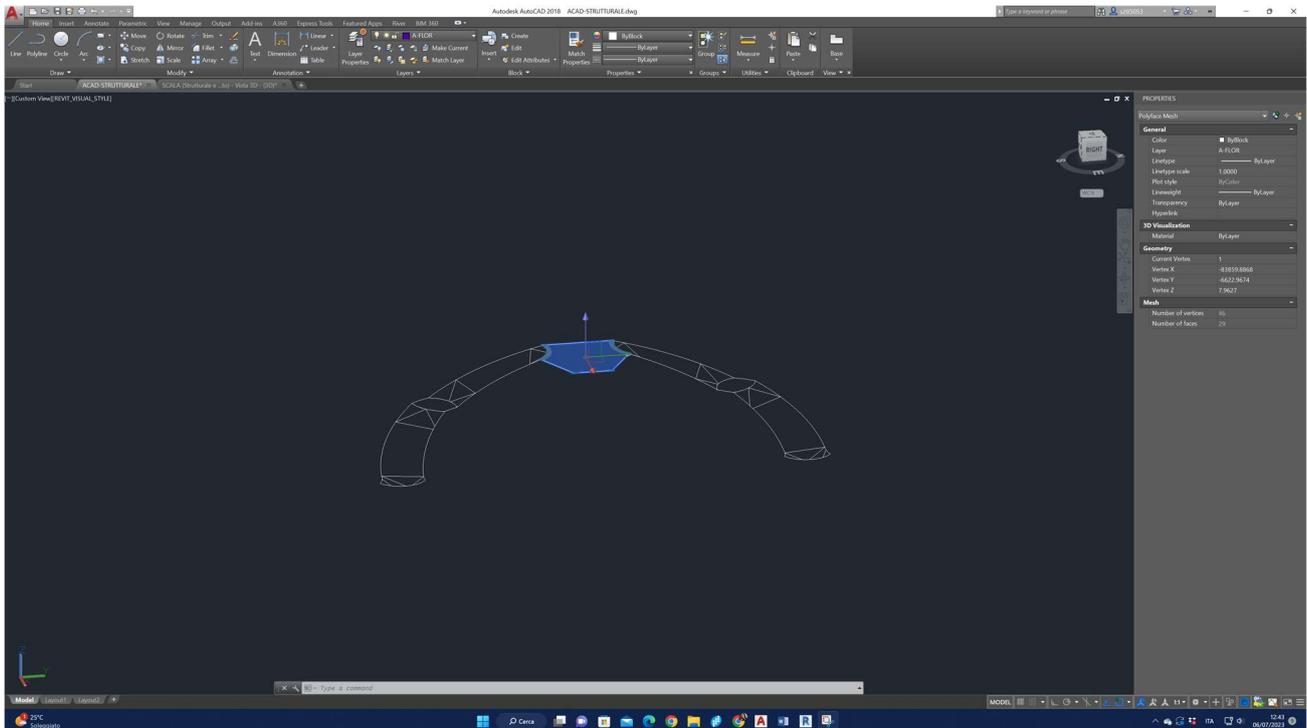


FIGURA 61. MODELLO 3D IN AUTOCAD PER LA REALIZZAZIONE DEL MODELLO ANALITICO

Il passaggio da un modello CAD a Robot richiede l'uso di un file con estensione .sat al fine di effettuare con successo l'esportazione di un modello tridimensionale. Tuttavia, il processo di conversione può presentare alcune sfide quando si effettua il passaggio da Revit a CAD.

Nel caso del passaggio da Revit a CAD, viene generato un modello POLYFACE MESH che differisce da un solido 3D o da un oggetto "regione". Questi ultimi due sono prerequisiti per l'esportazione in formato .sat da AutoCAD. La problematica principale emerge quando si tenta di convertire il modello POLYFACE MESH in un solido 3D. A volte, durante questo processo, si può verificare un errore con il messaggio "Mesh not converted because it is not closed or it self-intersects".

Questo errore può insorgere principalmente a causa delle caratteristiche del modello importato da una terza applicazione come Revit. La ragione principale è che i modelli generati in Revit possono contenere dettagli o geometrie che non si traducono perfettamente in un modello solido chiuso in AutoCAD. Questo può includere intersezioni non chiuse o elementi di geometria complessi che AutoCAD può avere difficoltà a interpretare come solidi tridimensionali.

Per risolvere questo problema, potrebbe essere necessario eseguire alcune operazioni di pulizia e semplificazione del modello prima di convertirlo in un solido 3D in AutoCAD. Questo può comportare la correzione di geometrie non chiuse, la rimozione di intersezioni indesiderate o la semplificazione di dettagli complessi. È importante sottolineare che il processo può richiedere del tempo e sforzo piuttosto elevati data la complessità del modello originale. In più Robot non è un software perfettamente adatto all'analisi di strutture in muratura. Si è quindi pensato di passare alla modellazione solida.

## 5. L'ANALISI STRUTTURALE CON SOLIDWORK

Si è visto che nel settore delle opere in muratura i metodi di modellazione FEM possono essere a telaio equivalente e a Shell.

In particolare, nel *metodo a telaio equivalente* lo scopo è quello di associare la struttura ad un telaio composto da setti e fasce, la zona di incrocio tra i due elementi è un nodo a cui viene associato un elemento rigido, le verifiche e le non linearità sono applicate ai soli elementi strutturali setto e fascia schematizzati con elementi FEM di tipo *beam*. Questo è il metodo di modellazione più utilizzato e in alcuni software è automatizzato ma ha diversi limiti di applicabilità che spesso porta ad una errata schematizzazione del modello di calcolo.

La *modellazione a Shell* utilizza appunto elementi Shell a 3 o 4 nodi e ben si presta a rappresentare fedelmente le complesse geometrie di molti edifici storici.

Questa tecnica aiutata da meshatori FEM di ultima generazione riesce ad interpretare quasi tutte le casistiche presenti sul territorio.

L'implementazione del modello di calcolo ha complessità paragonabili a quelle del telaio equivalente ma genera un file informatico più lento nel calcolo e nella interpretazione dei risultati. Dal punto di vista normativo il metodo a telaio è regolamentato mentre per quanto riguarda il modello Shell non si trovano riferimenti espliciti. Si è visto come la realizzazione di un modello analitico dello scalone utilizzando questi due tipi di modellazione non è risultato essere così banale. La *modellazione solida* FEM è quindi una tecnica diventata indispensabile in questo caso a causa della forte variabilità di spessori e di forme non schematizzabili con elementi Shell e tantomeno a telaio equivalente.

La modellazione solida continua si concentra sulla rappresentazione dei solidi come entità continue, senza considerare la loro struttura interna. Questo significa che viene considerata la geometria esterna degli oggetti, insieme alle proprietà meccaniche come la rigidità, la deformabilità e la resistenza dei materiali.

Uno dei principali metodi utilizzati per la modellazione solida continua è il metodo degli elementi finiti (Finite Element Method, FEM). Questo metodo suddivide il solido in una griglia di elementi finiti, come triangoli o quadrilateri nel caso di modellazione bidimensionale, o tetraedri o esagoni nel caso di modellazione tridimensionale. Ogni elemento viene poi analizzato individualmente, prendendo in considerazione le forze esterne applicate e le condizioni al contorno, al fine di determinare il comportamento del solido nel suo insieme.

Attraverso questa metodologia è possibile analizzare la risposta dei solidi a diverse condizioni di carico, prevedere la deformazione e lo stress generati e valutare l'affidabilità e la sicurezza strutturale degli oggetti.

Si tratta, quindi, di un approccio matematico per la rappresentazione e l'analisi di oggetti tridimensionali, che si basa sulla considerazione delle proprietà fisiche e meccaniche dei materiali. Attraverso l'utilizzo di metodi come il metodo degli elementi finiti, è possibile studiare il comportamento dei solidi sotto diverse condizioni, consentendo una progettazione più accurata e l'ottimizzazione delle prestazioni degli oggetti.

Non ha limiti nell'interpretare correttamente la reale geometria dell'opera, tuttavia, chiede di saper utilizzare strumenti di modellazione geometrica solida 3D, sulla quale in un secondo momento verrà generata la mesh di elementi finiti attraverso l'uso di meshatori automatici.

Questa tecnica ha gli stessi vantaggi e limiti normativi della modellazione shell però è l'unica a risolvere casistiche come queste. Esistono diversi software specializzati per la modellazione solida continua, che offrono

strumenti avanzati per la creazione, l'analisi e la simulazione di modelli solidi, in questa tesi si è deciso di utilizzare *SolidWorks*.

Si tratta di un software CAD 3D ampiamente utilizzato che include anche un modulo di simulazione integrato chiamato SolidWorks Simulation. Questo modulo offre funzionalità per la modellazione solida continua, l'analisi strutturale, la simulazione degli sforzi termici e altre analisi di ingegneria.

## 5.1 Il modello di dati Industry Foundation Classes

Lo scalone in Revit è modellato in modo parametrico, questo presenta, quindi, non solo caratteristiche geometriche ma anche meccaniche. Si è pensato di testare l'interoperabilità tra Revit e Solidworks. Questi due software riescono a comunicare tra loro mediante un modello di dati Industry Foundation Classes (IFC).

Si tratta di un formato file neutrale basato su oggetti con un modello di dati sviluppato dall' International Alliance for Interoperability, (IAI) per facilitare l'interoperabilità tra le discipline di architettura, ingegneria e costruzione dell'industria dell'edilizi. È un formato di collaborazione comunemente utilizzato in progetti basati sulla metodologia BIM. La specifica del modello dati IFC è stata riconosciuta e registrata dalla ISO come norma internazionale ISO 16739:2013.

Grazie alla capacità di facilitare l'interoperabilità tra tutte le piattaforme software che lo permettono, molti governi stanno imponendo l'uso di file IFC per progetti di costruzione di proprietà dell'amministrazione pubblica.

L'iniziativa IFC ha avuto inizio nel 1994, quando dodici società statunitensi aderirono al consorzio "Industry Alliance for Interoperability", nel settembre 1995 l'Alleanza aprì l'adesione a tutte le parti interessate e nel 1997 cambiò il suo nome in "International Alliance for Interoperability". La nuova alleanza fu ricostituita come organizzazione non-profit, con l'obiettivo di sviluppare e promuovere l'"Industry Foundation Class" (IFC) come modello dati neutro di prodotto dell'edilizia utile a raccogliere informazioni lungo tutto il ciclo di vita di un edificio o un impianto.

Esistono diversi formati di IFC.

IFC-SPF è un formato di testo definito dalla ISO 10303-21 ("STEP-File"), in cui ogni riga consiste tipicamente di un singolo oggetto registrato e ha estensione ".ifc". Questo è il formato IFC più utilizzato, con il vantaggio di avere dimensioni compatte ma con un testo ancora leggibile.

IFC-XML è un formato XML definito dalla ISO 10303-28 ("STEP-XML"), con estensione ".ifcXML". Questo formato è adatto per l'interoperabilità di strumenti XML e lo scambio di modelli di edifici parziali. A causa delle grandi dimensioni dei modelli tipici di un edificio, questo formato è meno comune nella pratica.

IFC-ZIP è un formato ZIP compresso costituito da un file IFC-SPF incorporato e con estensione ".ifcZIP".

IFC definisce un modello entità-relazione. Esempi di entità sono elementi costruttivi come per esempio IfcWall, elementi geometrici, come IfcExtrudedAreaSolid e costrutti di base come IfcCartesianPoint. Le entità sono suddivise in "radicate" e "non radicate". Entità radicate divengono da IfcRoot e hanno un concetto di identità, insieme ad attributi di nome, descrizione, e controllo di revisione. Entità non radicate non hanno un'identità e le istanze esistono solo se si fa riferimento, direttamente o indirettamente, ad un'istanza radicata.

IfcRoot è suddiviso in tre concetti astratti: definizioni di oggetti, relazioni e insiemi di proprietà:

- IfcObjectDefinition cattura presenze e tipi di oggetti materiali
- IfcRelationship cattura le relazioni tra gli oggetti
- IfcPropertyDefinition cattura proprietà dinamicamente estensibili sugli oggetti IfcObjectDefinition

*IfcObjectDefinition* è suddiviso in presenze di oggetti e tipi di oggetti. *IfcObject* descrive la presenza dell'oggetto come l'installazione del prodotto con il numero di serie e la collocazione fisica nello spazio edificio. *IfcTypeObject* cattura le definizioni di tipo come il tipo di prodotto che ha un particolare numero di modello e comunemente quella determinata forma. Presenze e tipi sono ulteriormente suddivisi in sei concetti fondamentali: attori, controlli, gruppi, prodotti, processi, risorse.

- *IfcActor* rappresenta persone o organizzazioni.
- *IfcControl* rappresenta regole di controllo tempi, i costi e qualità, come l'ordine delle lavorazioni.
- *IfcGroup* rappresenta collezioni di oggetti per scopi particolari come i circuiti elettrici, o altro.
- *IfcProduct* rappresenta la presenza nello spazio, come elementi costruttivi fisici e posizioni spaziali.
- *IfcProcess* rappresenta occorrenze nel tempo quali attività, eventi e procedure.
- *IfcResource* rappresenta l'utilizzo di qualcosa con disponibilità limitata, come materiali, manodopera, e le attrezzature.

*IfcRelationship* descrive le relazioni tra gli oggetti. Ci sono cinque tipi di rapporto fondamentali: la composizione, l'assegnazione, la connettività, l'associazione, e la definizione.

- *IfcRelDecomposes* cattura un rapporto "parte-di-un-tutto"
- *IfcRelAssigns* cattura i rapporti di assegnazione in cui un oggetto consuma i servizi di un altro oggetto
- *IfcRelConnects* indica la connettività tra oggetti come una soletta collegata ad una trave
- *IfcRelAssociates* indica riferimenti esterni di un oggetto

*IfcPropertySet* rappresenta un insieme di proprietà associate a un evento oggetto o tipo di oggetto.

*IfcPropertySetTemplate* [IFC2x4] cattura definizioni delle proprietà e i relativi tipi di dati.

Prodotti

*IfcProduct* è la classe base per tutti gli oggetti fisici ed è suddiviso in elementi spaziali, elementi fisici, elementi di analisi strutturale.

I materiali possono essere definiti per un insieme di prodotti, o per strati, profili, o loro costituenti per sole parti specificate.

*IfcMaterial* indica un materiale specifico, con caratteristiche opzionali (ad esempio meccanico, termico) e di stili (ad esempio colori, texture).

*IfcMaterialLayerSet* cattura un elenco di strati, ciascuno indica un materiale di spessore specificato.

*IfcMaterialProfileSet* [IFC2x4] cattura un insieme di profili, ciascuno indica un materiale di una sezione specificata.

*IfcMaterialConstituentSet* [IFC2x4] coglie un insieme di componenti, ciascuna indicante un materiale utilizzato con un aspetto modellato nominalmente.

Le rappresentazioni possono essere definite esplicitamente in forma 3D, ed eventualmente con vincoli parametrici. Ogni rappresentazione è identificata da *IfcShapeRepresentation* con un nome ben definito.

*IfcProcess* è la classe base per i processi ed è suddiviso in attività, eventi e procedure. I processi possono avere durata ed essere programmati per verificarsi in periodi di tempo specificato. I processi possono essere sequenziati in modo tale che un'attività successiva può essere avviata solo dopo che un'attività precedente finisce, seguendo il metodo del Critical Path. I processi possono essere annidati in sotto-processi. I processi possono essere assegnati ai prodotti indicandone l'output prodotto dal lavoro svolto.

*IfcResource* è la classe base per le risorse ed è suddiviso in materiali, manodopera, attrezzature, subappalti, equipaggi, e altro ancora. Le risorse possono avere vari costi e calendari di disponibilità. Le risorse possono essere nidificati in sotto-risorse per l'assegnazione granulare. Le risorse possono essere assegnati a processi indicando le funzioni svolte per conto di una risorsa.

*IfcProject* incapsula un progetto globale e indica il nome del progetto, descrizione, unità di default, valuta, sistema di coordinate, e altre informazioni contestuali. Un file IFC valido deve sempre comprendere esattamente un'istanza *IfcProject*, da cui tutti gli altri oggetti hanno relazione diretta o indiretta. Un progetto può includere più edifici, più partecipanti, e più fasi secondo l'uso particolare. Oltre alle informazioni specifiche di progetto, un *IfcProject* può anche fare riferimento a progetti esterni da cui condivide le definizioni o possono essere importati tipi di prodotto. Ogni progetto esterno è incapsulato con *IfcProjectLibrary* [IFC2x4] insieme a *IfcRelAssociatesLibrary* e *IfcLibraryInformation* per identificare la particolare versione della libreria di progetto importata. I progetti supportano un controllo di revisione in cui qualsiasi entità radicata ha un identificatore univoco e può essere contrassegnato come aggiunto, modificato, cancellato, o nessun cambiamento. Tale capacità consente a più file IFC di unirsi in modo deterministico, garantendo l'integrità dei dati senza intervento umano.

Revit permette di salvare un modello come file IFC da utilizzare in un'applicazione certificata IFC che non utilizza il formato di file RVT come nel caso di SOLIDWORKS. Si è visto, però, che questo comporta una notevole perdita di dati, tra cui i materiali che, ovviamente, conferiscono le caratteristiche strutturali dello scalone. In ogni caso, l'esportazione della geometria solida dello scalone ne ha facilitato l'analisi strutturale, in quanto non è stato necessario rimodellare da zero la struttura.

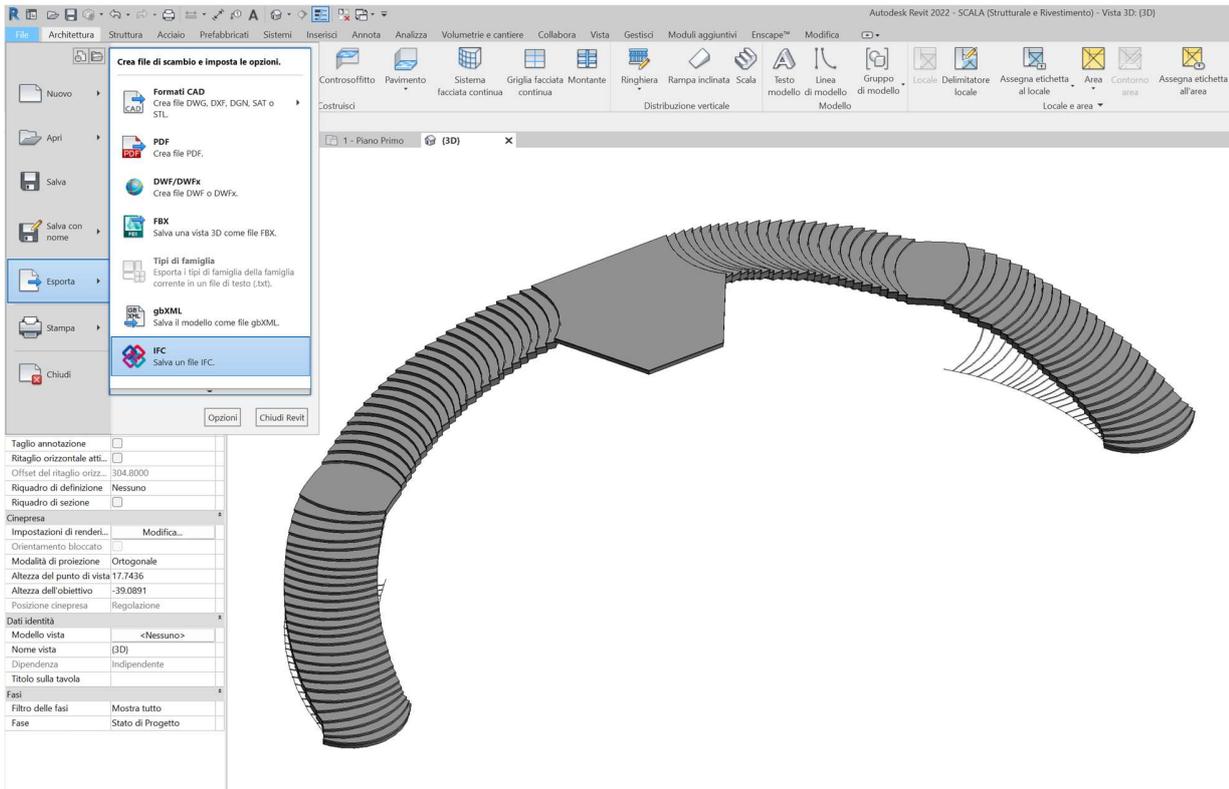


FIGURA 62. ESPORTAZIONE DA .RVT A .IFC

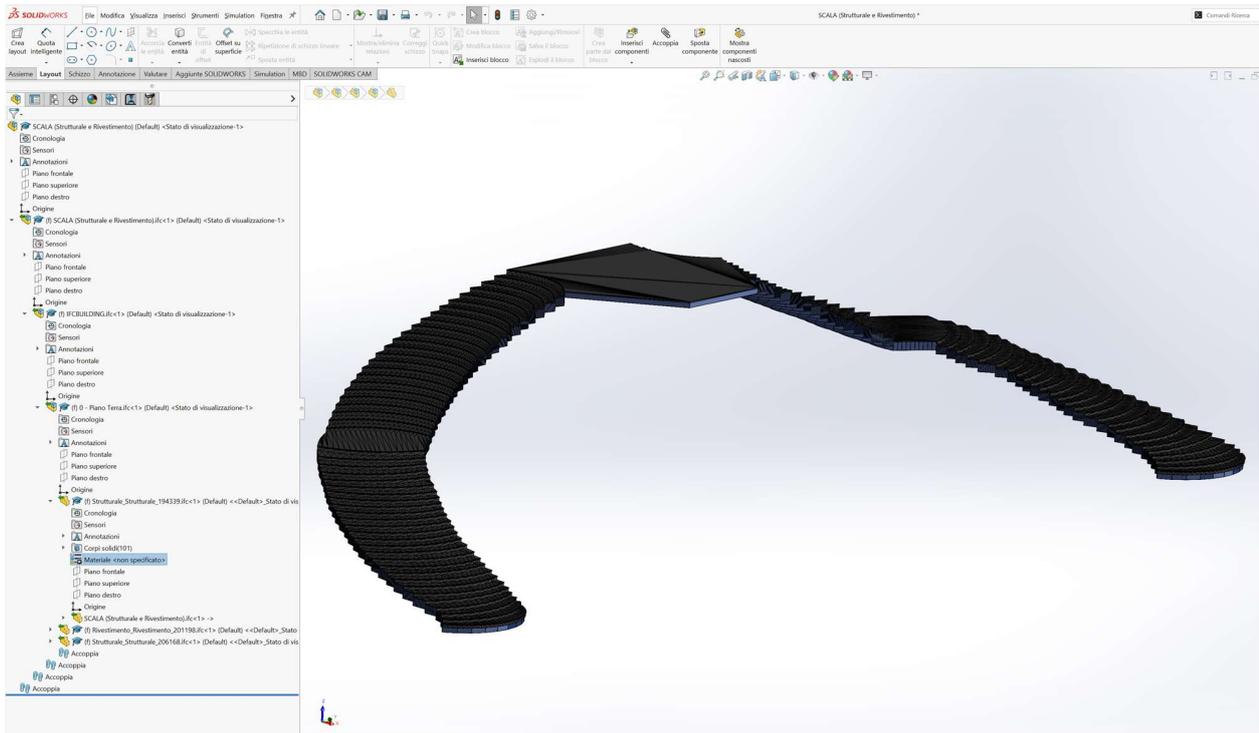


FIGURA 63. APERTURA DEL FILE IN FORMATO .IFC IN SOLIDWORKS. IN EVIDENZA LA DICITURA *MATERIALE <<NON SPECIFICATO>>*.

