

POLITECNICO DI TORINO

**Corso di Laurea Magistrale
In Ingegneria Civile**

Tesi di Laurea Magistrale

**Intersezione tra tunnel principale e cross
passage: modellazione BIM ed analisi ad
elementi finiti per fasi di costruzione**



Relatore

Prof. Anna Osello

Candidato

Caterina Tamburino

Tutor aziendale

Ing. Diego Neri

A.A. 2017/2018

Indice

1	Abstract	3
2	Introduzione	4
3	Cenni di Tunnelling	5
3.1	Tunnelling tradizionale	5
3.2	Tunnelling meccanizzato.....	6
3.3	Tunnelling meccanizzato in terreni sciolti	8
3.4	Rivestimento delle gallerie	9
4	Building Information Modeling	10
5	Preparazione del modello.....	12
5.1	Descrizione della struttura.....	12
5.1.1	Materiali	14
5.2	Considerazioni iniziali.....	15
5.3	Primo approccio alla modellazione.....	16
5.4	Soluzione di modellazione finale: descrizione del modello.....	18
5.4.1	Tunnel	18
5.4.2	Struttura metallica temporanea.....	19
5.4.3	Connessioni.....	20
5.4.4	Vincoli	24
5.4.5	Carichi	25
5.4.6	Fasi costruttive	26
6	Analisi.....	28
6.1	Tunnel	28
6.2	Struttura metallica temporanea	33
6.3	Connessioni struttura metallica.....	41
6.4	Connettori Dowel.....	44
7	BIM e interoperabilità applicati al progetto.....	45
8	Conclusioni e sviluppi futuri	50
9	Bibliografia e Sitografia.....	52

1 Abstract

This thesis faces the structural verification of the reinforced concrete pre-cast segments, placed in the main tunnel in proximity of the opening which has to be made to connect the cross passage, and the design of the temporary steel frame, needed to support the lining.

Particularly, it has been examined the possibility to design using a BIM model which could encloses geometries and structural analysis, including also the construction phases, related to this complex design.

In the calculation model the following stages have been developed and analysed in detail:

- Main tunnel subjected to external loads;

- Integration of the temporary steel frame;

- Execution of the connection opening to the cross passage.

The complete BIM model, well defined in each of its elements, results perfectly useable for the geometry creation and management, but it needs an accurate implementation in the calculation software, because of the complexity generated by the mutual interaction between the two structures.

The finite element calculation model has been realized with the software AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS. The thesis deals with the issues regarding the modelling and the structural elements verification previously described.

2 Introduzione

La tesi affronta il problema progettuale dell'intersezione tra tunnel principale e cross passage con riferimento sia alla verifica strutturale dei conci prefabbricati speciali in calcestruzzo armato posizionati in corrispondenza dell'apertura, sia alla progettazione della struttura metallica provvisoria, necessaria al sostegno del rivestimento.

Nei primi capitoli della tesi si descrivono le basi teoriche relative alle due tematiche principali affrontate:

- a) Progettazione e costruzione di gallerie. Vengono considerate le diverse tipologie costruttive per evidenziare il motivo alla base della scelta una macchina a discapito delle altre;
- b) Approccio BIM. Lo studio considera il problema dell'interoperabilità nelle moderne tecniche di progettazione che prevedono la modellazione strutturale integrata con altre discipline ingegneristiche ed architettoniche.

L'obiettivo principale di questo progetto è fondere insieme queste due tematiche, attraverso lo sviluppo della complessa progettazione dell'intersezione in sotterraneo con un approccio di tipo BIM.

Corpo centrale di questo lavoro sono la creazione, lo studio e l'analisi del modello di calcolo ad elementi finiti, realizzato con il software AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS. Questo software offre una serie di strumenti che aiutano ad interagire con gli altri che operano con la stessa metodologia. In dettaglio, si è voluto testare il grado di interoperabilità con il software di progettazione architettonica AUTODESK REVIT STRUCTURE.

Si è inizialmente valutata la possibilità di passare direttamente dal modello architettonico al modello strutturale.

Successivamente sono state definite, sviluppate ed analizzate in dettaglio, le seguenti fasi di analisi:

- 1. Tunnel principale soggetto ai carichi esterni;
- 2. Inserimento della struttura metallica temporanea;
- 3. Esecuzione dell'apertura di connessione con il cross passage.

L'approccio per fasi risulta, di fondamentale importanza, per tener conto dello stato tensionale degli elementi strutturali, soggetti a carichi agenti in tempi diversi.

3 Cenni di Tunnelling

Già gli antichi Romani avevano introdotto tecniche di scavo in sotterraneo, solo negli ultimi 200 anni però si può parlare di ingegneria delle gallerie: in questo periodo infatti sono andati affinandosi i metodi di scavo, i calcoli delle opere di sostegno e di rivestimento, il controllo dei fattori ambientali. Oggi i diversi aspetti della progettazione e realizzazione delle gallerie sono stati ormai codificati attraverso consolidati metodi progettuali e processi produttivi. Tutto questo è stato reso possibile grazie sviluppo dell'ingegneria e delle scienze della terra, e alle nuove e flessibili tecnologie che contraddistinguono i moderni macchinari utilizzati e l'impiego di materiali innovativi.

Gallerie e opere sotterranee hanno diverse destinazioni d'uso:

- Sottopassi o sottopassaggi: raccordi viari che passano al di sotto di una zona urbana o di un'arteria stradale o ferroviaria per il transito di pedoni, ciclisti, autoveicoli;
- Gallerie stradali: consentono il transito di veicoli attraverso rilievi montuosi o sotto aree già edificate;
- Gallerie ferroviarie: principalmente riguardano il traffico su rotaia, ma appartengono a questa categoria anche i sistemi di trasporto metropolitani;
- Gallerie di comunicazione tra bacini idrografici vicini: permettono il deflusso di acqua (per consumo o per le centrali idroelettriche);
- Gallerie per altri servizi: rientrano in questa categoria, ad esempio, il passaggio di gasdotti, oleodotti, elettrodotti o sistemi fognari.

Il rapido processo di urbanizzazione e lo sviluppo sociale e industriale che negli ultimi anni ha interessato tutto il mondo, ha portato ad un aumento delle richieste di mobilità e del trasporto di merci, le quali hanno reso necessarie nuove linee ferroviarie e metropolitane che solitamente richiedono lo scavo di gallerie in area urbana.

Lo scavo di una galleria è formato da diverse operazioni, le quali sono organizzate in modo da garantire la maggior lunghezza di tunnel completo nel minor tempo possibile.

I metodi di scavo possono essere divisi in due grandi famiglie:

- a) tunnelling tradizionale
- b) tunnelling meccanizzato.