## 5.2 Definizione dei materiali

La definizione dei materiali che compongono la struttura non è un compito banale e richiede una solida conoscenza degli edifici in muratura esistenti per modellare correttamente il comportamento strutturale e valutare la sicurezza. Questa conoscenza è definita come il "livello di conoscenza" della struttura. Gli edifici in muratura esistenti spesso presentano incertezze riguardo al tipo di materiale utilizzato, la struttura interna delle murature e la connessione tra gli elementi strutturali. Queste incertezze possono essere accentuate dalla mancanza di documentazione relativa a interventi passati di trasformazione, riparazione e consolidamento, soprattutto per gli edifici molto datati. La Circolare 2019 fornisce utili indicazioni sulle modalità di esecuzione di prove e indagini per gli edifici in muratura esistenti.

A causa della diversità delle tecniche costruttive e dei materiali utilizzati nelle costruzioni in muratura, il rilevamento dell'edificio riveste un ruolo cruciale. Questo coinvolge tre livelli di approfondimento crescente: indagini limitate, estese o esaustive.

Le indagini limitate coinvolgono un esame visivo e la rimozione di intonaco per esaminare la muratura. Sono utili per identificare il grado di connessione tra le murature ortogonali, le zone di appoggio dei solai, i collegamenti tra solai e pareti, e altre caratteristiche chiave.

Le indagini estese coinvolgono un esame sistematico di tutto l'edificio, ma non esiste un numero minimo specifico di saggi da eseguire.

Le indagini esaustive comprendono tutte le prove delle indagini estese e aggiungono prove dirette sui materiali per la caratterizzazione meccanica.

Le murature sono composte da mattoni e malta, e le loro caratteristiche meccaniche dipendono dalla tecnica costruttiva, dalla posa in opera, dalle caratteristiche dei materiali e dallo stato di conservazione. La Circolare 2019 fornisce valori indicativi dei parametri meccanici per diverse tipologie di muratura, ma tali valori sono solo di riferimento e non vincolanti. Inoltre, la Circolare 2019 considera la possibilità di migliorare le proprietà della muratura applicando coefficienti migliorativi. Questi coefficienti tengono conto di miglioramenti come l'uso di malta di buona qualità, la presenza di elementi trasversali di collegamento e altro. Per interventi di consolidamento, ci sono coefficienti correttivi specifici basati sulla tipologia di intervento. Questi includono l'iniezione di miscele leganti, l'intonaco armato, la ristilatura armata e connessione dei paramenti, nonché l'uso di diatoni artificiali o tirantini antiespulsivi.

Per valutare le proprietà meccaniche dei materiali in base al livello di conoscenza raggiunto, sono associati fattori di confidenza (FC) ai tre livelli di conoscenza: LC1, LC2 e LC3. A ciascun livello corrisponde un valore specifico di FC, che influisce sulle proprietà meccaniche utilizzate nell'analisi. Inoltre, ci sono fattori di correzione per migliorare la valutazione delle proprietà meccaniche in base all'effettivo stato dell'edificio. Questi fattori considerano elementi come la qualità della malta, la presenza di ricorsi o listature e la connessione tra i paramenti. In sintesi, la valutazione delle murature degli edifici esistenti in muratura coinvolge molteplici fasi, dall'analisi visiva all'esecuzione di prove e indagini, con l'obiettivo di ottenere una conoscenza accurata della struttura per scopi di sicurezza e progettazione strutturale.

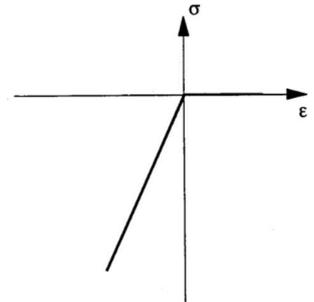
La definizione del livello di conoscenza della muratura in esame non è oggetto di questa tesi. È stata, invece affrontata nella Tesi di Laurea Magistrale *“Analisi strutturale di palazzi monumentali: il Palazzo dei Principi di Carignano di Torino”* di Nicolas Barale al Politecnico di Torino. Da questa sono stati estrapolati i dati necessari al fine di realizzare l'analisi strutturale dello scalone.

$f$ [N/mm <sup>2</sup> ]	2,6
$\tau_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,07
$f_{vo}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	0,15
$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	1500
$G$ [N/mm <sup>2</sup> ]	400
$w$ [KN/m <sup>3</sup> ]	18

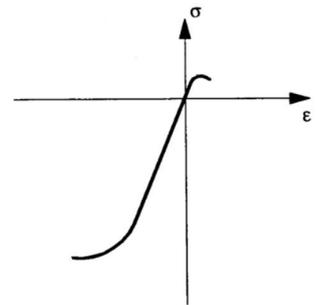
FIGURA 64. PARAMETRI MECCANICI DELLA MURATURA

Nella definizione del materiale è necessario indicare anche il legame costitutivo e il criterio di rottura. Nella pratica ingegneristica, per semplificare la rappresentazione del comportamento a compressione della muratura, si utilizzano vari modelli, tra cui:

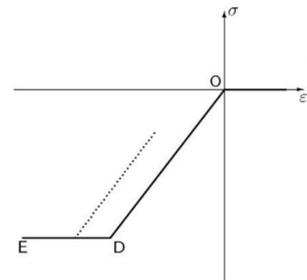
- **Modello Elastico Lineare:** Questo è il modello più semplice e ampiamente utilizzato, che assume che la muratura segua una risposta elastica lineare quando viene sottoposta a carichi di compressione. Questo modello è facile da applicare ma può essere troppo rigido e poco conservativo poiché non tiene conto delle tensioni massime o delle limitate capacità di deformazione.



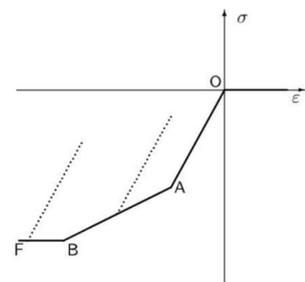
- **Modello Elastico Non Lineare:** Questo modello è una rappresentazione più accurata del comportamento della muratura sotto carichi di compressione, in quanto considera una funzione non lineare per interpolare i dati sperimentali. È preferibile al modello elastico lineare poiché tiene conto delle limitazioni del materiale, inclusa la resistenza a trazione, ma non tiene conto delle deformazioni irreversibili ed è inadatto per carichi ciclici.



- **Modello Elastico Perfettamente Plastico:** Questo modello tiene conto delle deformazioni irreversibili e della limitata capacità di compressione del materiale. Prevede una fase elastica seguita da un tratto a sforzo costante in cui si verificano deformazioni irreversibili. Tuttavia, calibrare il punto di transizione può essere complicato e potrebbe portare a un modello poco conservativo. Nel grafico si vuole evidenziare che il percorso di scarico, se si supera il punto D, differisce da quello di carico.



- **Modello Elasto-Plastico Incrudente Perfettamente Plastico:** Questo modello rappresenta il legame sforzo-deformazione come una spezzata. È un'estensione del modello elastico perfettamente plastico e include un tratto (AB) in cui si verificano deformazioni irreversibili a sforzi crescenti. Questo modello è accettabile se il tratto di sforzo costante è orizzontale o poco inclinato, ma può causare difficoltà se si verifica un "rammollimento" del materiale. Il percorso di scarico, se si supera il punto A, differisce da quello di carico.



Questi modelli costitutivi forniscono una base per comprendere e analizzare il comportamento della muratura sotto carichi di compressione. Tuttavia, è importante notare che la muratura può mostrare comportamenti complessi sotto carichi di diversi tipi. Non è, quindi, così banale identificare un unico criterio di rottura in quanto può verificarsi una rottura dovuta a scorrimento fra i giunti, una rottura dovuta a fessurazione

prodotta da una tensione principale di trazione o una rottura dovuta a schiacciamento della muratura nella zona più sollecitata a compressione.

Nel caso in cui questa sia sottoposta a sforzi di compressione, la rottura avviene attraverso lo sviluppo di lesioni di spacco nei blocchi di muratura. Le fessure verticali che si sviluppano non attraversano i giunti orizzontali di malta ma solo i laterizi o i blocchi. Questo è causato dalla diversa deformabilità dei costituenti della muratura.

La causa principale della rottura è la differenza nella deformabilità dei componenti della muratura. La malta, essendo più deformabile, è confinata tra gli strati di mattoni, creando uno stato di compressione triassiale. Di conseguenza, si sviluppa uno stato di trazione biassiale sulle facce dei mattoni che aderiscono alla malta, il che alla fine porta alla rottura man mano che il carico aumenta.

Spesso la muratura può subire anche un collasso che avviene in modo fragile e rapido. Ciò è caratterizzato dall'espulsione di frammenti di laterizio mentre la muratura si disgrega. Questo tipo di collasso è spesso causato da pressoflessione e da taglio in corrispondenza delle parti più deboli.

È interessante evidenziare che gli esperimenti hanno dimostrato che le murature con malte deboli si rompono a valori di tensione superiori alla resistenza della malta stessa. L'utilizzo di mattoni particolarmente resistenti alla trazione, quindi, può migliorare le prestazioni della muratura. Inoltre, le murature con una sezione a bozze e a sacco mostrano una modalità di crisi differente.

In generale, diversi fattori influenzano il comportamento della muratura sotto carico di compressione, tra cui la geometria del mattone, lo spessore dei giunti, la resistenza del mattone e della malta, le caratteristiche deformative di mattone e malta, l'aderenza tra malta e mattone, la capacità di assorbimento d'acqua del mattone e la capacità di ritenzione d'acqua della malta. Inoltre, la muratura può mostrare un interessante paradosso: all'aumentare della compressione verticale, si verifica un'espansione laterale della malta che è molto più elevata dei laterizi o dei blocchi. Questo porta all'insorgere di un'interazione tangenziale tra i letti di malta e i blocchi stessi, creando uno stato di sollecitazione laterale. I laterizi o i blocchi sono soggetti a compressione verticale accompagnata da sollecitazione di trazione laterale orizzontale, mentre i letti di malta sono sottoposti a compressione verticale accompagnata da sollecitazione di compressione laterale orizzontale. La malta risulta confinata dalla compressione laterale, mentre i blocchi subiscono una riduzione della loro resistenza a causa della trazione orizzontale.

La resistenza a trazione della muratura è notevolmente inferiore rispetto a quella a compressione. Quando si verificano delle sollecitazioni di trazione, queste tendono a causare distacchi attraverso i giunti di malta. In particolare, si tratta di una perdita di adesione della malta piuttosto che una rottura a trazione della malta stessa. La resistenza alla trazione dipende principalmente dalle forze di adesione tra i mattoni e la malta.

Questa situazione è particolarmente evidente nel caso delle murature storiche, dove la qualità della malta e lo stato di conservazione dei materiali possono compromettere in modo significativo le proprietà coesive della muratura. In queste condizioni, la muratura diventa particolarmente vulnerabile alle sollecitazioni a trazione, e può verificarsi una perdita di adesione tra mattoni e malta, compromettendo la stabilità strutturale dell'edificio. Pertanto, nel restauro e nella conservazione delle murature storiche, è essenziale considerare attentamente la resistenza a trazione e prendere misure adeguate per garantire la durabilità e la sicurezza della struttura.

La rottura attribuibile al taglio può avvenire in diversi modi, che non sempre possono essere rappresentati come il semplice schema di un pannello isotropo che si fessura a causa della tensione principale di trazione. I modi di rottura possono includere scorrimento per taglio nei giunti orizzontali, rottura per taglio-trazione nella

zona centrale della parete o rottura per compressione in corrispondenza di un angolo basso del pannello, a seconda delle condizioni specifiche della muratura, della qualità della malta e dei carichi verticali.

In sintesi, la resistenza a taglio della muratura è un aspetto complesso che deve essere considerato attentamente nell'analisi strutturale, specialmente quando si affrontano situazioni di azioni orizzontali come quelle sismiche.

In generale, nel comportamento della muratura sotto stati di sollecitazione pluriassiali, è necessario applicare un criterio di resistenza che permette di determinare quando la muratura raggiunge il punto di rottura. Un criterio comunemente utilizzato è il criterio di Mohr-Coulomb. In questo criterio vengono tracciati tutti i cerchi di Mohr relativi alle condizioni di crisi per il materiale in esame. Successivamente, si costruisce l'involuppo dei cerchi di Mohr corrispondenti alle condizioni di crisi. Ciò permette di tracciare una curva limite che racchiude le combinazioni di sforzo che il materiale può sopportare in sicurezza.

Questo modello di calcolo permette di analizzare il comportamento della muratura in condizioni di sforzi complessi e di prevedere quando si verifica la rottura. È importante notare che questo modello tiene conto delle proprietà del materiale costituente la muratura e fornisce una guida per valutare la sicurezza delle strutture di muratura.

Nel caso in esame, per semplicità, si è assegnato un comportamento del materiale del tipo elastico lineare e un criterio di rottura alla Mohr Coulomb.

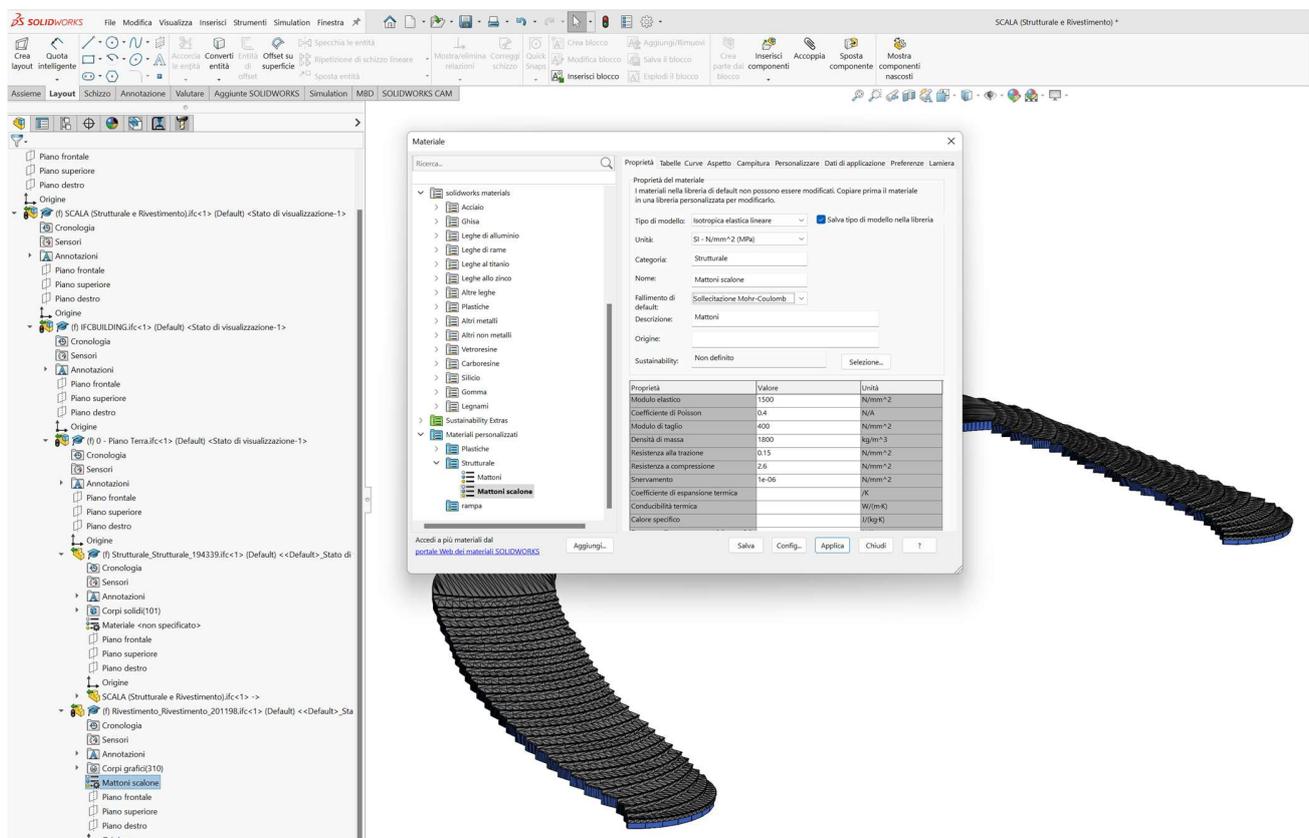


FIGURA 65. ASSEGNAZIONE DELLE PROPRIETÀ MATERIALE, DEL MODELLO COSTITUTIVO E DEL CRITERIO DI ROTTURA.

## 5.3 Analisi statica

Al fine di eseguire l'analisi statica dello scalone, è necessario effettuare l'analisi dei carichi unitari. È necessario, quindi, definire i carichi permanenti strutturali ( $g_1$ ), ovvero, il peso proprio di tutte le parti strutturali costituenti la scala quali le solette rampanti e le solette dei pianerottoli, i carichi permanenti non strutturali ( $g_2$ ) dati dal peso proprio delle parti non strutturali quali i rivestimenti di alzata e pedata e dei pianerottoli e i carichi variabili o di esercizio ( $q_k$ ) definiti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni in funzione della destinazione d'uso della scala (Figura 66).

Tabella 3.1.II – Valori dei carichi d'esercizio per le diverse categorie di edifici

Cat.	Ambienti	$q_k$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$Q_k$ [kN]	$H_k$ [kN/m]
A	<b>Ambienti ad uso residenziale.</b> 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	<b>Uffici.</b> 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	<b>Ambienti suscettibili di affollamento</b> 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	<b>Ambienti ad uso commerciale.</b> Cat. D1 Negozi Cat. D2 Centri commerciali, mercati, grandi magazzini, librerie...	4,00 5,00	4,00 5,00	2,00 2,00
E	<b>Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale.</b> Cat. E1 Biblioteche, archivi, magazzini, depositi, laboratori manifatturieri Cat. E2 Ambienti ad uso industriale, da valutarsi caso per caso	$\geq 6,00$ —	6,00 —	1,00* —
F-G	<b>Rimesse e parcheggi.</b> 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	<b>Coperture e sottotetti</b> 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 — —

\* 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

FIGURA 66. CARICHI D'ESERCIZIO - DM 14 GENNAIO 2008 – NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI CAP. 3 AZIONI SULLE COSTRUZIONI

Si hanno:

$$g_1 = 2,7 \text{ KN/m}^2$$

$$g_2 = 0,80 \text{ KN/m}^2$$

$$q_k = 4 \text{ KN/m}^2$$

L'analisi allo stato limite ultimo viene eseguita con la seguente combinazione di carico:

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1}$$

Dove i coefficienti di sicurezza  $\gamma$  equivalgono a:

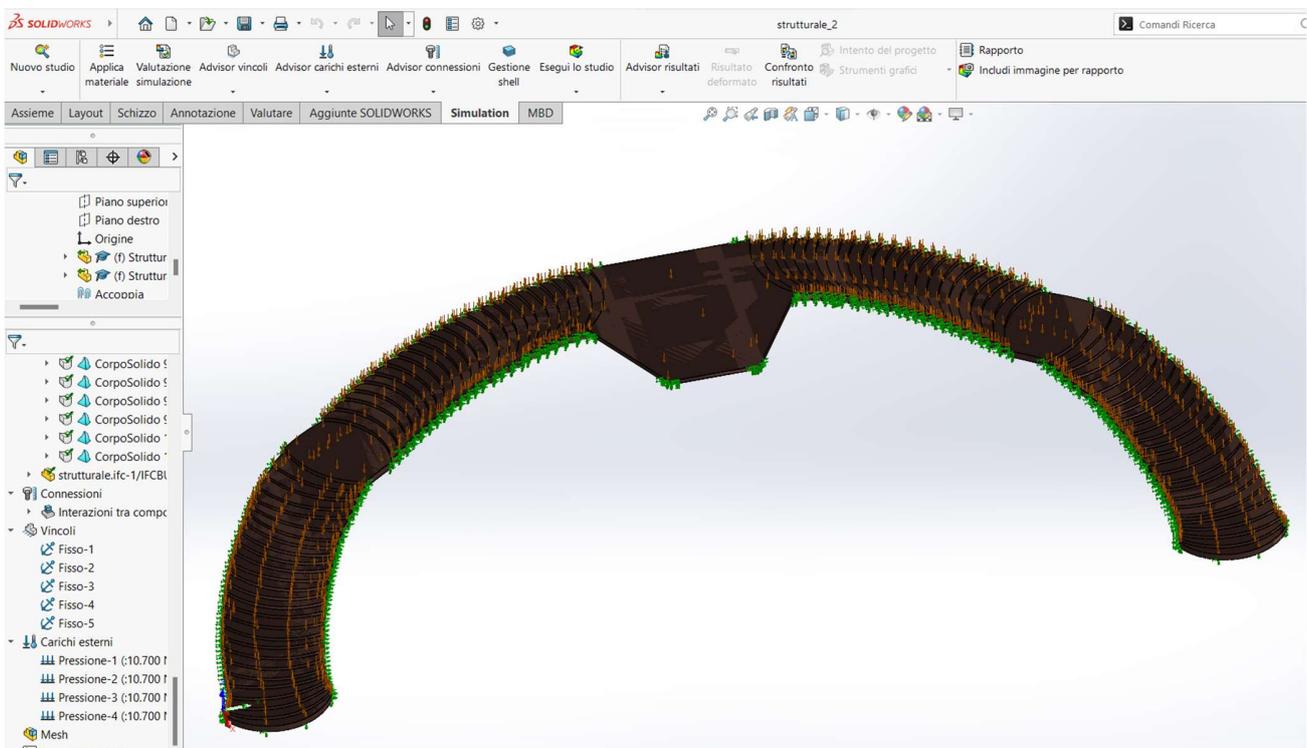
$$\gamma_{g1} = 1,3$$

$$\gamma_{g2} = 1,5$$

$$\gamma_{q1} = 1,5$$

Il carico uniformemente distribuito applicato è, quindi,  $q = 1,3 \cdot 2,7 + 1,5 \cdot 0,8 + 1,5 \cdot 4 = 10,7 \text{ KN/m}^2$ .