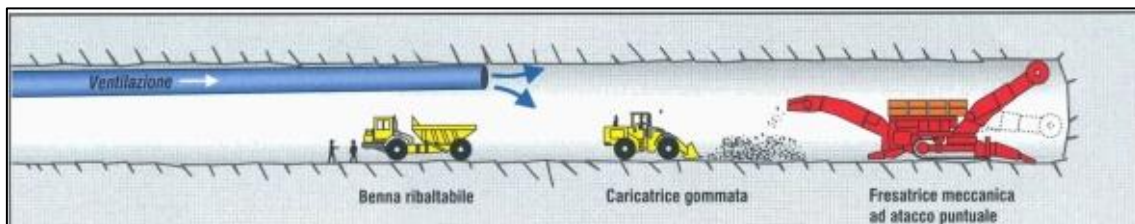
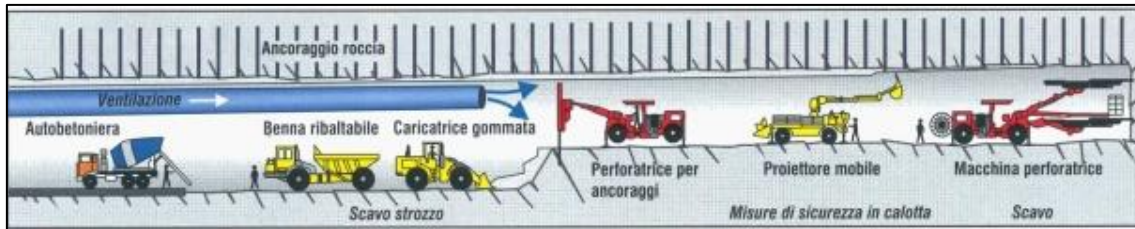
3.1 Tunnelling tradizionale

Nello scavo di gallerie, il metodo tradizionale identifica un complesso di metodologie e di tecniche il cui elemento comune è la prevalenza del fattore umano rispetto ai mezzi meccanici, che rivestono un ruolo di supporto e vengono applicati in momenti diversi. L'intervento di scavo è suddiviso in fasi distinte e sequenziali, che impiegano mezzi e metodi differenti.

- 1) La prima fase riguarda il consolidamento del terreno da scavare, col quale si conferiscono al terreno migliori caratteristiche di omogeneità e tenuta del fronte di scavo, così da garantire la sicurezza delle fasi successive.
- 2) La seconda fase affronta la vera e propria asportazione del terreno e della roccia.

- 3) La terza ed ultima fase nella quale si realizza il rivestimento della galleria, che permette all'opera di rimanere stabile nel tempo.

Si tratta di un metodo ciclico in cui le fasi vengono ripetute fino al completamento dell'opera.



3.2 Tunnelling meccanizzato

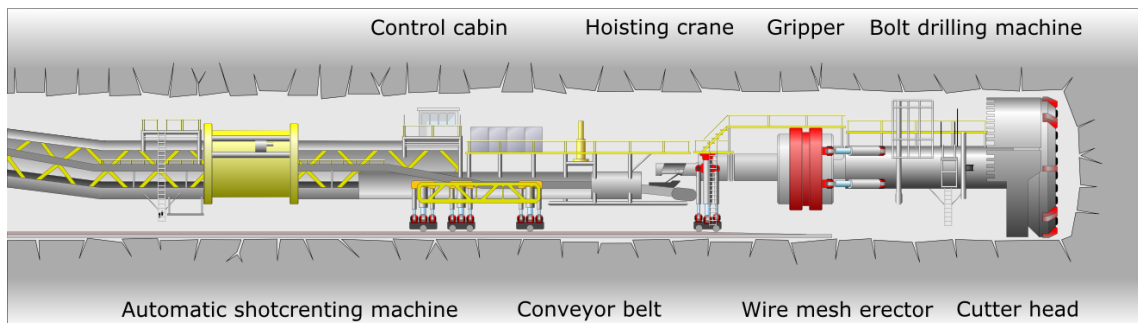
Nel caso di costruzione di gallerie in area urbana il problema principale è il controllo dei cedimenti in superficie, che devono presentare valori contenuti compatibili con la sicurezza degli edifici e delle infrastrutture presenti in superficie. La necessità di contenere i cedimenti in superficie e di mantenere, contemporaneamente, la stabilità della cavità, ha portato allo sviluppo dello scavo meccanizzato a piena sezione, mediante particolari macchine in grado di accorpate tutte le fasi descritte precedentemente.

Queste macchine sono chiamate Tunnel Boring Machines (TBM). La prima vera e propria fresa meccanica a piena sezione fu costruita per opera di James Robbins nel 1952 e fu utilizzata nello scavo della galleria di deviazione della diga di Oahe. Oggi ne esistono di diversi tipi e, la scelta del tipo di macchina da utilizzare, varia in funzione del tipo di terreno in cui deve essere realizzata l'opera:

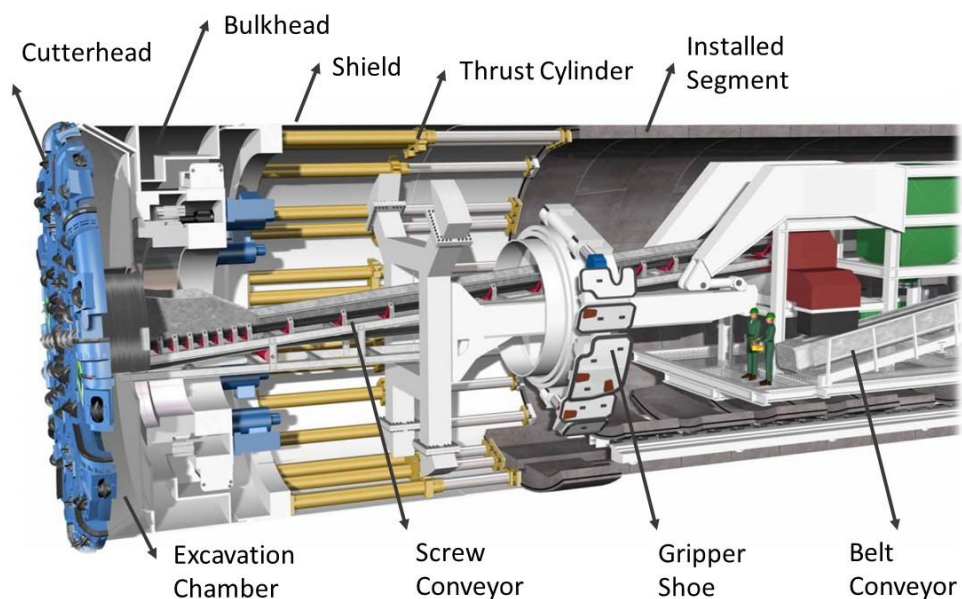
- Open TBMs: quando ci troviamo in terreni rocciosi si possono utilizzare *TBM aperte* o *unshielded*. In questo caso la macchina è formata da una testa rotante di scavo o testa fresante sulla quale sono montati utensili di taglio che effettuano l'azione di scavo vera e propria. Al giorno d'oggi si utilizzano solo teste piatte. La testa rotante è forzata contro il fronte di scavo con una certa pressione, per tale operazione occorre avere dei punti fissi che vengono chiamati *grippers*, questi sono infatti dei martinetti idraulici che spingono in avanti la testa tagliente. Ci sono poi dei motori che la fanno ruotare, questi motori possono essere idraulici o elettrici, oggi si preferisce l'utilizzo solo di motori elettrici. Sono, inoltre, presenti delle *tasche di raccolta* o *buckets* aventi la funzione di convogliare il materiale scavato in una parte interna della testa di taglio sul nastro trasportatore atto allo smaltimento. La parte di macchina che si trova oltre la testa rotante viene chiamata *Back up*, questa può essere descritta come una serie di diversi "vagoni" ognuno dei quali è legato a un

aspetto tecnologico diverso. Con questo tipo di macchina durante lo scavo è necessario l'uso di supporti temporanei, come bulloni, rete elettrosaldata, elementi d'acciaio o più raramente viene spruzzato del cls, che servono a garantire la sicurezza dei lavoratori e la stabilità del tunnel fino a quando verrà gettato in opera o posizionato il rivestimento completo.

La TBM aperta incontra dei limiti quando si entra in zona di discontinuità non previste, in particolare se si va incontro ad una massa rocciosa poco rigida in cui si possono avere problemi di stabilità; in questi casi vengono utilizzati altri tipi di macchinari.



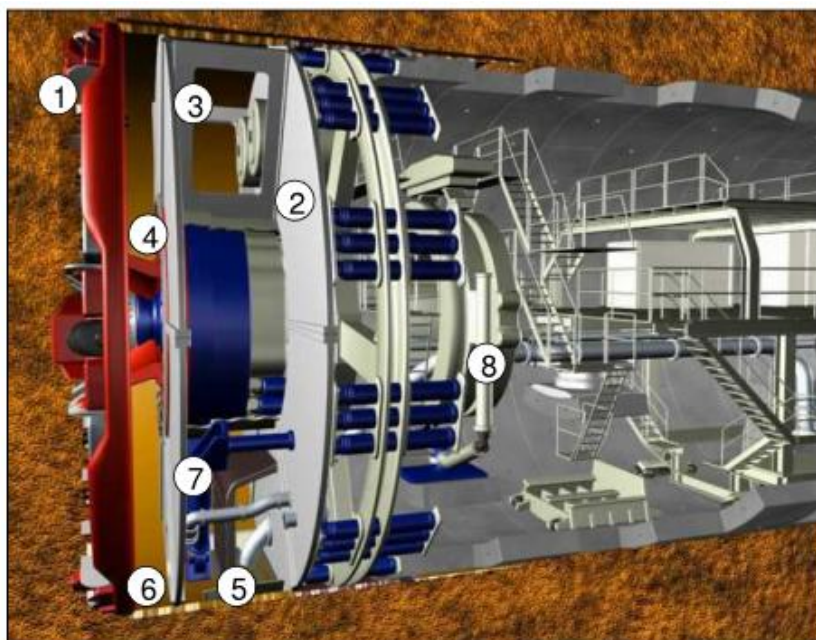
- Shielded TBM: queste possono essere *SS-TBM (single shielded)* o *DS-TBM (double shielded)*. Lo scudo è un elemento cilindrico di metallo che protegge la macchina e garantisce la stabilità del terreno. A causa della presenza dello scudo questa macchina deve utilizzare un metodo diverso dai *grippers* descritti sopra per andare avanti, poiché questi non possono espandersi attraverso un cilindro d'acciaio. Viene, quindi, assemblato un rivestimento formato da conci prefabbricati dietro lo scudo e la macchina viene spinta in avanti utilizzando dei martinetti longitudinali posizionati lungo il perimetro del rivestimento appena assemblato. In questo caso non si ha bisogno di supporti temporanei perché dietro lo scudo avviene, appunto, l'installazione del rivestimento che fa da supporto immediato per il tunnel.



3.3 Tunnelling meccanizzato in terreni sciolti

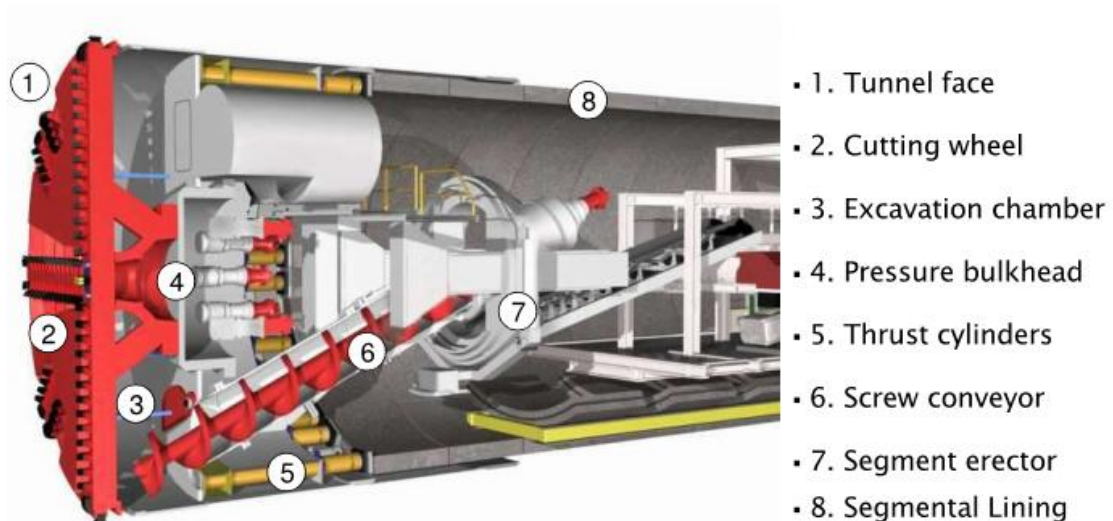
In questo caso il problema principale è mantenere la stabilità del terreno, per garantire la stabilità del fronte le macchine devono applicare una pressione, quindi vengono classificate in base alla metodologia di applicazione della pressione:

- Macchinari ad aria compressa: oggi l'aria compressa viene utilizzata solo per le condizioni di lavoro e non più per lo scavo della galleria, in particolare si utilizza quando i lavoratori devono entrare in camera di pressione per cambiare gli utensili.
- *Slurry machines*: per applicare pressione sul fronte viene usata la bentonite, questa spruzzata sul fronte crea un sottile strato che permette all'acqua di passare ma allo stesso tempo applica una pressione sul fronte. Successivamente la testa di scavo demolisce il terreno, gli scarti mischiati a bentonite vengono poi trasportati verso l'esterno. Ci sono, però, due particolari svantaggi: nel caso di terreni grossolani la bentonite non riesce a creare lo strato di cui si è parlato precedentemente, inoltre è necessario usare un macchinario, molto costoso, che separi il materiale di scarto dalla bentonite.