Si procede, quindi, all'applicazione del carico e alla definizione dei vincoli, quali degli incastri (Figura 67). Per quanto riguarda l'interazione tra gli scalini, questa viene determinata in automatico da Solidworks (Figura 69).



**FIGURA 67. APPLICAZIONE DEI CARICHI E DEI VINCOLI PER L'ANALISI STATICA**

Si riportano, a seguire, i grafici delle analisi effettuate (figure da 71 a 83).

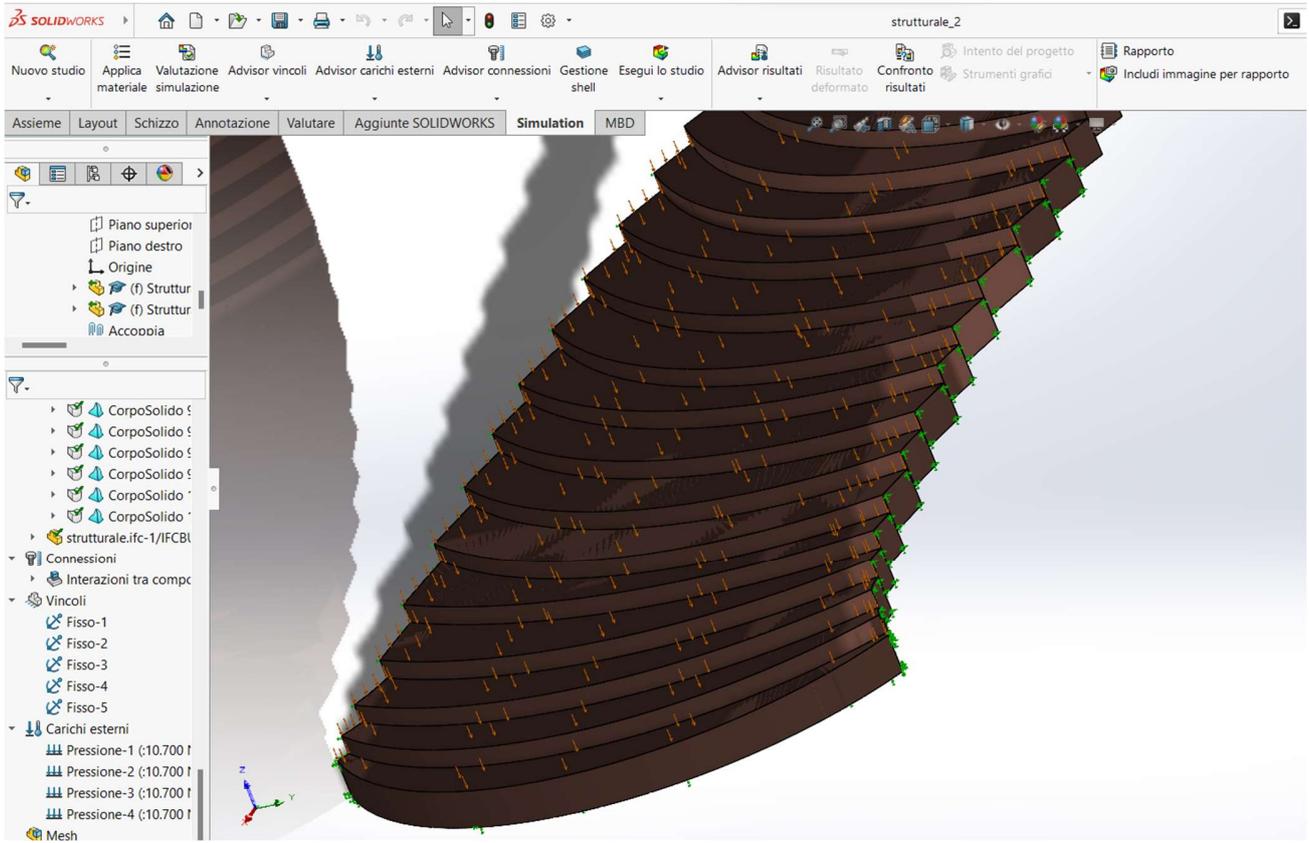


FIGURA 68. VISTA DI DETTAGLIO

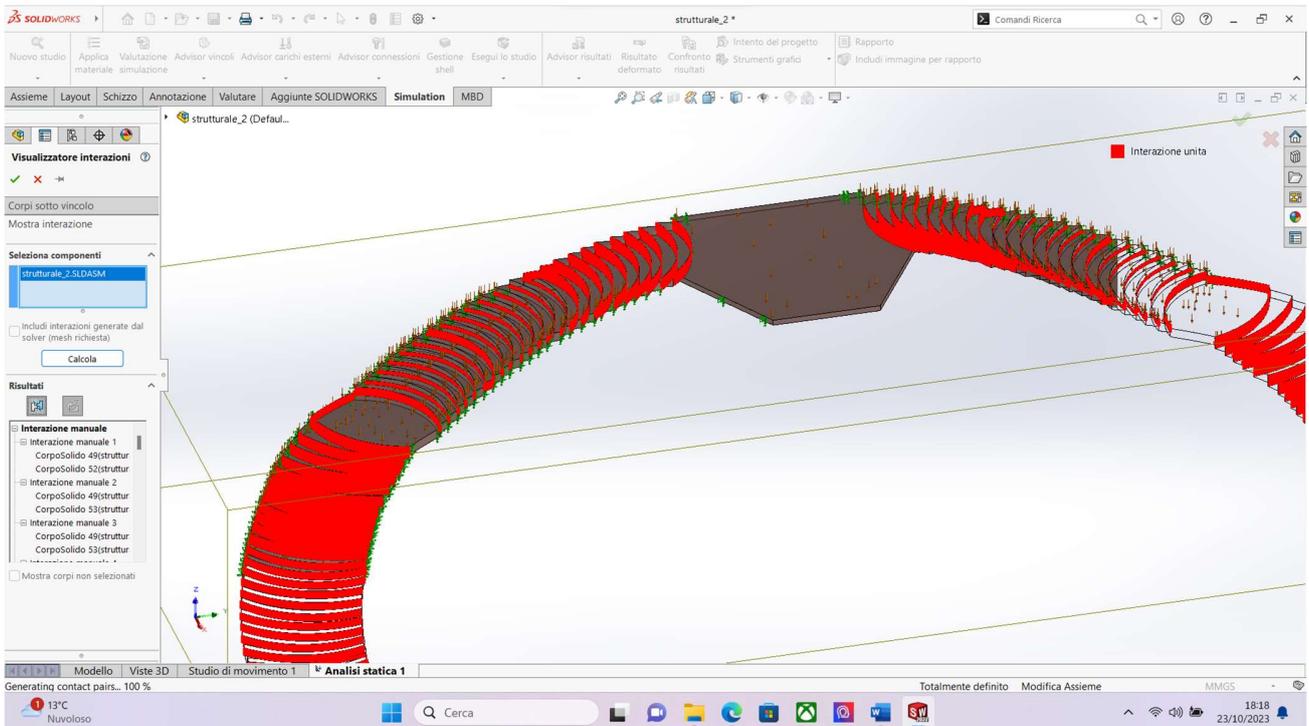


FIGURA 69. INTERAZIONE TRA I COMPONENTI

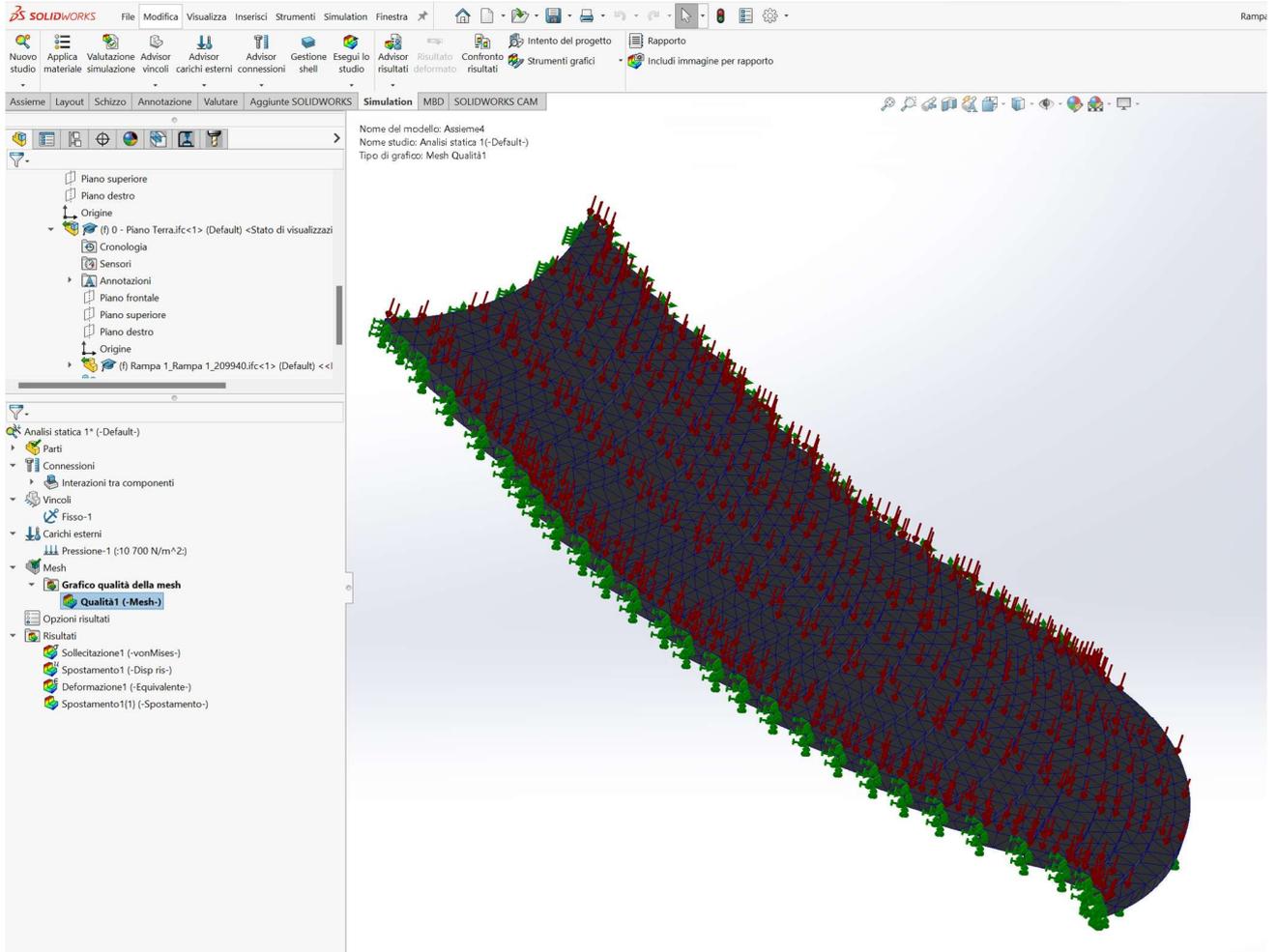


FIGURA 70. DEFINIZIONE DELLA MESH ADOTTATA PER LA PRIMA RAMPA

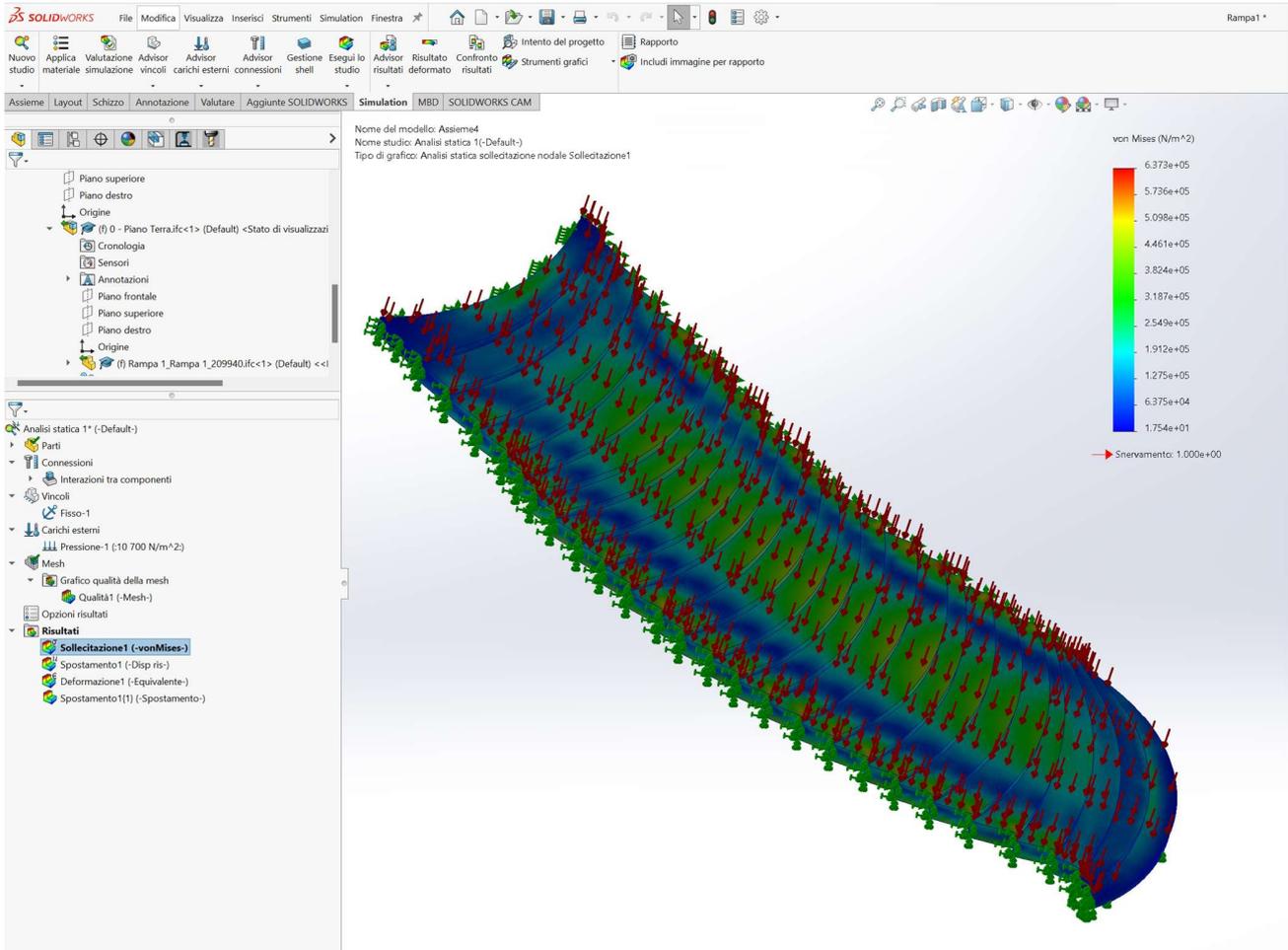


FIGURA 71. ANALISI STATICA – GRAFICO DELLE SOLLECITAZIONI PER LA PRIMA RAMPA

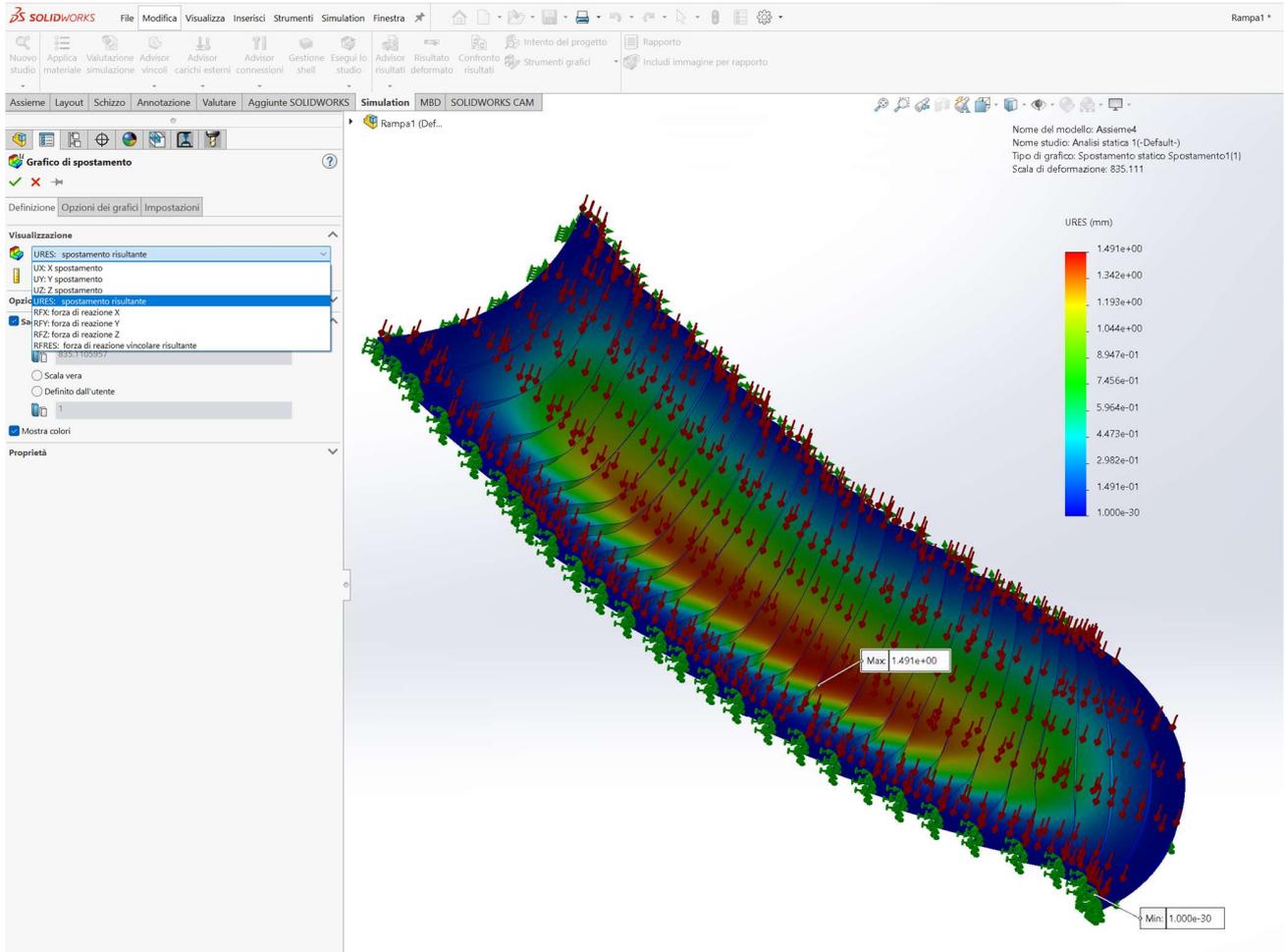


FIGURA 72. ANALISI STATICA – GRAFICO DEGLI SPOSTAMENTI PER LA PRIMA RAMPA

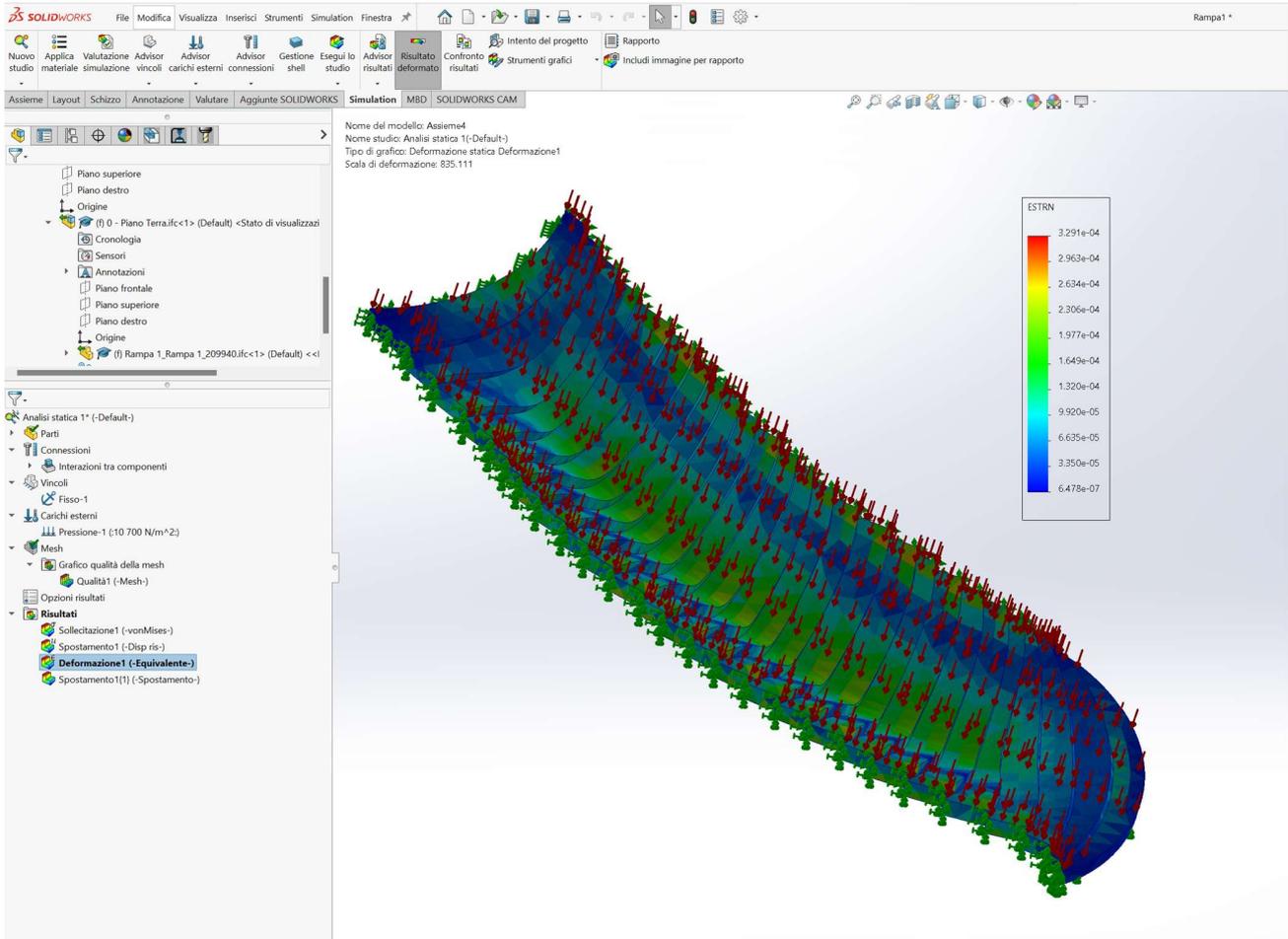


FIGURA 73. ANALISI STATICA – GRAFICO DELLE DEFORMAZIONI PER LA PRIMA RAMPA

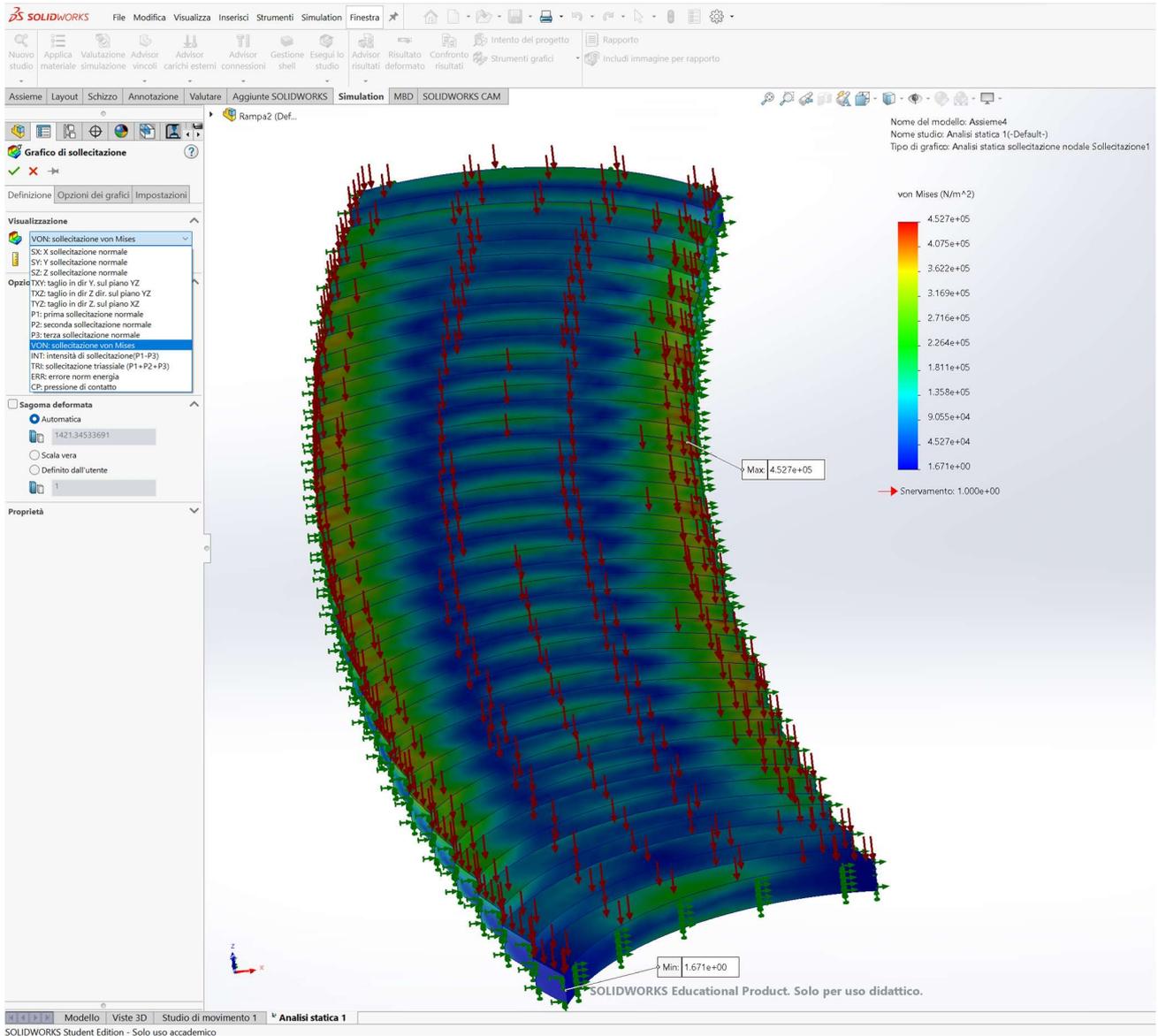


FIGURA 74. ANALISI STATICA – GRAFICO DELLE SOLLECITAZIONI PER LA SECONDA RAMPA

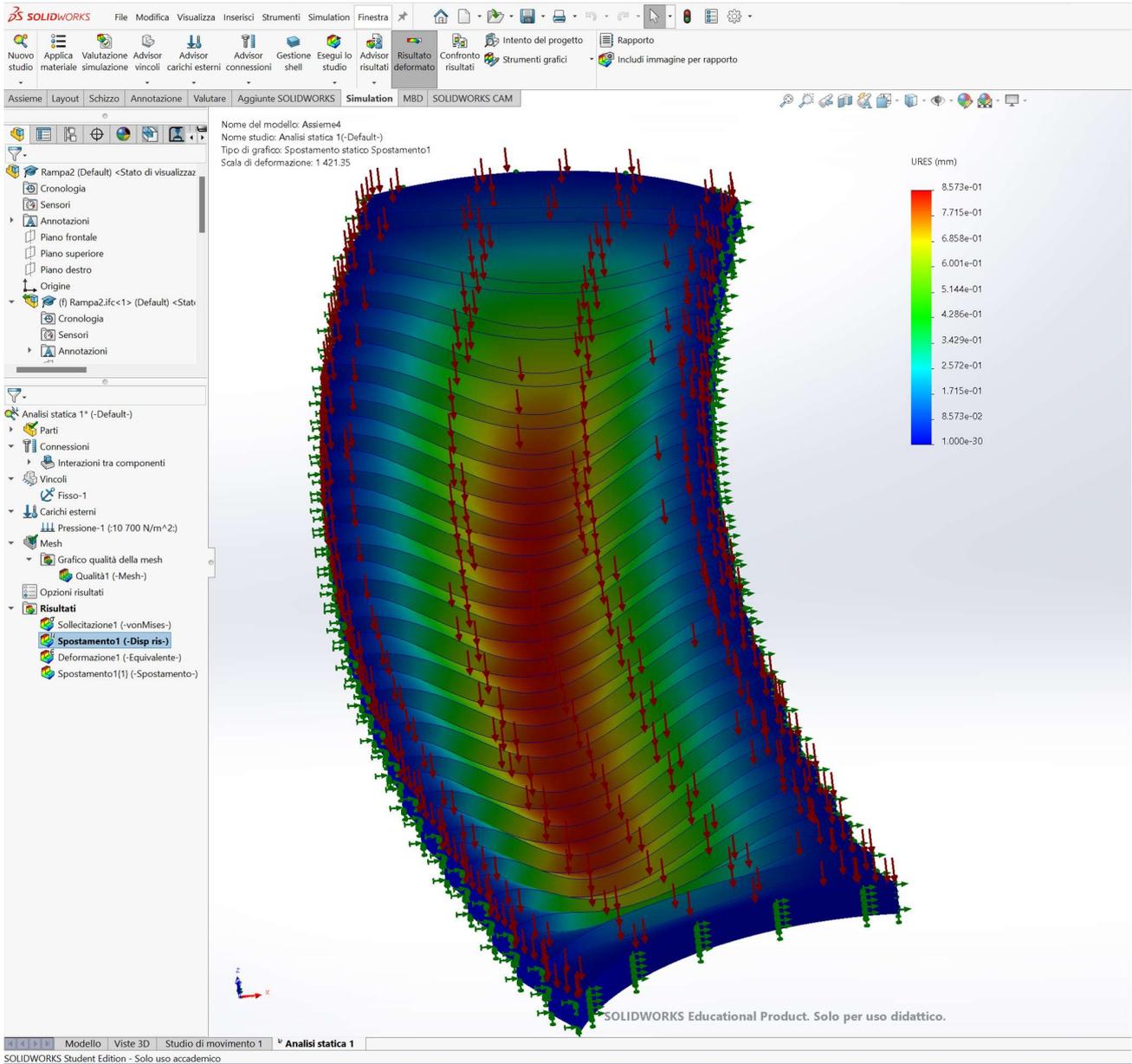


FIGURA 75. ANALISI STATICA – GRAFICO DEGLI SPOSTAMENTI PER LA SECONDA RAMPA IN CONFIGURAZIONE DEFORMATA

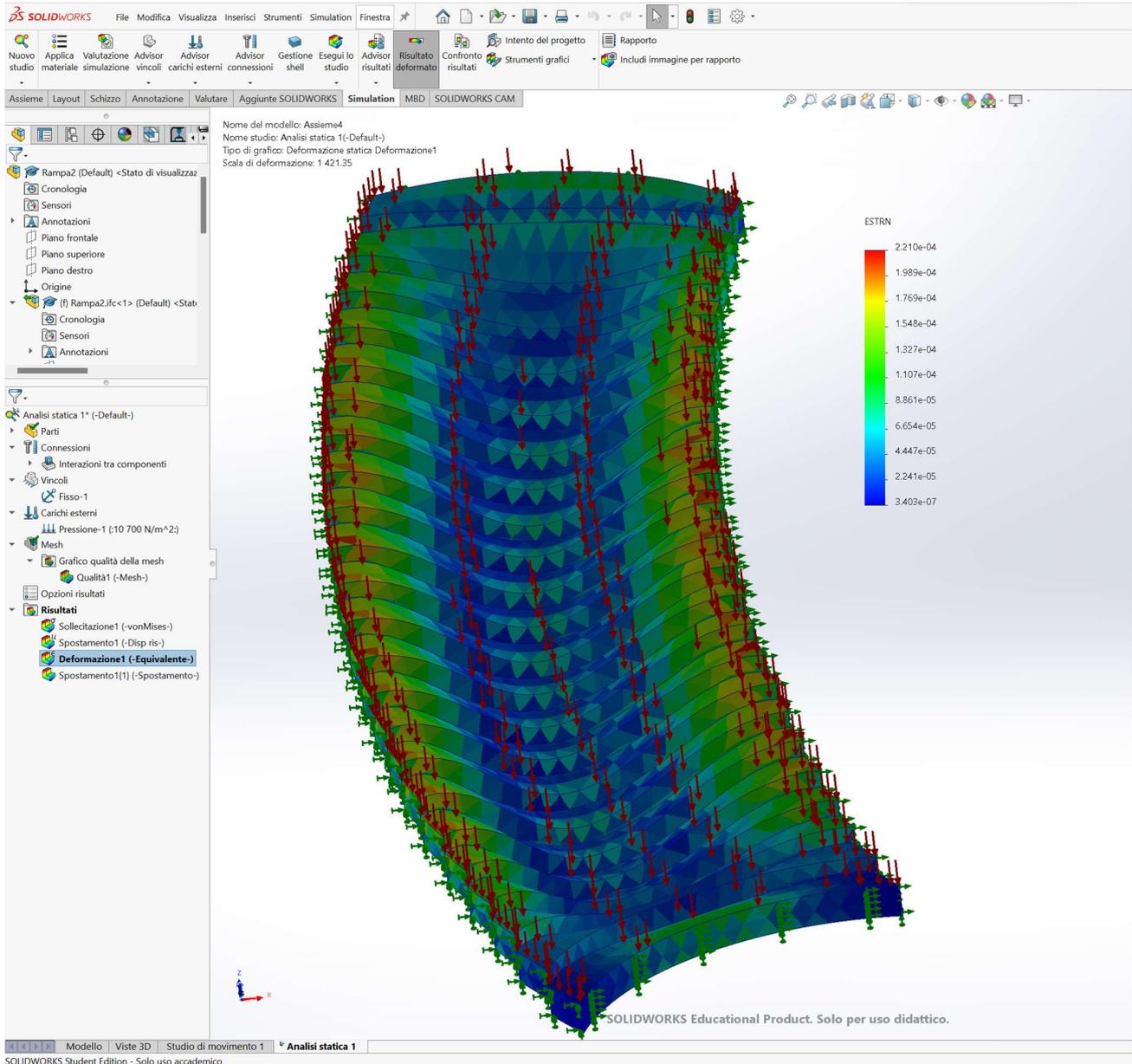


FIGURA 76. ANALISI STATICA – GRAFICO DELLE DEFORMAZIONI PER LA SECONDA RAMPA

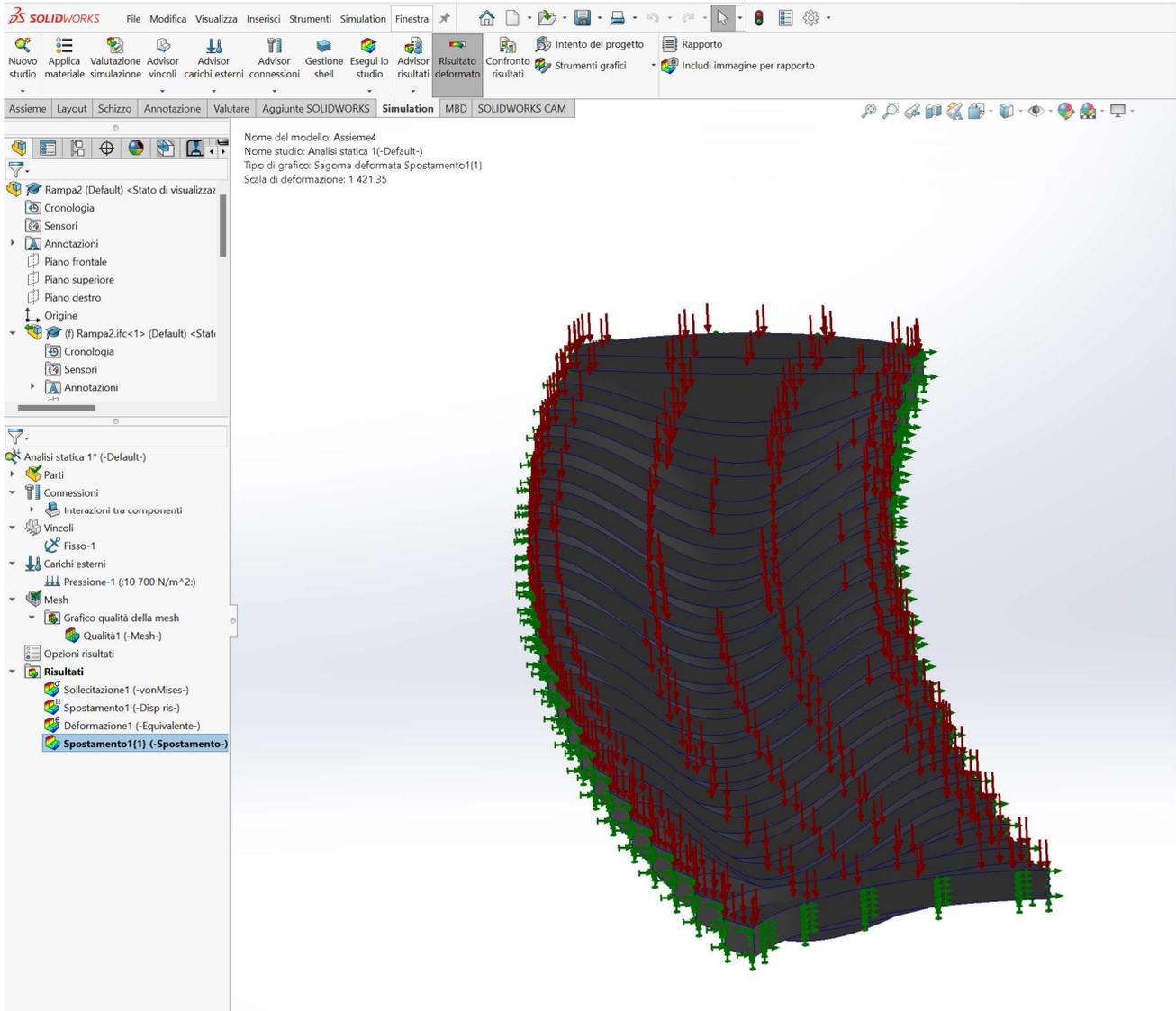


FIGURA 77. ANALISI STATICA – CONFIGURAZIONE DEFORMATA LA SECONDA RAMPA

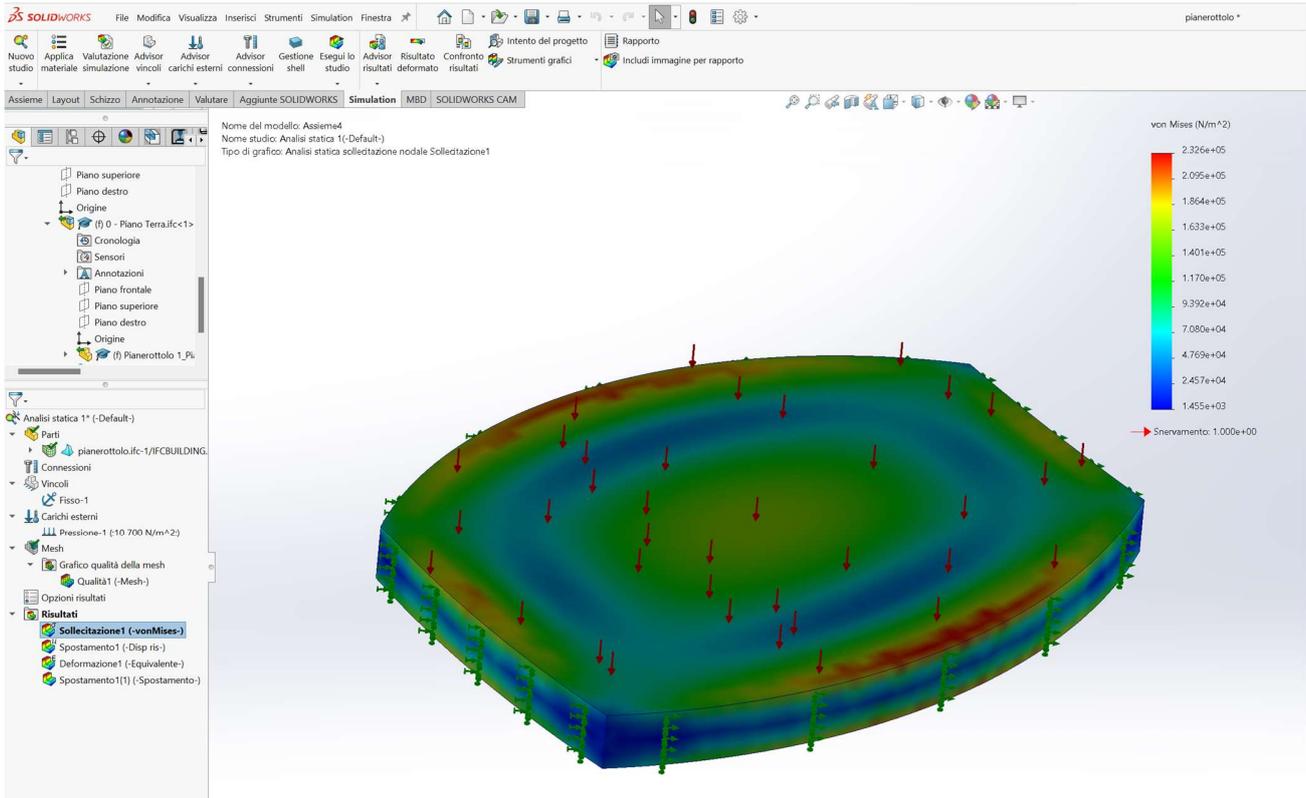


FIGURA 78. ANALISI STATICA – GRAFICO DELLE SOLLECITAZIONI PER IL PIANEROTTOLO

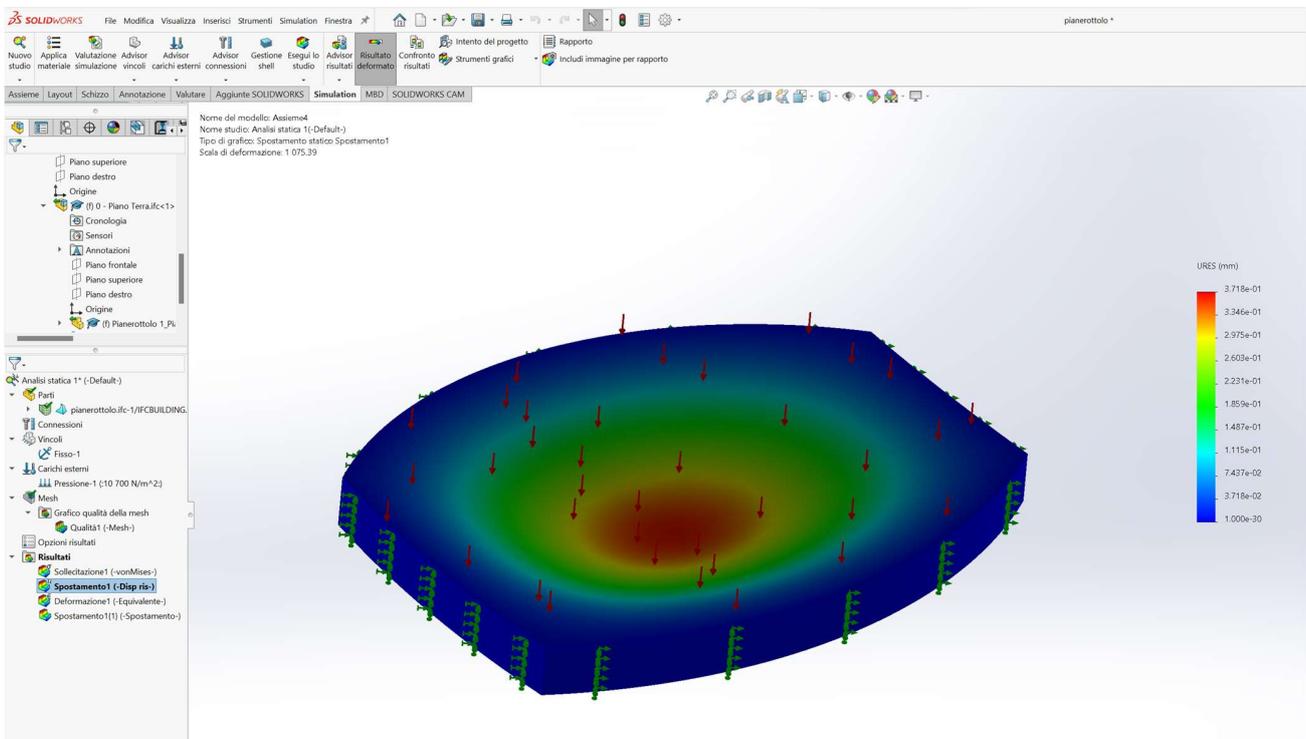


FIGURA 79. ANALISI STATICA – GRAFICO DEGLI SPOSTAMENTI PER IL PIANEROTTOLO

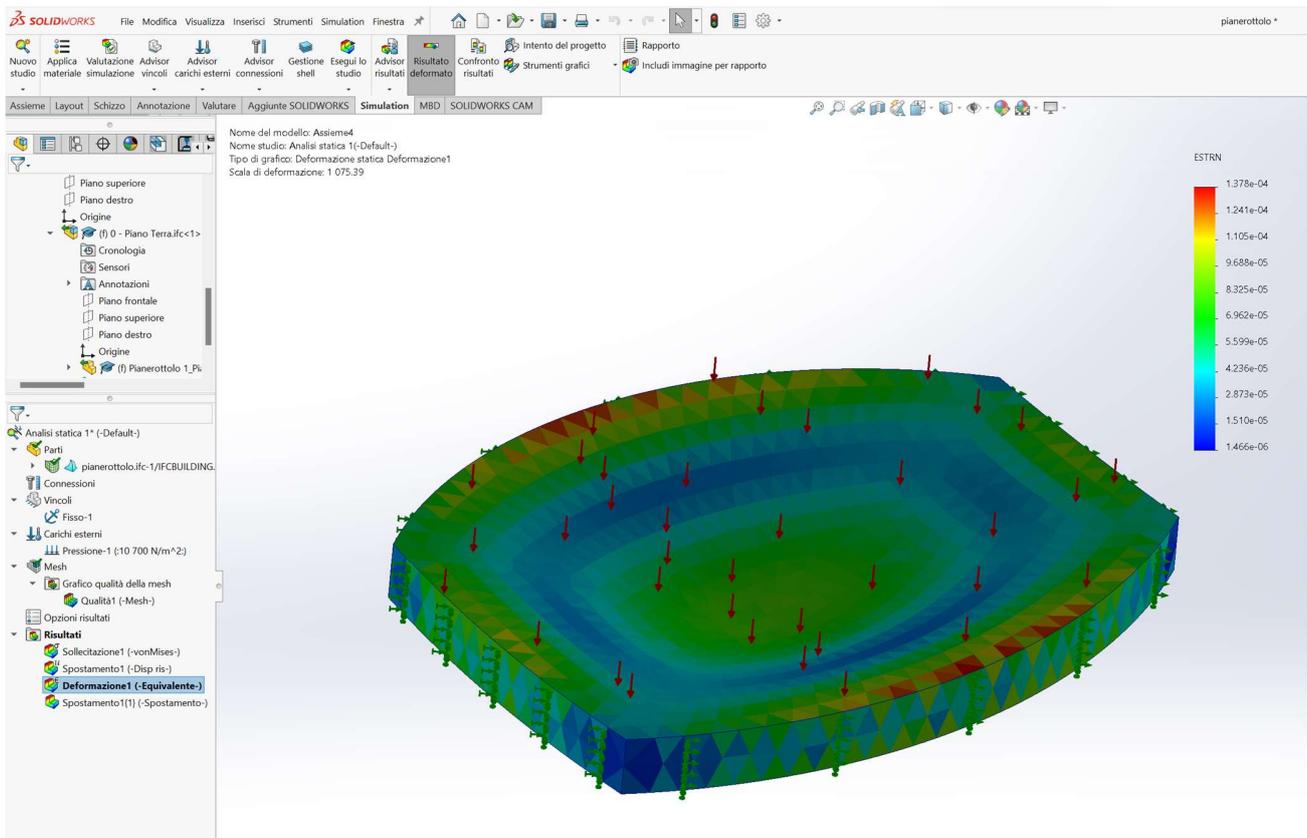


FIGURA 80. ANALISI STATICA – GRAFICO DELLE DEFORMAZIONI PER IL PIANEROTTOLO

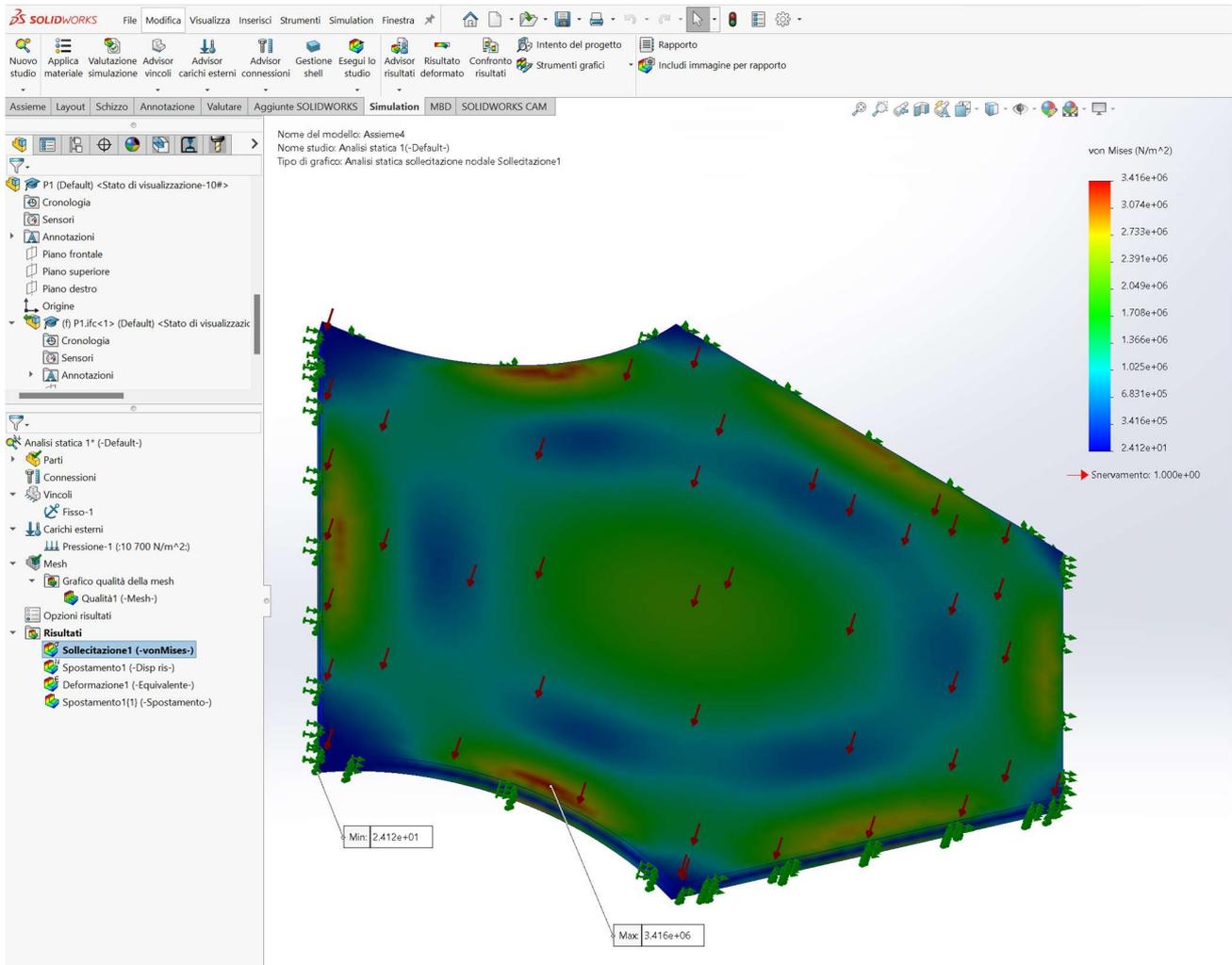