- 1. Cutting wheel
- 2. Pressure bulkhead
- 3. Compressed air
- 4. Submerged wall
- 5. Slurry line
- 6. Stone crusher
- 7. Feed line
- 8. Segment erector

- *Macchina EPB (earth pressure balance)*: il materiale di scarto viene mischiato ad acqua per creare un fango che viene applicato sul fronte di scavo per garantire la stabilità. Queste macchine danno un ottimo risultato in terreni argillosi, ma possono essere utilizzate anche in sabbie o ghiaie mediante l'uso di additivi chimici che trasformino il materiale di scarto in materiale plastico.

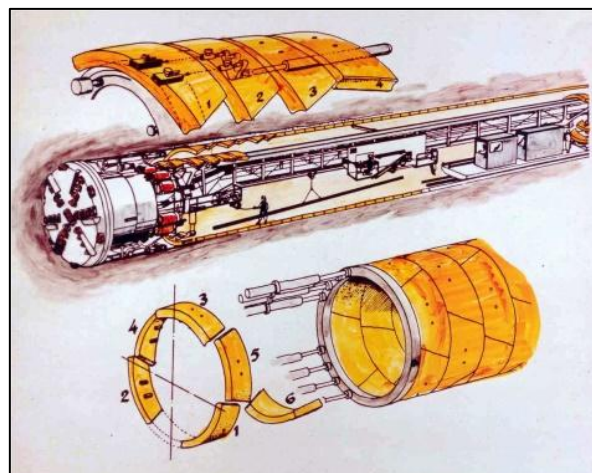


In generale si può dire che i metodi tradizionali, come per esempio i metodi esplosivi, sono più flessibili ma i metodi meccanizzati sono più veloci. Lo scavo meccanizzato è particolarmente ideale e competitivo rispetto allo scavo tradizionale per gallerie di lunghezza superiore ai 2-3 km.

Al giorno d'oggi si sta andando verso l'utilizzo di macchine universali, cioè *shielded TBM* che possono lavorare sia in terreni rocciosi che in terreni sciolti.

3.4 Rivestimento delle gallerie

Quando si utilizza una fresa meccanica il rivestimento del tunnel viene assemblato dalla TBM stessa. Il dispositivo di messa in opera del rivestimento si trova nella parte terminale dello scudo in corrispondenza della coda dello scudo, in modo tale da agire al riparo durante le operazioni d'installazione del rivestimento. L'anello si monta posizionando i conci lungo il perimetro, accostandoli l'uno all'altro man mano che lo scavo prosegue.



4 Building Information Modeling

BIM è l'acronimo di *Building Information Modeling* (Modello di Informazioni di un Edificio) ed è definito dal National Institute of Building Science come la “rappresentazione digitale di caratteristiche fisiche e funzionali di un oggetto”.

Il BIM quindi non è un prodotto né un software ma un processo che forma e utilizza il contenitore di informazioni sull’edificio, nasce in un contesto moderno che sempre più chiede la collaborazione tra i progettisti, l’interoperabilità dei software e l’integrazione tra i processi e la sostenibilità.

Il BIM è infatti un metodo di progettazione collaborativo in quanto consente di integrare in un unico modello le informazioni utili in ogni fase della progettazione: quella architettonica, strutturale, impiantistica, energetica e gestionale. Il modello tridimensionale, quindi, racchiude informazioni riguardanti volume e dimensioni, materiale, aspetto, caratteristiche tecniche, tempi, costi, etc.

Questa tecnologia offre molteplici vantaggi come: maggiore efficienza e produttività durante la fase progettuale, drastica diminuzione degli errore dovuti alle interferenze tra le diverse discipline coinvolte, riduzione dei tempi di modifiche progettuali, controllo dei costi, maggiore interoperabilità, massima condivisione delle informazioni, un controllo più puntuale e coerente del progetto.

Inoltre un progetto BIM dà la possibilità alla committenza di avere un’elaborazione virtuale del ciclo di vita dell’edificio, anche dopo la fase di progettazione; in questo modo è più semplice monitorare la vetustà dei materiali e programmare meglio la manutenzione.



Il processo edilizio può essere descritto come un sistema complesso costituito da una serie di fasi che si susseguono tra loro a partire dalla definizione degli obiettivi per arrivare alla realizzazione di un certo prodotto finito. Prendendo in considerazione lo scenario attuale in cui si trova l'industria delle costruzioni, risulta evidente come la necessità di una gestione più efficiente del patrimonio immobiliare esistente stia diventando il tema centrale di questi ultimi anni.

È essenziale la presenza di un sistema di controllo e gestione delle varie attività urbanistiche ed edilizie, nonché la valutazione della loro compatibilità con le trasformazioni che continuamente investono la città. Per questo motivo si impone un rinnovamento nel modo di concepire l'iter progettuale basato su strumenti di gestione e di comunicazione dei dati innovativi.

Il BIM può essere la via attraverso cui, rispettando la definizione di processo edilizio, sia possibile governare il patrimonio immobiliare che le pubbliche amministrazioni, ma non solo, si trovano a dover gestire quotidianamente.

Paragonando il processo tradizionale con l'innovazione proposta dal BIM si può dire che il processo BIM sposta il momento massimo di sforzo nella fase iniziale del processo. Così facendo, tutte le parti interessate al progetto sono coinvolte fin dall'inizio in modo che ciascun professionista possa elaborare le proprie scelte progettuali coordinandosi con gli altri, favorendo un approccio integrato all'elaborazione e alla consegna del progetto, evitando di commettere errori che causerebbero ritardi ed aumenti in termini economici e temporali.

Avendo chiaro il significato del BIM, l'utilizzo di questa metodologia di lavoro implica l'elaborazione di un modello parametrico in grado di collezionare tutte le informazioni che dovranno essere condivise con i diversi soggetti interessati.

In particolare, l'ambito del BIM che interessa in questo lavoro è l'interoperabilità tra progetto architettonico e progetto strutturale. Proprio per questo scopo, considerando che il software utilizzato dall'azienda per la progettazione architettonica è *Autodesk Revit*, è stato scelto di utilizzare come software di calcolo strutturale il programma *Autodesk Robot Structural Analysis*.

In linea teorica grazie all'interoperabilità tra i software, i dati contenuti nel modello possono essere trasferiti in maniera automatica e senza perdita di dati sfruttando le funzioni di import/export tra il modello architettonico e quello per il calcolo strutturale. Questo lavoro di ricerca ha anche avuto lo scopo di indagare il reale grado di interoperabilità tra software nel caso di una modellazione complessa come quella in esame.

5 Preparazione del modello

Il modello che è stato creato per questo lavoro ha puramente uno scopo didattico nonostante siano stati utilizzati come dati di input (geometria, carichi, etc.) valori potenzialmente vicini alla realtà.