FIGURA 81. ANALISI STATICA – GRAFICO DELLE SOLLECITAZIONI PER IL PRIMO PIANO

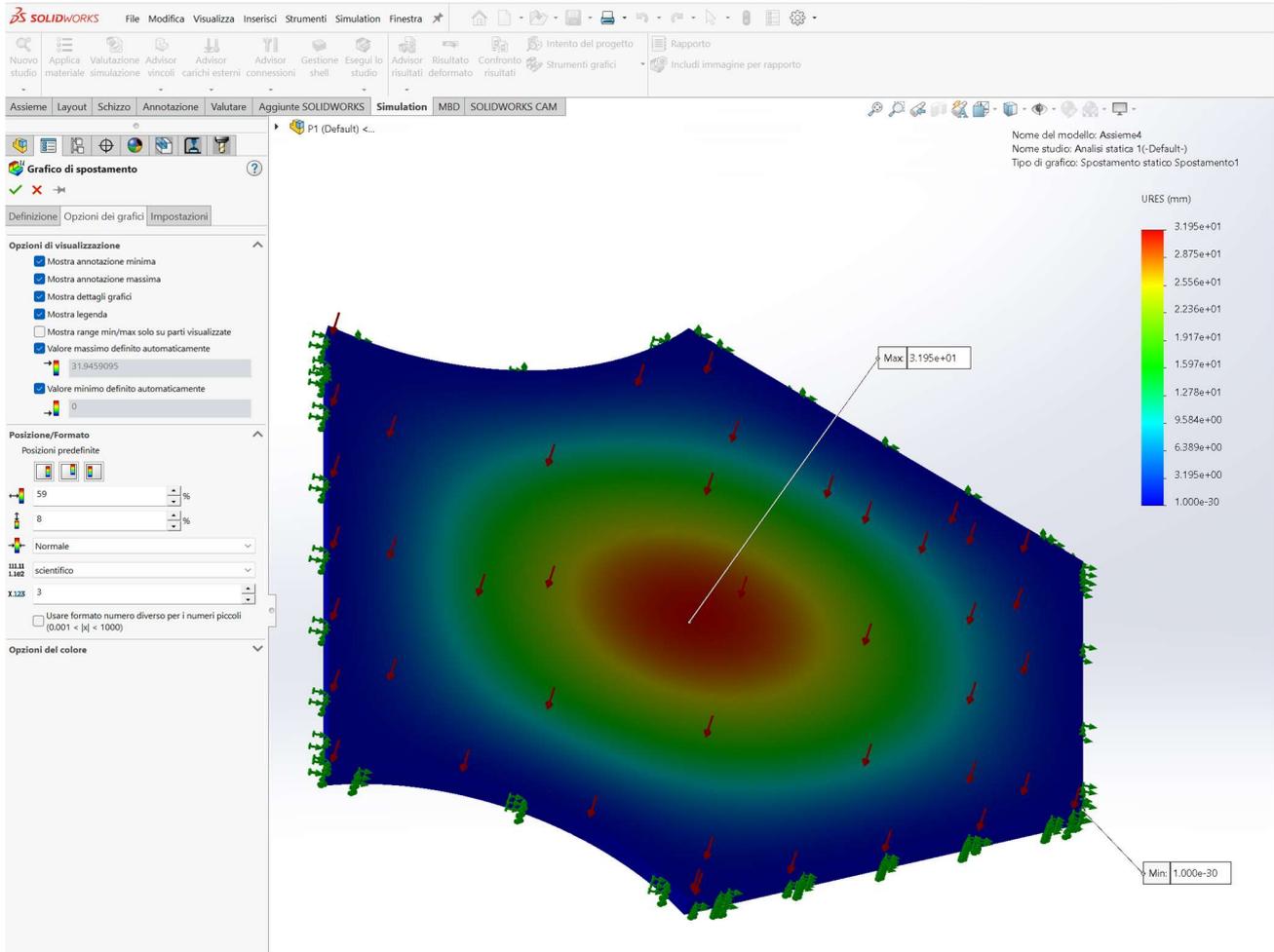


FIGURA 82. ANALISI STATICA – GRAFICO DEGLI SPOSTAMENTI PER IL PRIMO PIANO

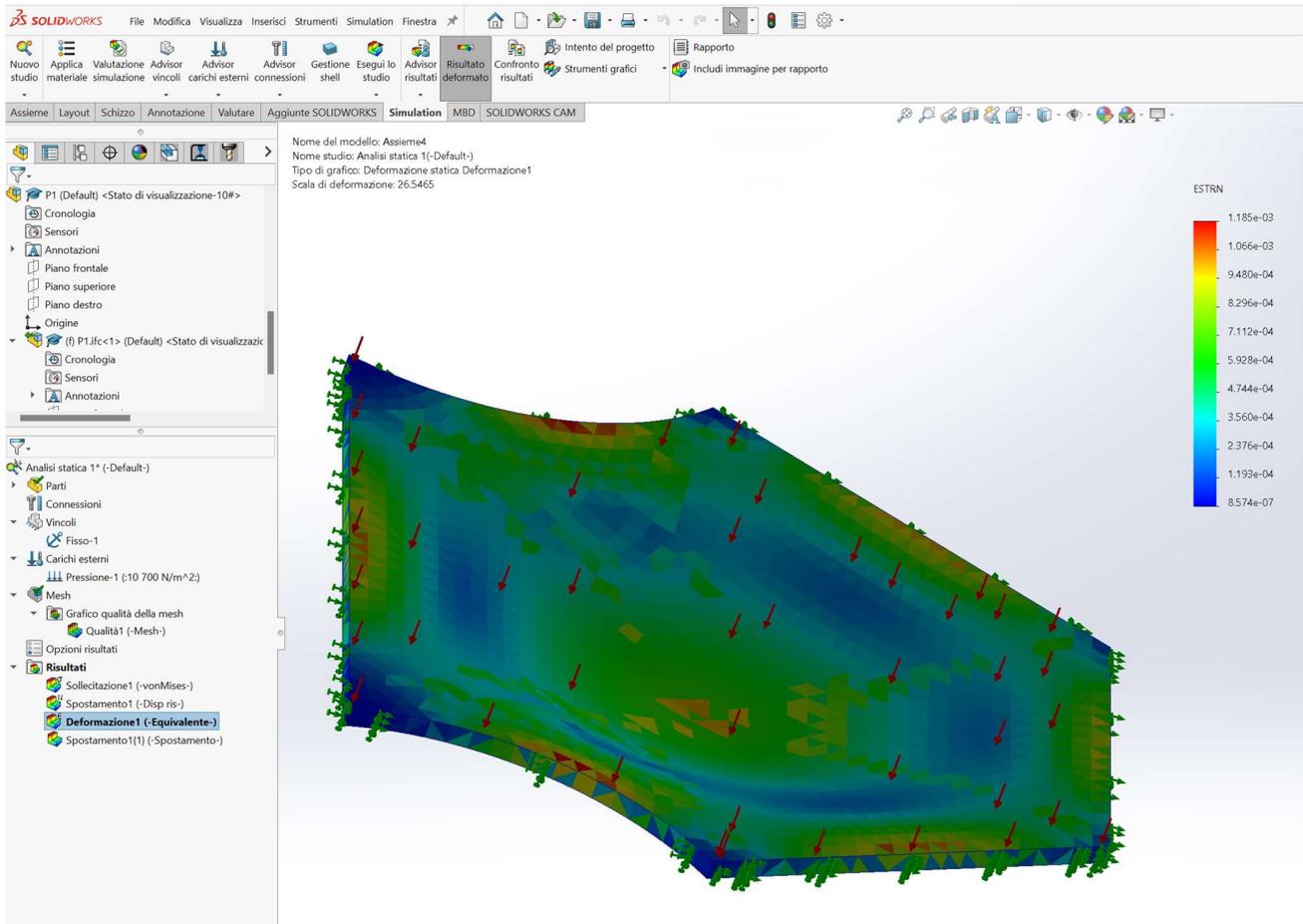


FIGURA 83. ANALISI STATICA – GRAFICO DELLE DEFORMAZIONI PER IL PRIMO PIANO

## 5.4 Analisi a fatica

Con Solidworks, è possibile condurre un'analisi di fatica attraverso l'applicazione dei carichi derivati dai dati storici (Figura 84) e l'applicazione della curva S-N (Figura 86) al materiale considerato.

L'analisi di fatica è fondamentale per la valutazione delle prestazioni e della durata dell'elemento strutturale sottoposto a carichi ciclici. Tali carichi possono essere ottenuti da dati storici che descrivono le condizioni reali di utilizzo dello scalone, come carichi di esercizio, tensioni e deformazioni. Solidworks permette di importare e utilizzare queste informazioni per simulare l'applicazione dei carichi ciclici sul modello CAD dello scalone.

La curva S-N, nota anche come curva di Wöhler, è una rappresentazione grafica dell'affaticamento del materiale in termini di sforzi applicati e numero di cicli resistenti. Questa curva fornisce una rappresentazione visiva della resistenza del materiale all'affaticamento nel tempo. Solidworks utilizza questa curva per determinare la durata di vita stimata del componente meccanico sulla base degli sforzi applicati e della resistenza del materiale.

La vita a fatica è il numero di cicli che il materiale o il componente può sopportare prima di subire il cedimento. La curva S-N fornisce una rappresentazione grafica della resistenza a fatica di un materiale.

Il limite di fatica di un materiale è il punto in cui la curva S-N diventa quasi orizzontale. Al di sotto di questo limite, il materiale ha una vita infinita e può sopportare un numero indefinito di cicli senza cedere. Al di sopra del limite di fatica, la vita del materiale diminuisce con l'aumento del numero di cicli.