Sin dall'inizio era noto che la creazione del modello avrebbe incontrato delle difficoltà e la sfida sarebbe stata quella di riuscire a superare queste difficoltà utilizzando un software che di solito non è utilizzato per questo tipo di modellazione.

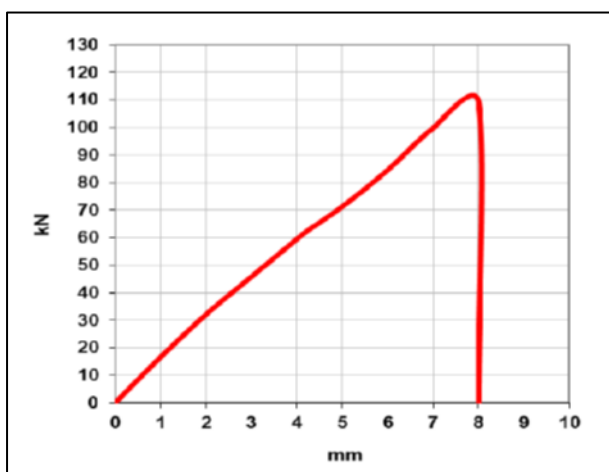
Sfruttando l'interoperabilità tra i software Revit e Robot si riesce a creare un modello architettonico 3D da cui si riesce ad estrapolare un modello analitico perfettamente funzionante per fare delle analisi strutturali, questo metodo è stato già messo alla prova per strutture più "classiche", edifici, cioè strutture formate da travi, pilastri e muri.

In questo caso non si voleva modellare un edificio bensì una struttura formata da due parti principali: la galleria e la struttura metallica temporanea. Queste sono strutture fondamentalmente diverse, che hanno materiali diversi, che si comportano in modo diverso. Sono strutture che vanno modellate usando elementi diversi tra di loro ma che devono coesistere all'interno dello stesso modello. Le due parti devono relazionarsi nel modo più vicino alla realtà possibile e questo, si sapeva, avrebbe portato a delle problematiche non indifferenti.

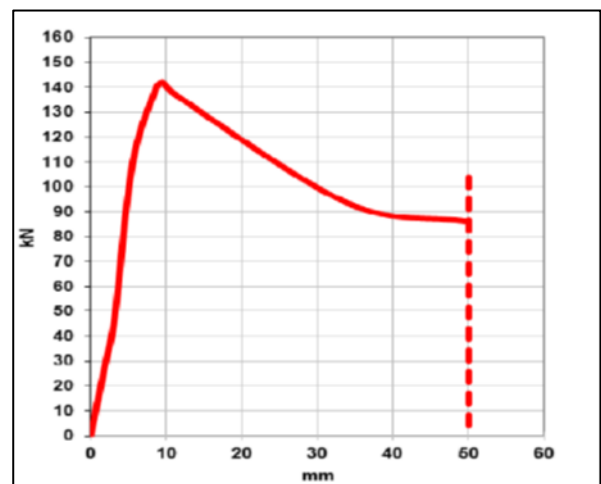
5.1 Descrizione della struttura

La struttura in esame è un'intersezione tra tunnel. Si tratta, nel dettaglio, della parte di tunnel principale, di raggio 3.235 m, interessato dalla presenza dell'apertura per la creazione di un cross passage (tunnel trasversali più piccoli che collegano due tunnel principali), un'apertura rettangolare di dimensioni 2 x 4.05 m.

Tra conci appartenenti ad anelli consecutivi sono presenti dei connettori Dowel. Il comportamento di questi elementi è illustrato nelle seguenti immagini:

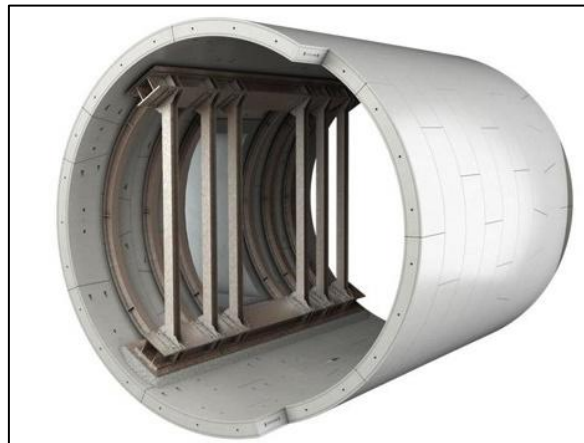


Forza di taglio – Spostamento
Shear strength = 140kN

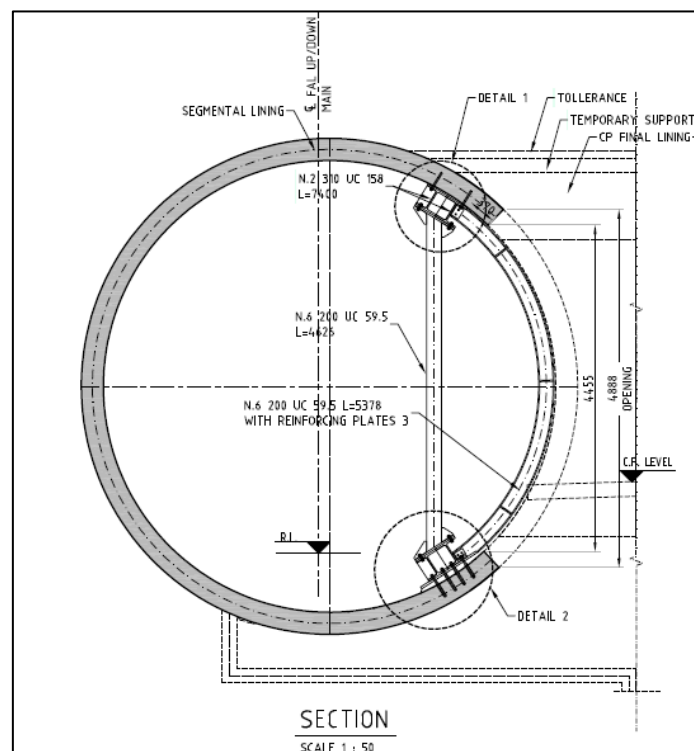


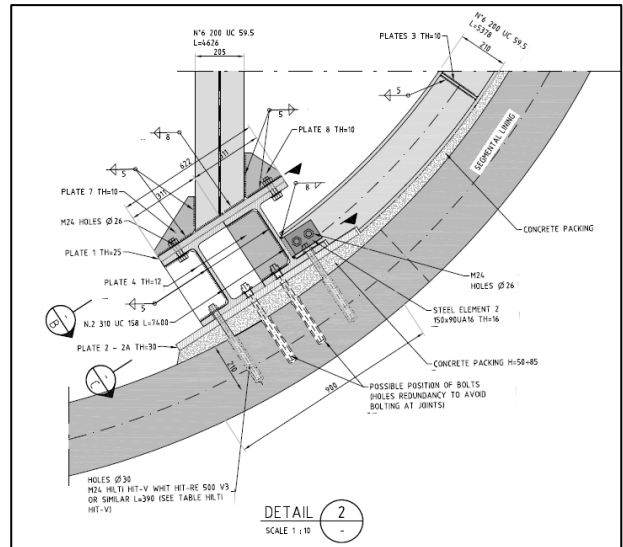
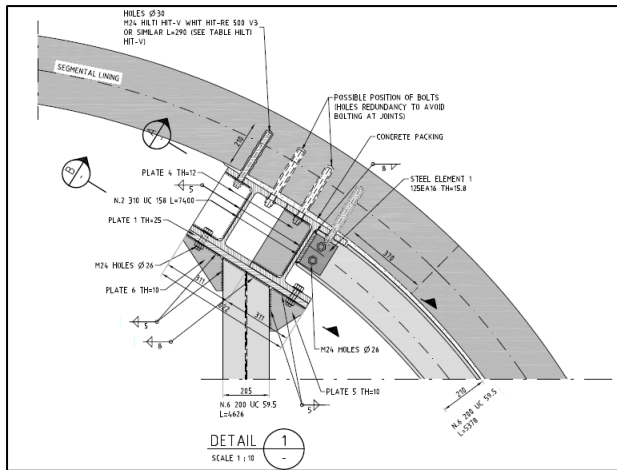
Forza di sfilamento – Spostamento
Extraction force from integral cup
on cls = 110kN

Durante la costruzione deve essere montata una struttura metallica temporanea in corrispondenza dell'intersezione tra il tunnel e il cross passage. Quando viene creata l'apertura ci sarà una perturbazione dello stato tensionale, questa struttura metallica temporanea di supporto garantisce la stabilità della zona di intersezione nel momento in cui avviene la ridistribuzione degli stress del terreno e quindi la sicurezza di tutto il lavoro. Lo scavo del cross passage dovrà iniziare solo successivamente al montaggio di questa struttura.



Riporto di seguito una sezione dei particolari costruttivi:





La struttura metallica temporanea è composta dalle seguenti parti:

- una trave superiore 2x310UC158
- una trave inferiore 2x310UC158
- tre colonne rettilinee 200UC59.5
- tre colonne curvilinee 200UC59.5

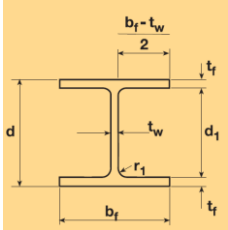
5.1.1 Materiali

Le caratteristiche del cemento utilizzato in questo progetto sono elencate nella seguente tabella:

	Property	Characteristics
Concrete	Grade, f'_c [MPa] ¹	40* Characteristic compressive strength of concrete at 28days (SWTC 28.4(a)(iii)).
	Elastic modulus, E_c [MPa]	32800 (AS 3600)
	Elastic modulus, E_c [MPa], Long term	$E_c/(1+\Phi_{cc}) \sim 16400$ ($\Phi_{cc} \sim 1$) (AS 5100.5, section 6.1.8)
	Poisson Ratio, ν [-]	0.2 (AS 3600)
	Density, ρ [kg/m ³]	2400 pure concrete, 2500 reinforced concrete (AS 3600)
	Polypropylene fibre	From 1.25kg/m ³ to 2.0kg/m ³

¹ Concrete grade $f'_c=40$ MPa satisfy also section 4.7 of AS3600 (Freezing and Thawing).

Le caratteristiche della struttura metallica temporanea, utilizzata per supportare il rivestimento durante l'apertura del cross passage, sono elencate nelle seguenti tabelle:

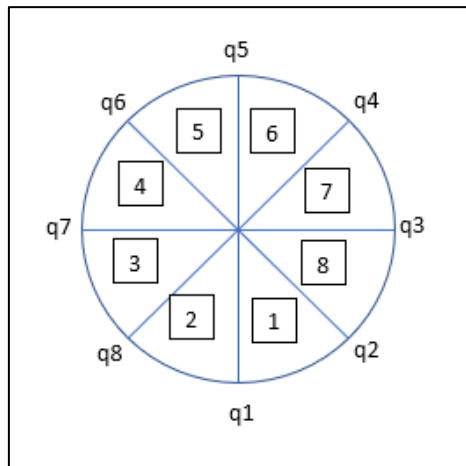
	Property	Characteristics
Reinforcing elements 	Steel frame	
	Type:	310 UC 158, 200 UC 59.5
	- Class	Grade 350
	- Elastic modulus:	$E_a = 200000 \text{ N/mm}^2$

Type	Weight [kg/m]	d [mm]	b _f [mm]	t _f [mm]	t _w [mm]	A [mm ²]	I _x [10 ⁶ mm ⁴]	Z _x [10 ³ mm ³]
310UC	158	327	311	25.0	15.7	20100	388	2370
200UC	59.5	210	205	14.2	9.3	7620	61.3	584

5.2 Considerazioni iniziali

Prima di iniziare la modellazione sono state fatte le seguenti considerazioni:

- Numero di anelli: per questo particolare modello è stato scelto di analizzare una parte del tunnel principale che comprendesse quindici anelli, con quelli interessati dall'apertura posizionati al centro. Considerando una tale lunghezza è stato possibile avere nello stesso modello sia una parte di tunnel non interessato dalla costruzione dell'apertura, sia la parte il cui stato tensionale varia notevolmente al momento della realizzazione dell'apertura.
- Numero di conci per ogni anello: in realtà ogni anello è formato da conci diversi tra loro che vengono assemblati con un certo ordine. Nel modello, invece, è stato scelto un numero di conci in relazione al carico del terreno che premeva su di essi. Dalle analisi geotecniche è stato possibile fare una semplificazione e dividere il carico in otto parti. Quindi nel modello ogni anello è formato da otto conci uguali tra di loro, su ognuno dei quali è applicato un carico linearmente distribuito superficiale diverso che segue il seguente schema



- Connessioni: era necessario introdurre delle aste che simulassero gli elementi dowel, cioè i connettori tra anelli, l'attrito tra anelli e le connessioni tra rivestimento del tunnel e struttura metallica temporanea.

Partendo da queste considerazioni iniziali bisognava affrontare una problematica fondamentale: la mesh in corrispondenza dei punti di contatto tra tutti gli elementi del modello doveva essere regolare in modo che, alla fine del calcolo, si potesse avere una soluzione vicina alla realtà.

Riassumendo, la mesh di ogni elemento è stata pensata sin dal principio considerando la struttura nella sua interezza, in modo da risultare regolare anche in prossimità delle connessioni tra struttura metallica e rivestimento della galleria e delle connessioni tra anelli consecutivi.