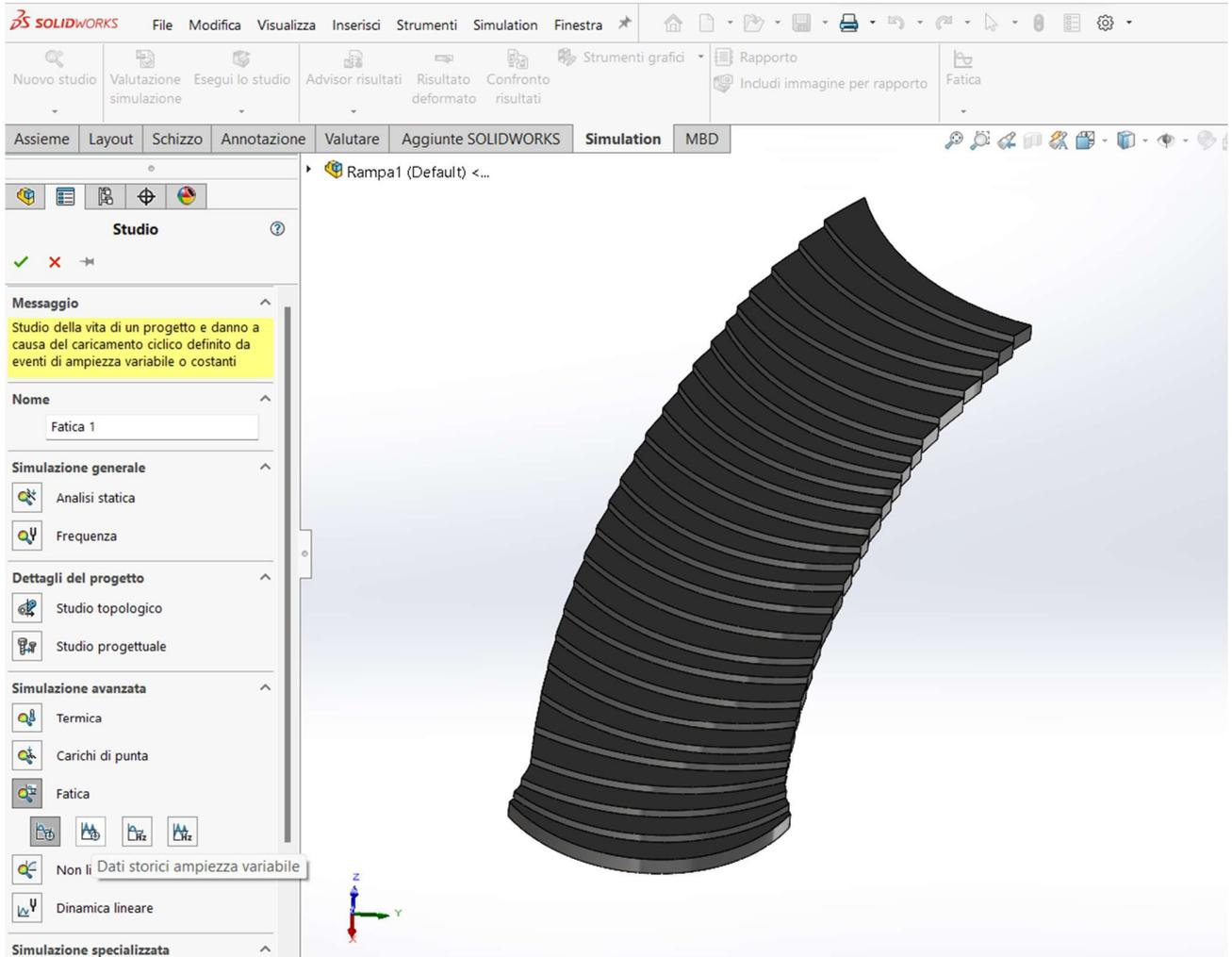
La scelta dello schema di interpolazione per individuare i punti intermedi sulla curva S-N dipende dalle caratteristiche del materiale e del componente. Ad esempio, lo schema Log-Log è spesso utilizzato per materiali che mostrano una curva S-N in continua diminuzione, mentre lo schema Lineare può essere più appropriato per materiali con una curva S-N quasi orizzontale.

La curva S-N può essere utilizzata per valutare la resistenza a fatica di un componente durante la fase di progettazione. I dati di fatica possono essere ottenuti tramite test di laboratorio su provini o attraverso simulazioni al computer. In entrambi i casi, è importante avere dati affidabili sulla resistenza a fatica del materiale per evitare il cedimento del componente durante il funzionamento.

In pratica, la resistenza a fatica di un materiale viene determinata applicando diversi livelli di sollecitazione ciclica e misurando il numero di cicli fino al cedimento. La curva S-N fornisce una rappresentazione grafica di questa resistenza a fatica e può essere utilizzata per valutare la vita a fatica di un materiale o di un componente.

Una volta importati i dati storici e applicata la curva S/N al materiale considerato, Solidworks eseguirà l'analisi di fatica per determinare la durata di vita stimata del componente. Questa analisi può essere utilizzata per identificare potenziali problemi di resistenza e affaticamento del materiale, consentendo ai progettisti di apportare le modifiche necessarie per migliorare la durata e la percentuale di danno.

Inoltre, Solidworks offre strumenti avanzati per l'analisi di fatica, come la valutazione delle tensioni principali, la verifica delle tensioni critiche e l'identificazione delle aree di concentrazione dello stress. Questi strumenti consentono di ottenere informazioni dettagliate sulla distribuzione e sulle zone di criticità dello stress all'interno dello scalone.



**FIGURA 84. ANALISI A FATICA – SI VUOLE EVIDENZIARE LA POSSIBILITÀ DI APPLICARE I DATI STORICI DI AMPIEZZA VARIABILE.**

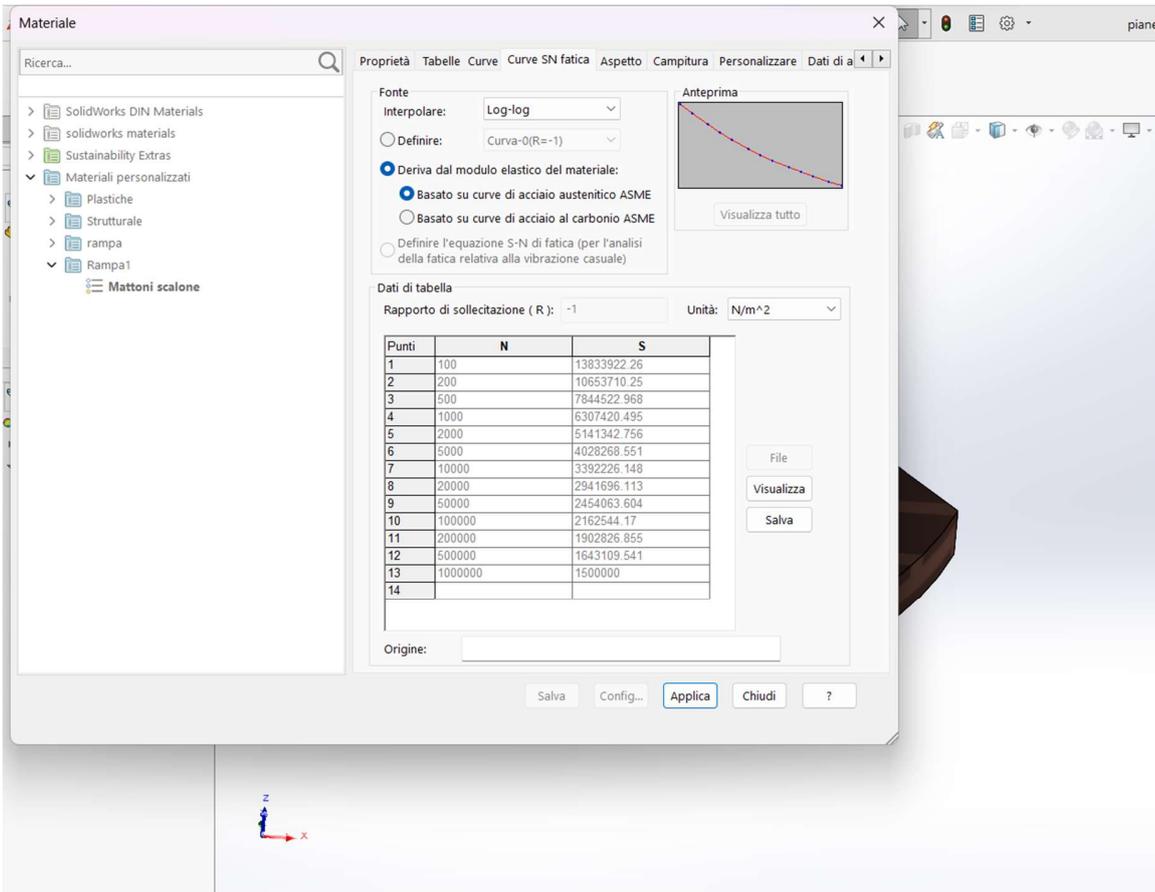


FIGURA 85. ANALISI A FATICA – APPLICAZIONE DELLA CURVA DI WÖHLER

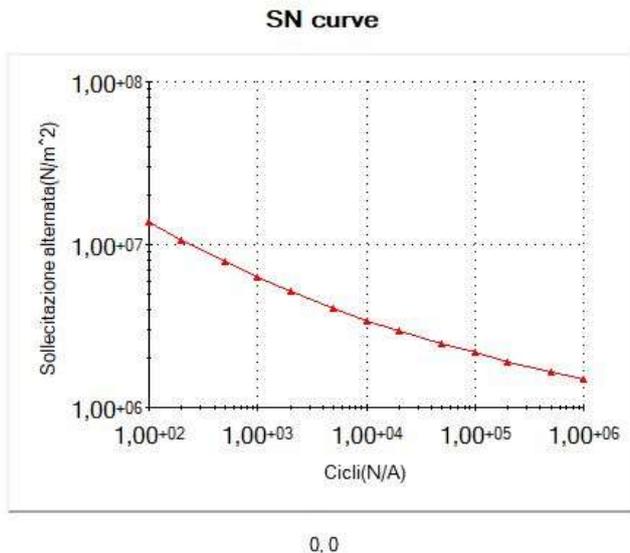


FIGURA 86. CURVA DI WÖHLER

Si riportano di seguito di grafici ottenuti dalla suddetta analisi (figure da 87 a 94).