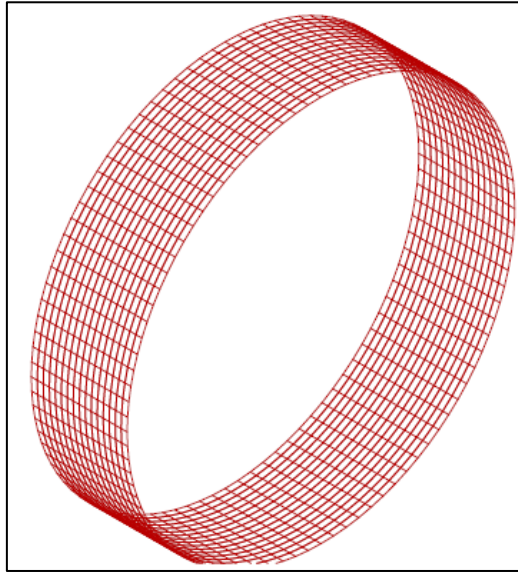
Il software Robot Structural Analysis non permette di disegnare la mesh, permette solo di dare delle indicazioni sulla grandezza o sul numero di elementi ma poi la generazione di essa viene fatta automaticamente dal programma. Di conseguenza se si volevano dare delle indicazioni rigide bisognava disegnare ogni elemento pensando a come il programma avrebbe poi generato la mesh. La soluzione che è stata pensata è quella di disegnare la struttura su un semplice software di disegno come Autocad, compresa la mesh.

5.3 Primo approccio alla modellazione

Tutto il discorso sulla mesh fatto prima si riferisce agli elementi di superficie, che in questa struttura sono stati utilizzati solo per la modellazione dei conci. Tutto il resto degli elementi è stato modellato con elementi beam.

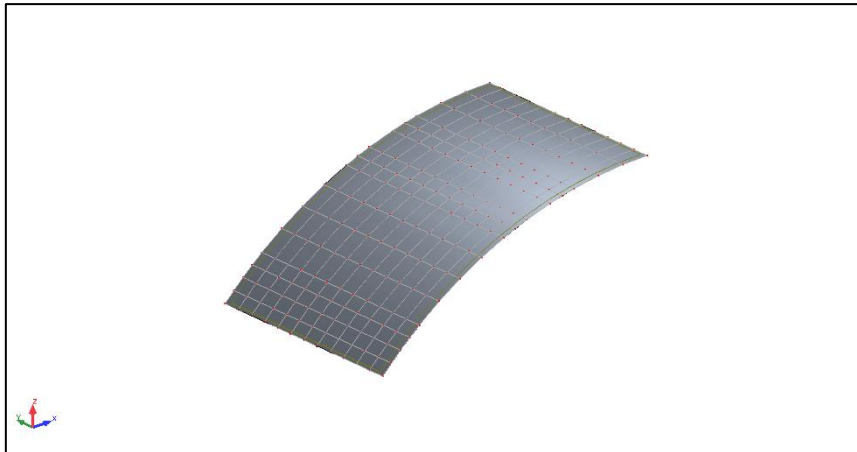
Ogni anello è una struttura curvilinea ma nel modello doveva essere discretizzato, cioè diviso in una serie di elementi rettilinei. Si può dividere il singolo concio in un numero di elementi a piacere, per i conci dei cinque anelli iniziali questa era una scelta più o meno libera, ma per i conci in contatto con le connessioni della struttura metallica questa scelta invece era comandata dal fatto che per far sì che una mesh funzioni nel modo migliore le connessioni e gli elementi della mesh del concio devono avere dei nodi in comune. Per esempio, nel caso delle connessioni tra struttura metallica e rivestimento: l'elemento beam ha due nodi, quello iniziale e quello finale, uno dei due

collegato alla struttura metallica e l'altro collegato al concio, questo nodo non poteva ricadere all'interno di un elemento della mesh ma la sua posizione deve necessariamente corrispondere con quella di un nodo di questo elemento. Quindi, il numero e la grandezza degli elementi sono stati scelti in modo che tutte le connessioni di cui si è parlato prima fossero in corrispondenza di un nodo; la scelta ottimale è ricaduta sul dividere la circonferenza dell'anello in 96 parti, di conseguenza ogni elemento ha dimensione 21.75 x 10 cm. 96 elementi formano l'*anello elementare*, 16 di questi formano l'anello completo, il quale è riportato nella figura sottostante:



Robot permette di importare un file .dxf ma utilizzando questo strumento si riesce ad importare sul programma di calcolo solo un'immagine. Il passaggio corretto, invece, è quello di aprire un file .dxf, non usare quindi il comando *importa* bensì *apri*. In questo modo Robot riconosce ogni linea ed è quindi possibile disegnarci sopra. Si ricorda che Robot non permette di disegnare la mesh quindi l'elemento che importava trasferire era il contorno di un singolo concio già diviso nel giusto numero di elementi rettilinei. È stato seguito il seguente procedimento:

- Su Autocad dal disegno dell'anello è stato ricavato il contorno di un singolo concio
- Su Robot è stato modellato un pannello utilizzando il contorno precedentemente disegnato ed è stata creata una mesh di prova per capire se realmente il programma riuscisse a seguire le indicazioni date attraverso la forma geometrica dell'elemento. Dando solo le indicazioni sul numero degli elementi, questo è stato il risultato:



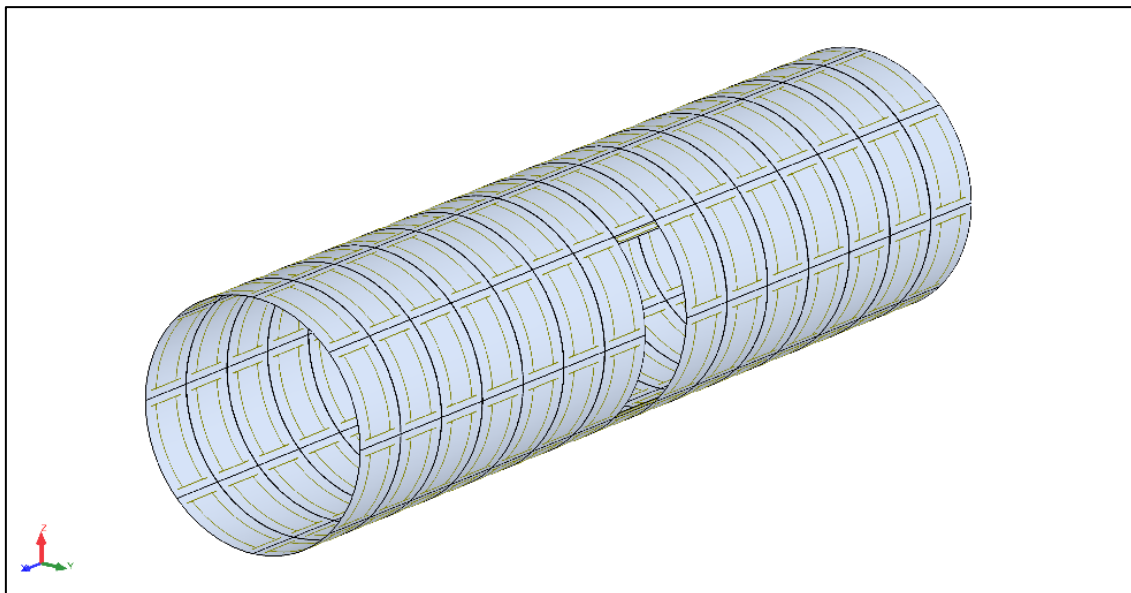
Paragonando il disegno dell'anello su Autocad, con la mesh disegnata dall'utente, e il concio creato su Robot, con la mesh generata dal programma, si può notare come le due sono molto simili, quindi in effetti il programma ha realmente generato la mesh che si desiderava.