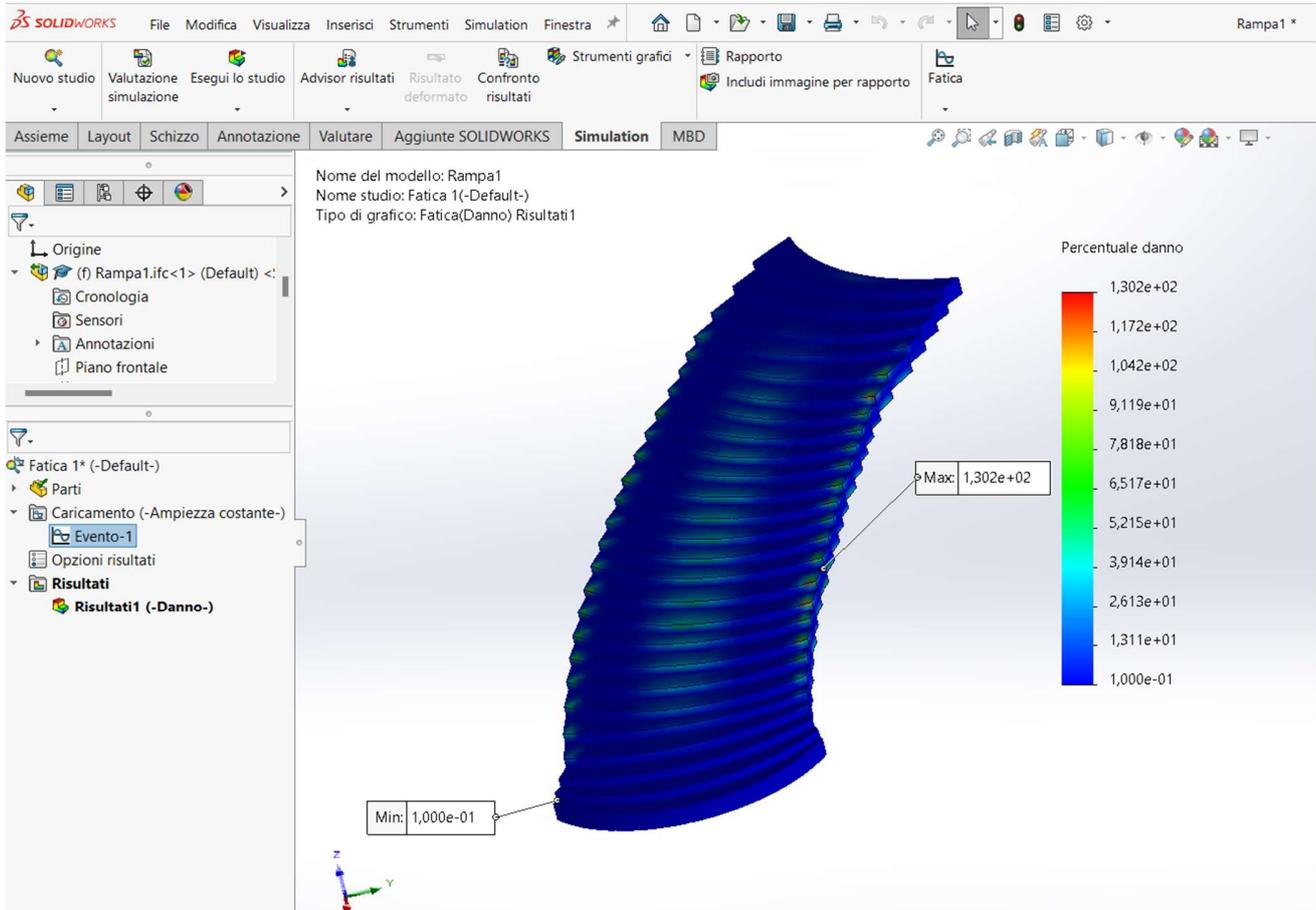


FIGURA 87. ANALISI A FATICA – PERCENTUALE DI DANNO PRIMA RAMPA

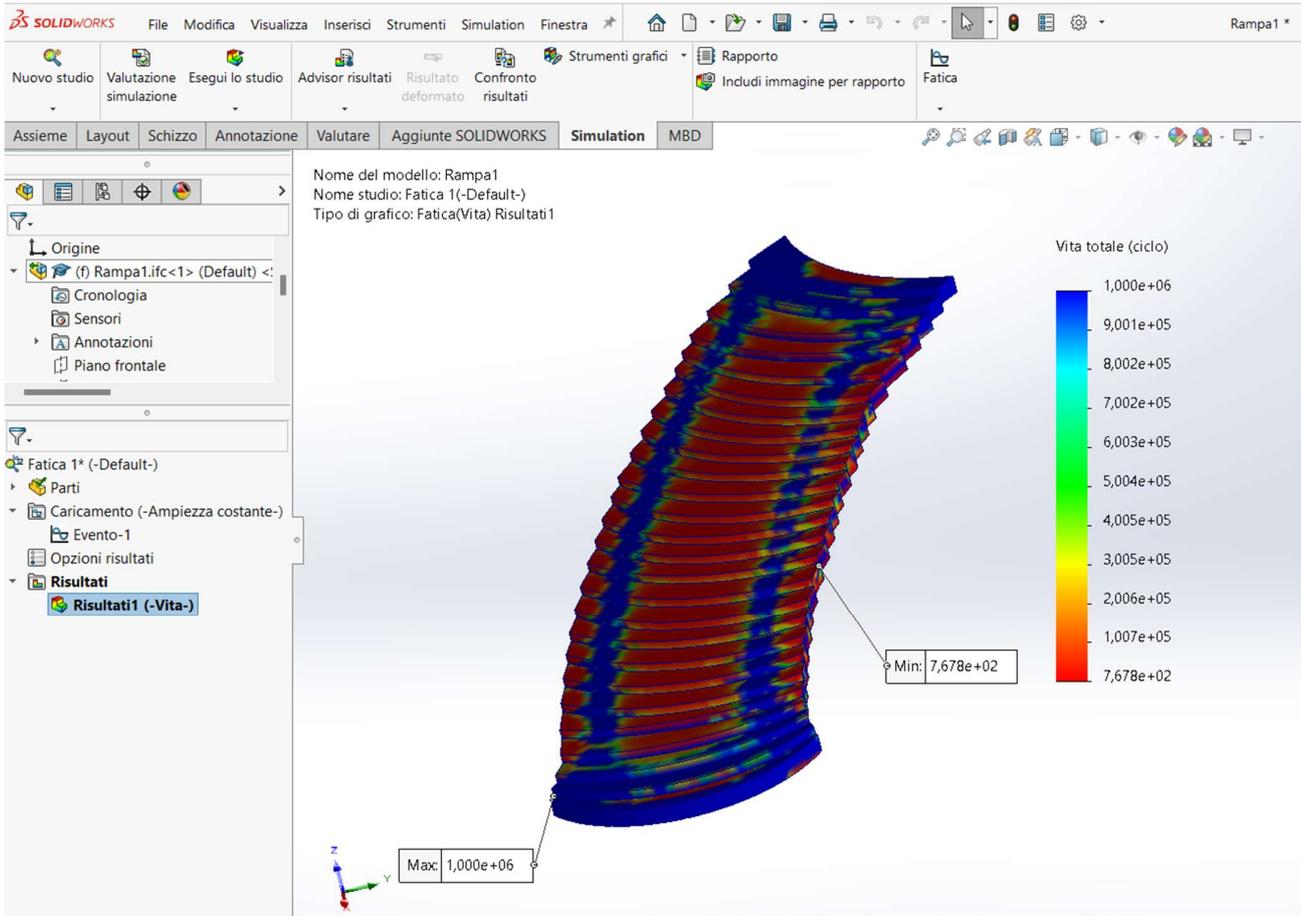


FIGURA 88 ANALISI A FATICA – VITA TOTALE PRIMA RAMPA

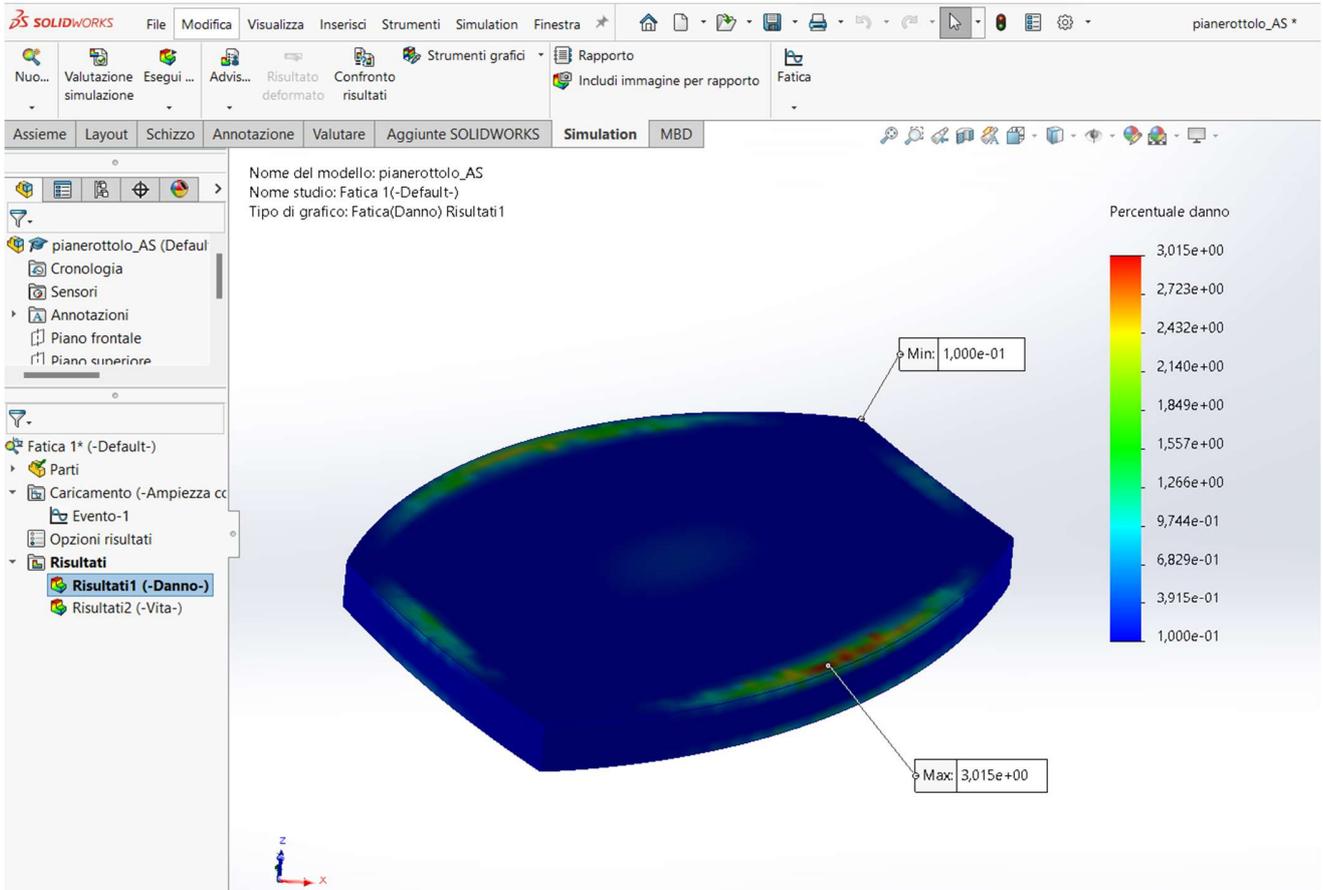


FIGURA 89. ANALISI A FATICA – PERCENTUALE DI DANNO PIANEROTTOLO

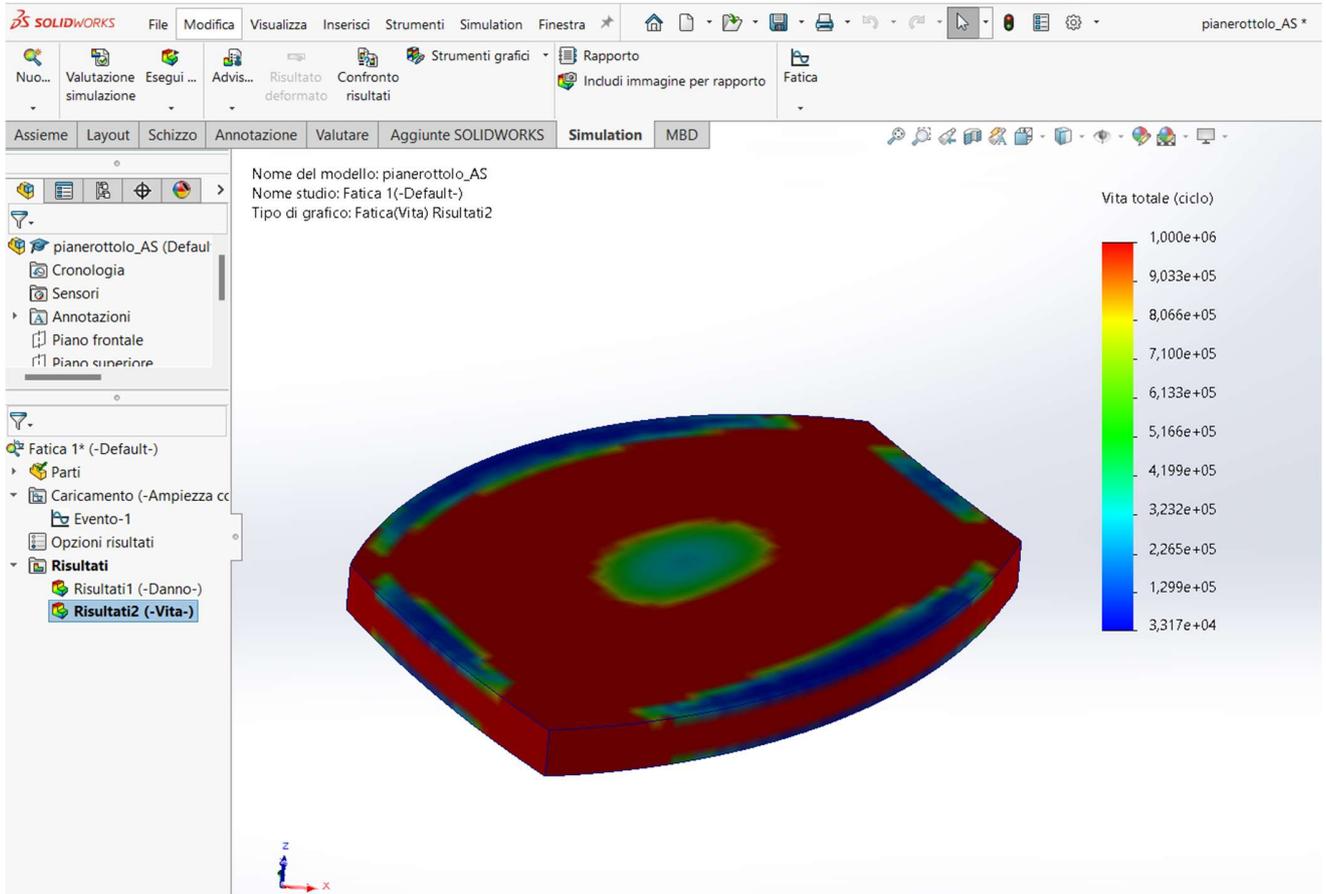


FIGURA 90. ANALISI A FATICA – VITA TOTALE PIANEROTTOLO

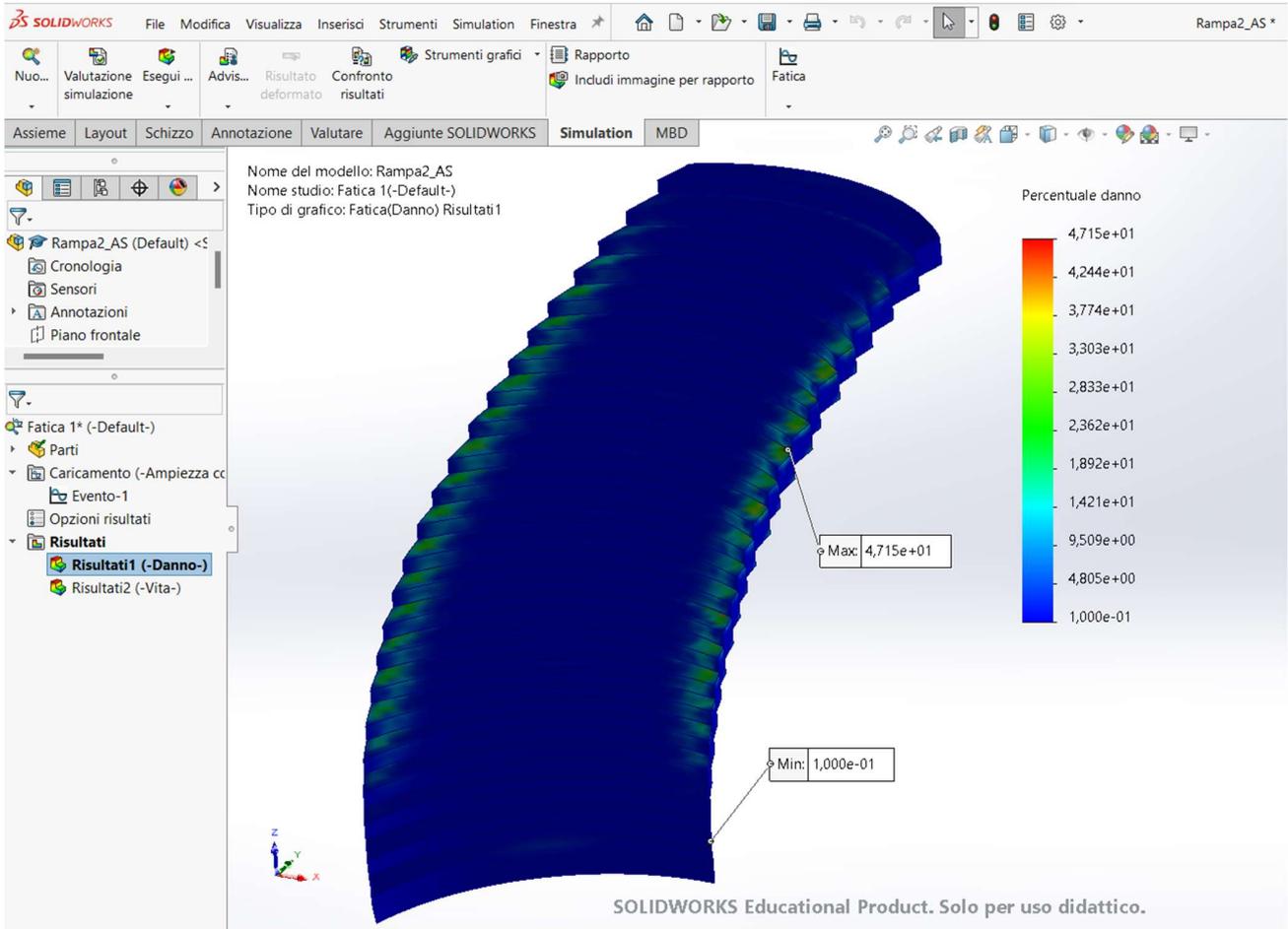


FIGURA 91. ANALISI A FATICA – PERCENTUALE DI DANNO SECONDA RAMPA

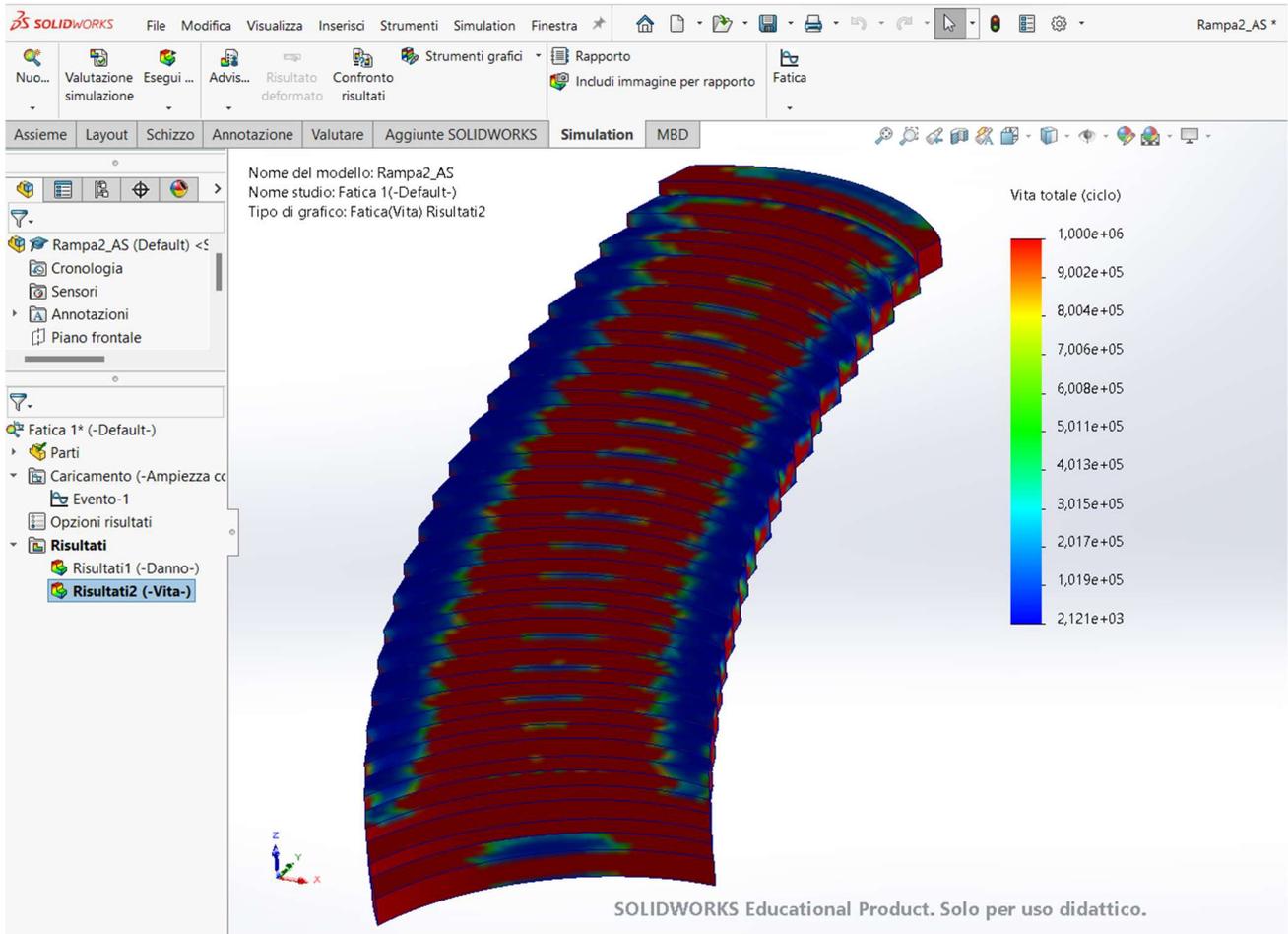


FIGURA 92. ANALISI A FATICA – VITA TOTALE SECONDA RAMPA

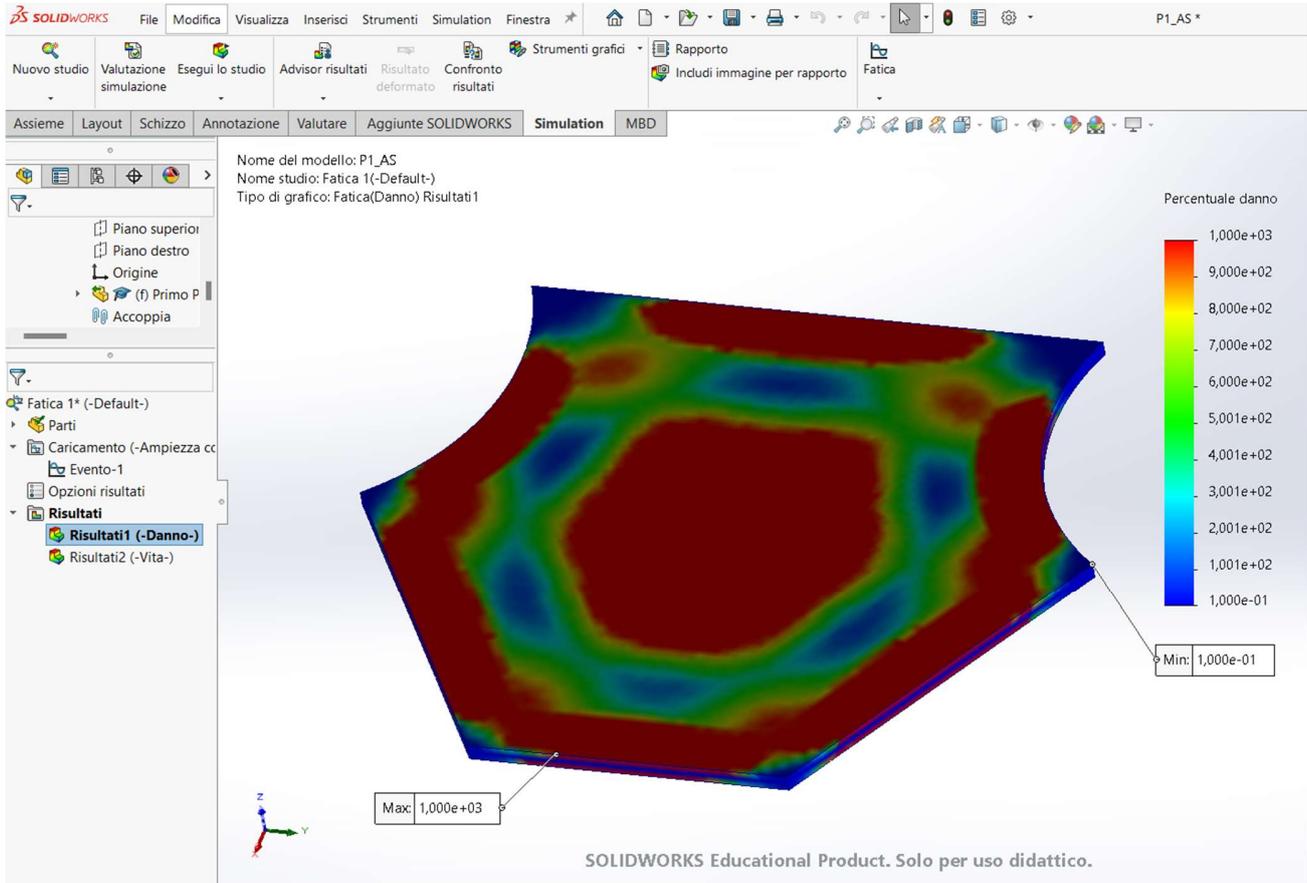


FIGURA 93. ANALISI A FATICA – PERCENTUALE DI DANNO PRIMO PIANO

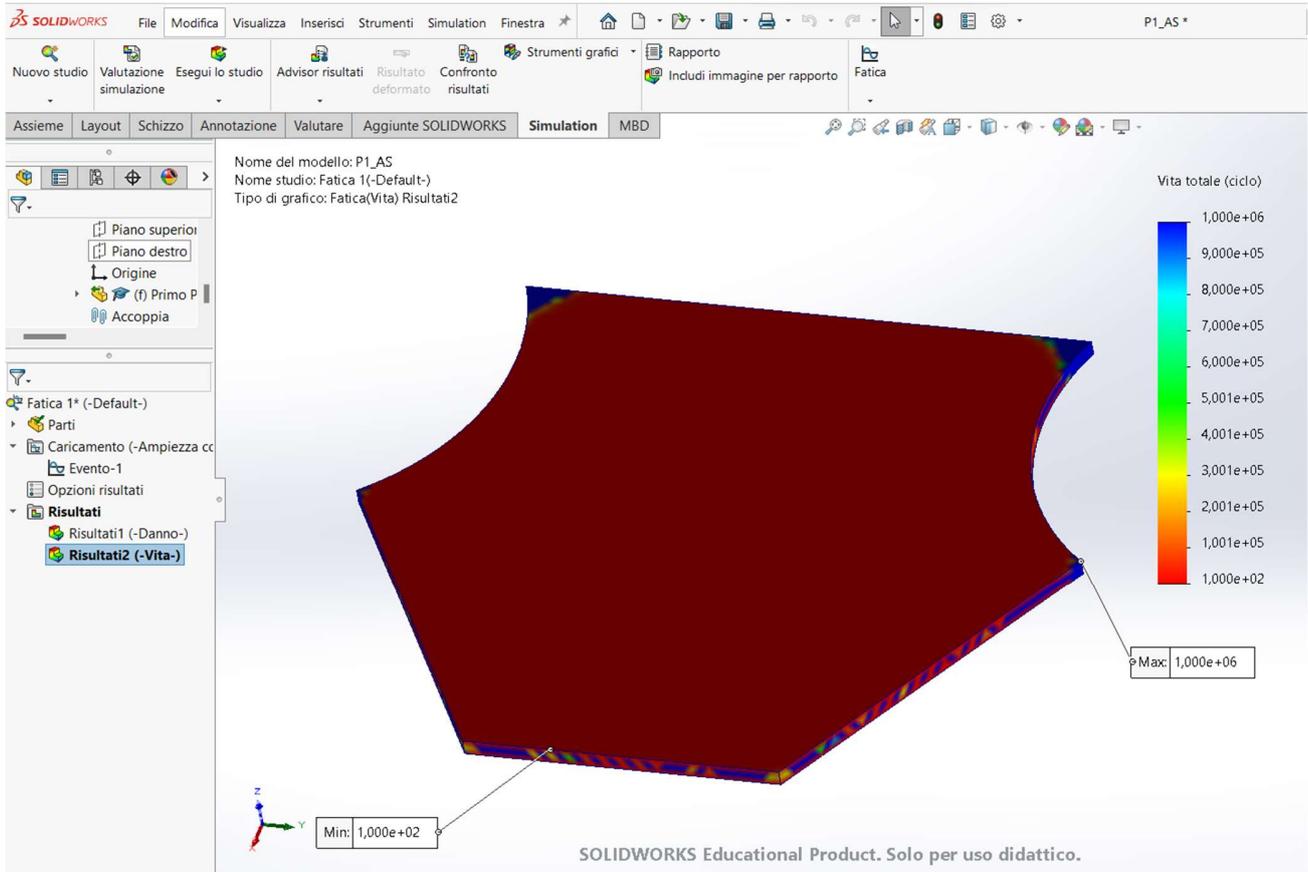


FIGURA 94. ANALISI A FATICA – VITA TOTALE PRIMO PIANO

## 6. eDrawings VIEWER

Recentemente, Solidworks ha sviluppato un plugin diretto che consente agli utenti di esportare i risultati direttamente in eDrawings. Questo plugin è una soluzione molto conveniente e utile per gli utenti di SolidWorks che desiderano condividere i loro progetti e risultati con colleghi, clienti o partner di collaborazione.

Con l'uso di questo plugin, si possono esportare facilmente i risultati ottenuti, come modelli 3D, disegni 2D, animazioni e simulazioni, direttamente in eDrawings. Una volta esportati, i progetti possono essere visualizzati, annotati e condivisi con un'ampia gamma di dispositivi, inclusi computer, tablet e smartphone.

L'aggiunta di questo plugin diretto semplifica notevolmente il processo di condivisione dei risultati di progettazione. Non è più necessario convertire i file in altri formati o utilizzare software aggiuntivi. Il formato di file eDrawings (.easm) è leggero, consentendo un caricamento rapido e un'esperienza di visualizzazione fluida. Inoltre, l'uso di eDrawings consente di aprire e visualizzare i file anche senza avere installato SolidWorks sul proprio computer. Si, riporta, al fine di evitare la ridondanza, un'analisi effettuata esportata su eDrawings (Figura 96).

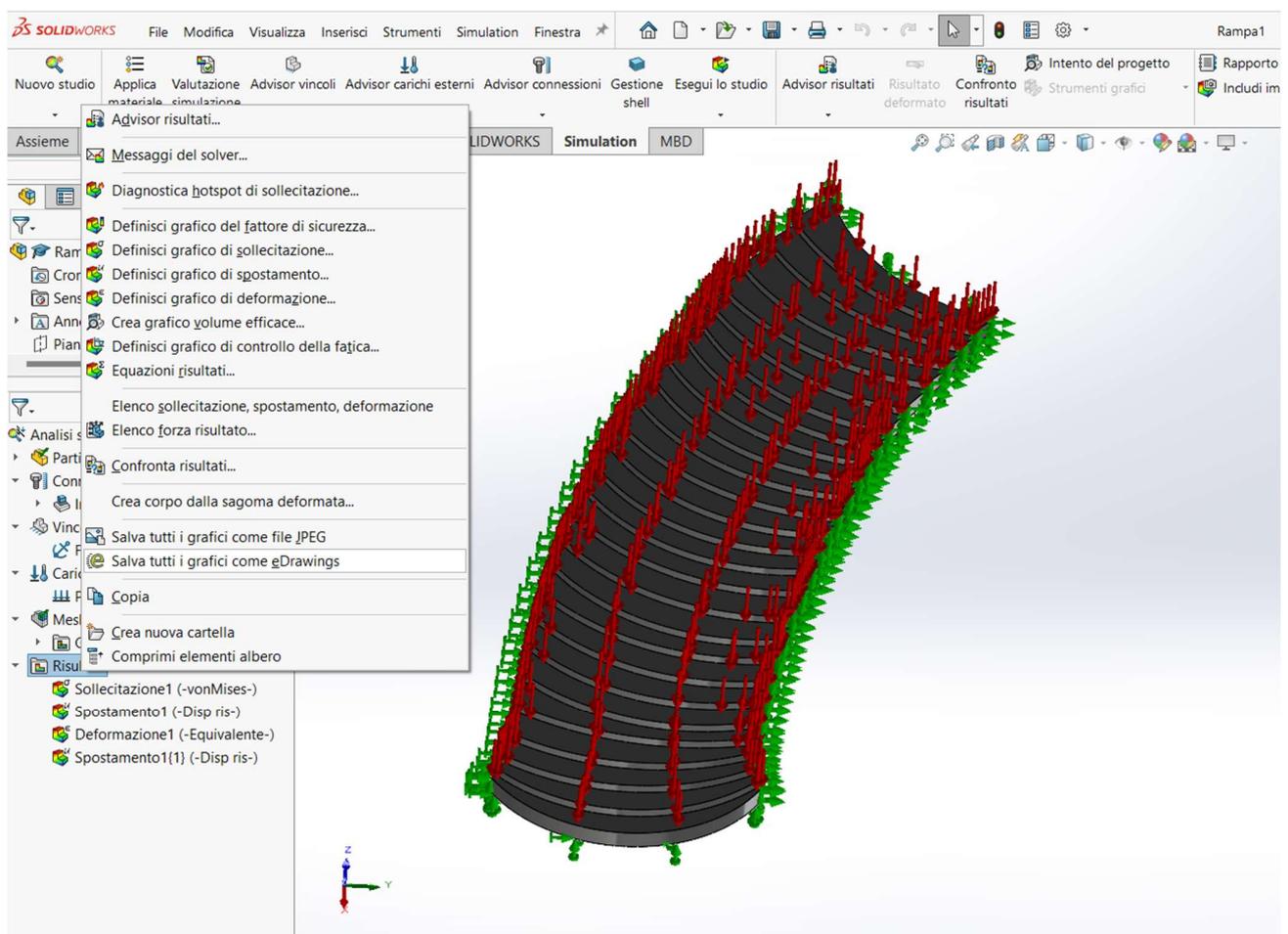


FIGURA 95. PLUGIN DIRETTO PER L'ESPORTAZIONE IN EDRAWINGS

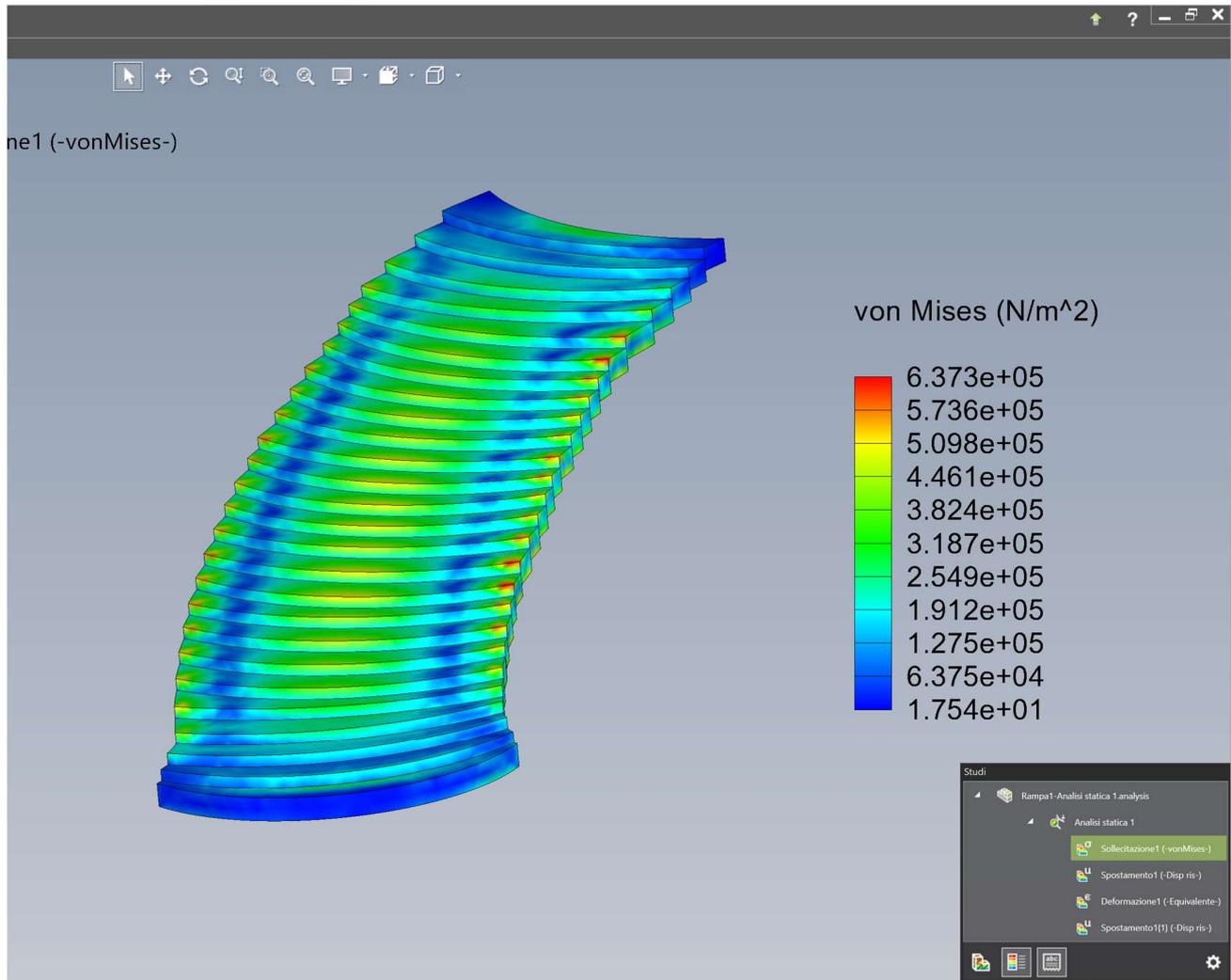


FIGURA 96. RISULTATO DELL'ANALISI ESPORTATO

Come già esplicitato, il BIM (Building Information Modeling) è un processo di modellazione digitale che consente la creazione e la gestione di informazioni accurate e complete su un edificio o una struttura. Questo processo integrato permette a professionisti come architetti, ingegneri, e progettisti di lavorare in collaborazione su un unico modello virtuale, migliorando l'efficienza e la comunicazione durante tutto il ciclo di vita del progetto. L'utilizzo di BIM può aiutare a ridurre errori e costi, migliorare la pianificazione e l'esecuzione dei lavori e favorire una migliore gestione delle risorse.

L'utilizzo di VR, AR e Realtà Mista nel contesto di BIM può fornire ulteriori vantaggi al processo di progettazione e costruzione di edifici. Ad esempio, con l'utilizzo di visori VR, ci si può immergere in un modello BIM tridimensionale, consentendo una migliore comprensione delle dimensioni e del layout dell'edificio. L'AR può essere utilizzata per sovrapporre informazioni aggiuntive su un edificio reale, come ad esempio le reti idriche o elettriche, semplificando i processi di installazione e manutenzione. La Realtà Mista può consentire agli operai edili di vedere il modello BIM sovrapposto al cantiere reale, facilitando la costruzione secondo le specifiche di progetto. Complessivamente, l'integrazione di VR, AR e MR possono fornire una migliore comprensione e

gestione del processo di progettazione e costruzione grazie al supporto fornito dalla tecnologia di Realtà Virtuale, Aumentata e Mista.

La Realtà Virtuale (VR) è una tecnologia che permette agli utenti di essere immersi in un ambiente simulato tramite l'uso di un visore VR. Gli utenti possono interagire con questo ambiente simulato utilizzando apposite periferiche di input come controller o guanti sensoriali. La VR è particolarmente utilizzata nel settore dei videogiochi, ma ha anche numerose applicazioni in ambiti come l'addestramento militare, l'educazione, la medicina e l'architettura.

La Realtà Aumentata (AR), invece, combina l'ambiente reale con elementi virtuali sovrapposti in tempo reale tramite l'uso di un dispositivo come uno smartphone o occhiali AR. Gli utenti possono quindi vedere e interagire con oggetti virtuali che sembrano coesistere nello stesso spazio del mondo reale.

La Realtà Mista (MR) è una combinazione della VR e dell'AR. In questo caso, gli utenti sono immersi in un ambiente simulato come nella VR, ma possono anche vedere e interagire con oggetti reali nel loro ambiente, come nella AR. La MR è ancora una tecnologia emergente, ma ha il potenziale per essere utilizzata in vari settori, come l'industria manifatturiera, la progettazione di prodotti e l'addestramento.

EDrawings è un software che consente la visualizzazione di progetti di SolidWorks in varie modalità, tra cui la realtà virtuale (VR) (Figura 97). Grazie alla funzionalità di VR, si possono esplorare i progetti tridimensionali in uno spazio virtuale immersivo. Utilizzando un visore VR compatibile, è possibile "entrare" nel progetto e visualizzarlo da diverse angolazioni e prospettive. Ciò offre un'esperienza più coinvolgente e realistica rispetto alla visualizzazione tradizionale su uno schermo bidimensionale e consente di esaminare i dettagli dei modelli SolidWorks in modo più approfondito. È possibile zoomare, ruotare e spostarsi liberamente all'interno dell'ambiente virtuale, facilitando la comprensione dei progetti complessi e la verifica della loro fattibilità.

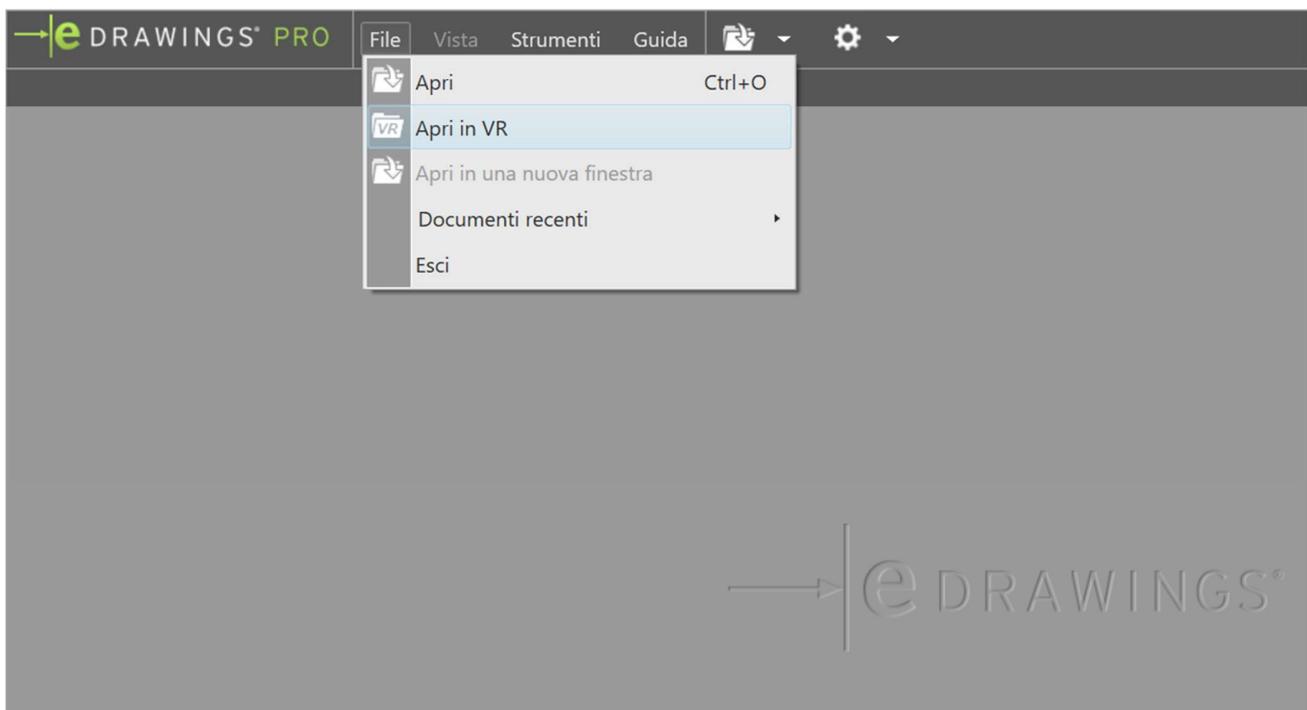
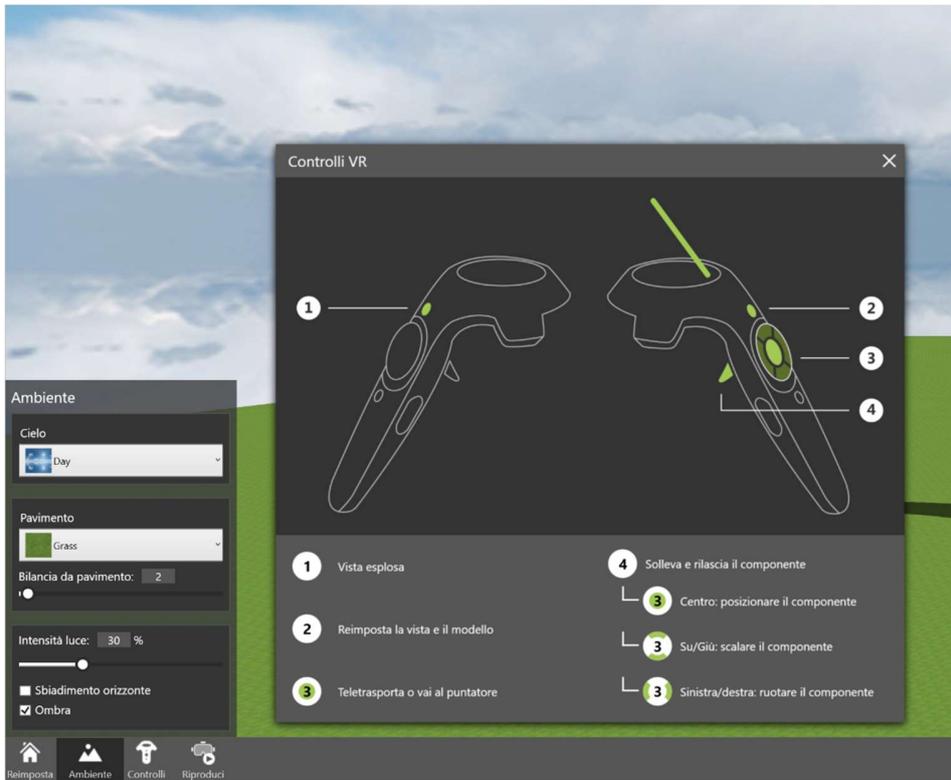


FIGURA 97. EDRAWINGS VR



**FIGURA 98. CONTROLLI VR**

Come suggerisce il nome, ci si aspetterebbe che il software supporti il formato dei file eDrawings. Tuttavia, questa tecnologia non supporta la visualizzazione diretta dei file eDrawings. Potrebbe, quindi, essere necessario prendere in considerazione l'esportazione o la conversione dei file eDrawings in un formato compatibile con l'applicazione VR per poter beneficiare pienamente di questa funzionalità.

## 7. RISULTATI

In questo capitolo si vuole ripercorrere il percorso condotto in questa tesi di laurea e esaminare i risultati ottenuti (Figura 99).

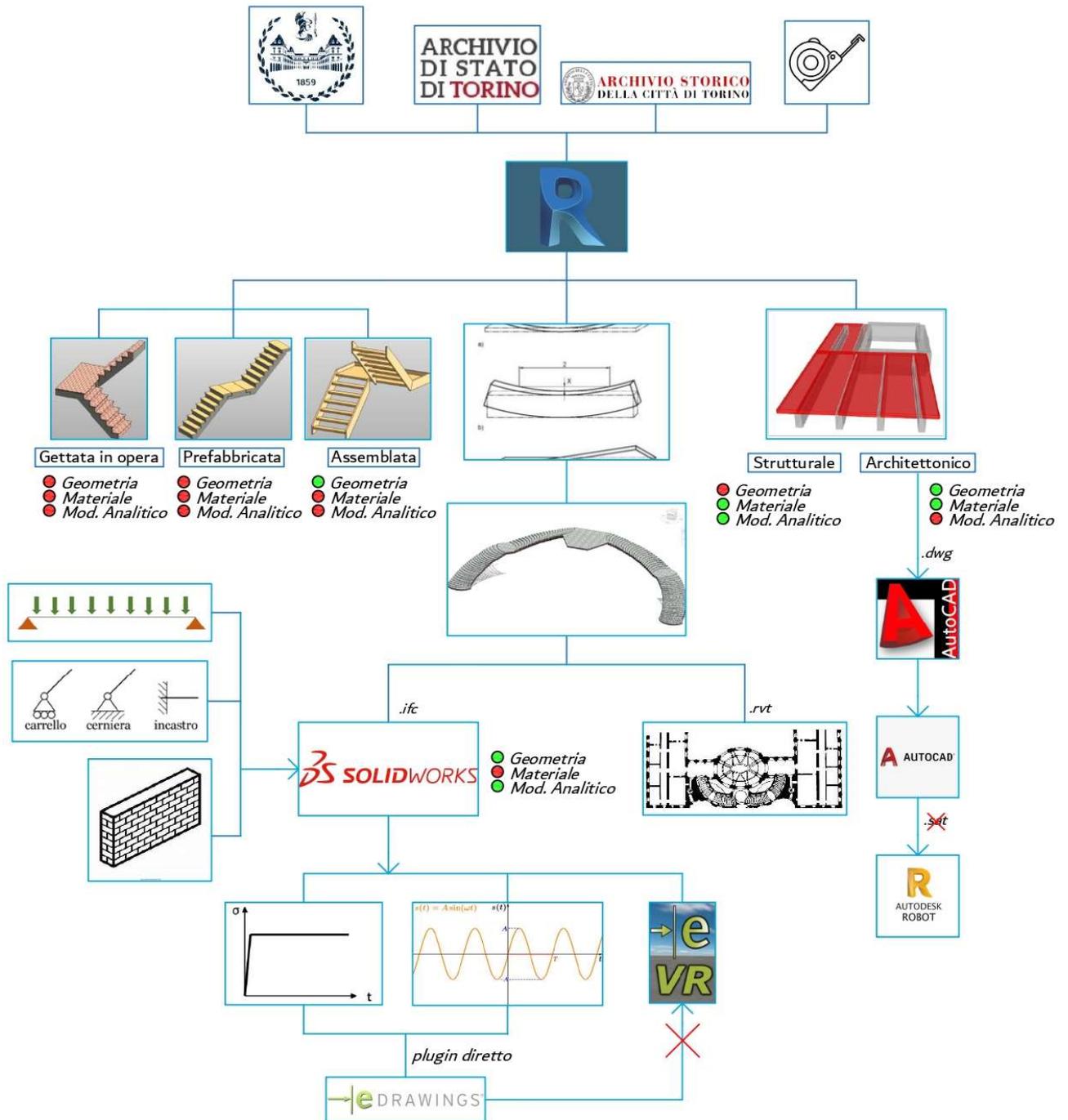


FIGURA 99. FLOWCHART E RISULTATI OTTENUTI

Nel flowchart utilizzato si possono distinguere tre fasi. Una fase di input in cui è stato necessario effettuare ricerche bibliotecarie, in particolar modo nelle biblioteche di architettura e ingegneria, la ricerca di planimetrie e disegni originali presso l'archivio di stato e l'archivio storico e un sopralluogo.

Ottenuti gli elementi di input necessari si è passati alla fase di modellazione. Sono state utilizzate diverse tecniche di modellazione utilizzando il software Revit, ma sono emerse limitazioni in termini di modellazione geometrica corretta, materiale e modello analitico.

A partire dal più banale, ovvero utilizzando la famiglia scala si è visto che solo la famiglia scala assemblata ne consente la modellazione. La famiglia di scala assemblata, però, in Revit è limitata nella sua capacità di modellare in termini di materiali e analisi strutturale. Questa famiglia permette solo la modellazione geometrica, consentendo solo l'utilizzo di acciaio o legno come materiali. Inoltre, questa famiglia non consente di creare un modello analitico, che è necessario per l'analisi strutturale della scala. Pertanto, in quanto si desidera effettuare un'analisi accurata della struttura della scala, è stato necessario utilizzare una famiglia diversa per la modellazione e l'analisi strutturale. Per quanto riguarda la scala gettata in opera e prefabbricata da errore nella modellazione non creando nemmeno la geometria.

Si è cercato di modellare il pavimento utilizzando sia una pavimentazione strutturale che architettonica. La pavimentazione strutturale permette di definire il materiale e un modello analitico plausibile, ma non consente una modellazione geometrica precisa. D'altra parte, la pavimentazione architettonica consente una modellazione geometrica accurata, ma non un modello analitico preciso.

Per affrontare questa problematica, si è provato a esportare la geometria 3D dello scalone da Autocad in modo da ottenere una geometria semplificata tipo guscio che potesse essere esportata in Robot per l'analisi strutturale. Tuttavia, per effettuare il passaggio da Autocad a Robot, è necessario avere un file .sat.

Nel caso del passaggio da Revit a Autocad, viene generato un modello POLYFACE MESH che differisce da un solido 3D o un oggetto "regione" necessari per l'esportazione in formato .sat da Autocad. La principale problematica risiede nel fatto che i modelli generati in Revit possono contenere dettagli o geometrie che non si traducono perfettamente in un modello solido chiuso in Autocad. Questo può includere intersezioni non chiuse o elementi di geometria complessi che Autocad potrebbe avere difficoltà a interpretare come solidi tridimensionali.

Un altro metodo utilizzato per la modellazione dello scalone consiste nel considerare ogni gradino come una trave curva separata. Questo permette di distinguere la componente strutturale della scala da quella decorativa.

Tuttavia, anche in questo caso, ci si trova di fronte alla limitazione di Revit nel fornire un modello analitico. Questo perché ogni singolo gradino presenta una geometria troppo complessa per essere rappresentata come un elemento beam.

Questa soluzione prevede la creazione di una trave curva per ogni gradino, replicando la forma geometrica e le dimensioni dei gradini reali. È necessario, quindi, modellare manualmente ogni gradino, per poter creare le travi curve corrispondenti utilizzando gli strumenti di modellazione di Revit.

Mentre la componente strutturale dello scalone è modellata attraverso le travi curve, la parte decorativa può essere realizzata utilizzando altri elementi disponibili in Revit, come superfici, rivestimenti o elementi architettonici. Questo permette di separare chiaramente le due funzioni della scala, consentendo di lavorare in modo più dettagliato ed efficace su entrambe le parti.

Sebbene questo metodo richieda un lavoro di modellazione più dettagliato e manuale, permette di ottenere una rappresentazione più accurata e realistica dello scalone, specialmente quando si tratta di scale complesse o personalizzate.

L'ultima fase è quella di output. Questa è fondamentale per completare il processo che porta dal BIM al FEM. In questa fase il modello geometrico dello scalone può essere collegato al modello principale del palazzo Carignano, al fine di ottenere un modello BIM completo. Successivamente, il modello viene esportato in formato .ifc per importarlo in Solidworks.

Tuttavia, durante il passaggio da Revit a Solidworks, si verificano delle perdite di dati, come ad esempio il materiale. Di conseguenza, è necessario riassegnare il materiale e applicare i vincoli e i carichi al fine di poterne eseguire le analisi strutturali. In particolare, l'analisi statica viene eseguita assegnando i carichi statici determinati da analisi precedenti, mentre, per eseguire un'analisi a fatica, viene assegnata una curva S/N (stress-life) al materiale e vengono applicati dei carichi ciclici. Tuttavia, è importante sottolineare che questa analisi è puramente teorica, poiché gli input assegnati non corrispondono alla realtà.

Nell'ambito delle collaudate interoperabilità tra Solidworks ed eDrawings, si sono condotti dei test al fine di verificare l'efficacia del plugin che consente l'esportazione delle analisi effettuate in Solidworks. Questo plugin facilita la visualizzazione delle analisi anche da parte di coloro che non dispongono del software di modellazione.

Un aspetto interessante riscontrato durante tale esperimento riguarda il fatto che è possibile esportare il modello creato in Solidworks anche in eDrawings VR. Questa soluzione permette di osservare e interagire con il modello in una modalità di realtà virtuale, offrendo un'esperienza decisamente più coinvolgente.

## 8. CONCLUSIONI

Per concludere, è necessario ricordare l'obiettivo principale del progetto, ovvero, la realizzazione di un modello Building Information Modeling (BIM) di Palazzo Carignano. Tuttavia, la geometria dello scalone del palazzo risulta estremamente complessa, rendendo praticamente impossibile la realizzazione di un modello Revit che presenti un modello analitico di tipo beam o shell da utilizzare per l'analisi agli elementi finiti (FEM). Di conseguenza, è stato necessario ricorrere a un'analisi solida dello scalone.

La soluzione adottata consiste nel modellare separatamente lo scalone, in modo da poterlo collegare successivamente al modello principale di Palazzo Carignano e utilizzarlo in modo indipendente per le analisi strutturali. In questo modo, è possibile analizzare lo scalone come entità separata. La modellazione dello scalone gradino per gradino richiede tempo perché è un processo dettagliato, nonostante il tempo richiesto per la modellazione, questa soluzione rimane ragionevole perché assicura un risultato finale accurato.

L'obiettivo principale è stato sicuramente raggiunto, ma da un punto di vista strutturale potrebbe essere necessario effettuare un'analisi più approfondita considerando il comportamento complessivo della struttura.

Quando si progetta una struttura, è importante valutare non solo la resistenza del singolo elemento, ma anche come essa si comporta nel suo insieme in risposta alle azioni esterne come il vento, i terremoti o carichi dinamici. Un'analisi più completa del comportamento strutturale tiene anche conto di fattori come le deformazioni, le vibrazioni e la durabilità nel tempo. Questo permette di identificare eventuali punti deboli o problematiche nella struttura e di apportare correzioni o miglioramenti adeguati prima che diventino un problema. Quindi, se si volesse esaminare l'intera struttura del palazzo come un'unica entità, tenendo conto dell'interazione dello scalone con le altre parti strutturali, sarebbe necessario esportare l'intero modello in un software di analisi strutturale e realizzare un modello analitico separato da quello architettonico al fine di procedere con le analisi dell'intero edificio. Questo processo, però, come si è visto, può risultare piuttosto lungo e complesso.

Per quanto riguarda l'integrazione con la realtà virtuale, sono emerse alcune anomalie. Utilizzando Solidworks, è possibile esaminare il modello in modo dettagliato, con la possibilità di esportarlo in eDrawings, dove può essere solo visualizzato in modo superficiale. Alternativamente, è possibile aprirlo direttamente in ambiente VR sempre tramite eDrawings, consentendo di zoomare, ruotare e spostare il modello. Tuttavia, si è notato che, pur essendo possibile visualizzare in realtà virtuale i modelli esportati da Solidworks tramite eDrawings VR, non è attualmente possibile visualizzare le analisi effettuate sul modello stesso. Questo limite rappresenta una sfida da superare nell'ottica di migliorare l'interoperabilità tra eDrawings ed eDrawings VR.

In conclusione, l'esperimento ha dimostrato l'efficacia del plugin di Solidworks per l'esportazione delle analisi e ha rivelato il potenziale utilizzo della realtà virtuale tramite eDrawings VR. Tuttavia, è necessario continuare a lavorare per migliorare l'interoperabilità tra eDrawings ed eDrawings VR onde consentire la visualizzazione delle analisi anche in questo ambiente immersivo.

In definitiva, il processo di modellazione dello scalone è stato un processo complesso che ha richiesto sforzi significativi per superare le limitazioni del software utilizzato e ottenere un modello geometricamente accurato e adatto all'analisi strutturale.

## a. BIBLIOGRAFIA

- Architettura Civile – Guarino Guarini
- IL DISEGNO E L'INGEGNERE BIM HANDBOOK FOR BUILDING AND CIVIL ENGINEERING STUDENTS - LEVROTTO & BELLA
- Il Parlamento Subalpino in Palazzo Carignano – Strutture e Restauro, 1988, Ilte, Utet, Sei Editore
- Lange A., 1970, Disegni e documenti di Guarino Guarini, Catalogo dei disegni manoscritti in AA.VV., Guarino Guarini e l'internazionalità del barocco, Atti del Convegno internazionale promosso dall'Accademia delle Scienze di Torino (30 Settembre 1968)
- Pecchenino Alberto, 2015, Le volte in muratura, Grafill Editore per la valutazione della sicurezza e per la progettazione degli interventi, Dario Flaccovio Editore
- Tomasoni Elide, 2008, Le volte in muratura negli edifici storici: tecniche costruttive e comportamento strutturale, Università degli studi di Trento
- Tomasoni Elide, 2015, Analisi, verifiche e consolidamento strutturale di Archi e Volte – Manuale
- Vittone Bernardo, 1737, Architettura civile del Padre D. Guarino Guarini Cherico Regolare – opera postuma dedicata a sua Sacra Reale Maestà
- Cravero D. G., 1951, Atti e Rassegna Tecnica della Società degli Ingegneri e degli Architetti Di Torino
- Dardanello Giuseppe – Klaiber Susan – Million Henry A., 2006, Guarino Guarini – U. Allemandi Editore
- Bruno Andrea, 2004, Fare Disfare Rifare Architettura da Rivoli a Bagrati, Fondazione Wilmotte
- Bussi Laura, Roma, 2003, br., pp. 944, Trattato sul consolidamento, Mancuso Editore
- Cerri Mari Grazia, 1985, Architetture tra storia e progetto, Allemandi Editore
- Cerri Maria Grazia, Palazzo Carignano – Tre secoli di Idee, Progetti e Realizzazioni, Umberto Allemandi & C. Editore
- Bruno Andrea – Bosco Nuccia, 1997, Restauro di Palazzo Carignano
- Bruno Andrea – Bosco Nuccia, aprile 2016 (I Edizione), Tecniche esecutive e dettagli progettuali – Execution techniques and design detail, Politecnica

- Bruno Andrea, 1996, Oltre il restauro – Restoration and beyond, Mario Mastropietro

Editore

## b. SITOGRAFIA

- <http://webthesis.biblio.polito.it>
- <https://www.researchgate.net>
- <https://www.ingenio-web.it>
- <https://help.solidworks.com>
- <https://www.autodesk.it>
- <https://www.ilprogettistainindustriale.it>
- <https://www.torinotoday.it>
- <https://www.diagnostics-beniculturali.it>
- <https://www.ibimi.it>
- <https://www.marcodepisapia.com>
- <https://web.unica.it>
- <https://docs.dicatechpoliba.it/>

## c. ENTI PUBBLICI

- Archivio di Stato di Torino
- Archivio Storico del Comune di Torino
- Biblioteca Centrale di Architettura “Roberto Gabetti”
- Biblioteca Centrale di Ingegneria
- SAABP (Soprintendenza Archeologia Belle Arti e Paesaggio per la Città Metropolitana di Torino)