Accertata questa soluzione si è proceduto con la modellazione del resto della struttura.

5.4 Soluzione di modellazione finale: descrizione del modello

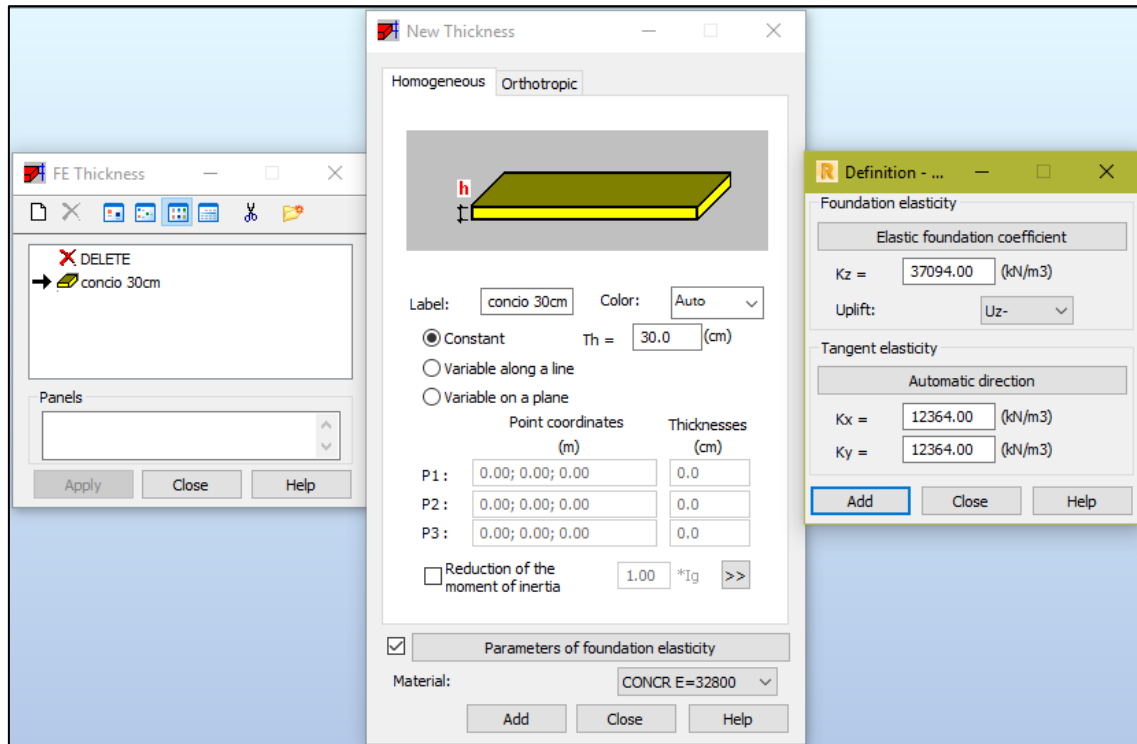
In questo capitolo si riporta con precisione la descrizione del modello in ogni sua parte.

5.4.1 Tunnel



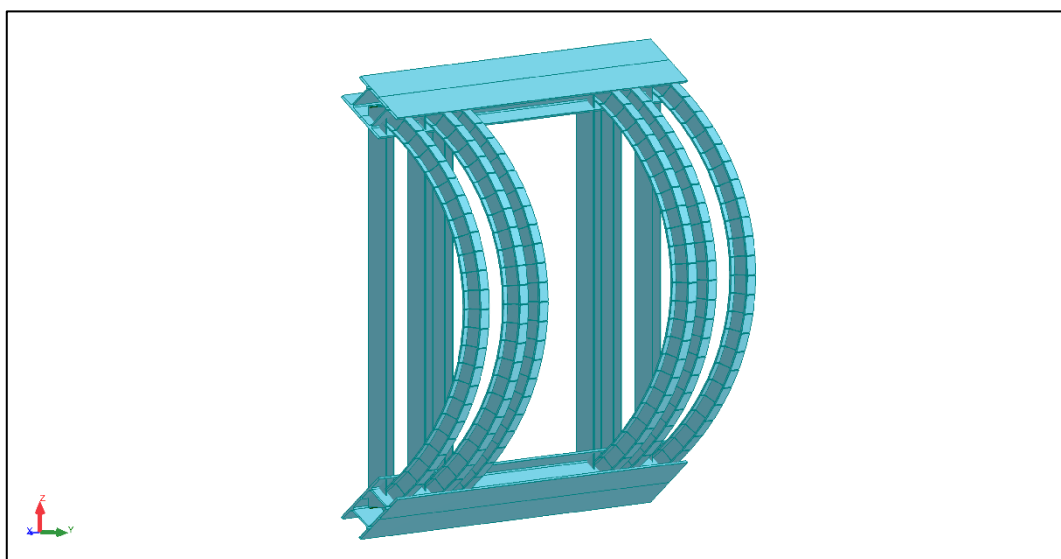
Il tunnel è formato da quindici anelli, ogni anello è diviso in otto conci. I conci sono stati creati utilizzando l'elemento *pannello*. La galleria è immersa nel terreno, il quale viene rappresentato con delle molle che reagiscono con una certa rigidità, questa è stata ricavata da indagini geotecniche effettuate precedentemente. È stato

inizialmente creato un nuovo *spessore*, chiamato nel modello “concio 30 cm”, le cui caratteristiche sono le seguenti:



- Spessore costante $Th = 30 \text{ cm}$
- materiale selezionato dalla libreria del programma CONCR $E=32800$
- Parametri di elasticità della fondazione $K_z = 37094 \frac{kN}{m^3}$; $K_x = K_y = \frac{K_z}{3}$

5.4.2 Struttura metallica temporanea



Ogni elemento della struttura metallica è stato modellato come elemento *beam*. Sono stati disegnati gli elementi seguendo le indicazioni dei particolari costruttivi riportati

sopra e a questi poi sono stati assegnati i profili. Il programma ha già al suo interno diverse librerie, divise per paese, in cui è possibile trovare il profilo desiderato e associarlo ai diversi elementi del modello. In particolare, la struttura metallica temporanea è formata dai seguenti elementi:

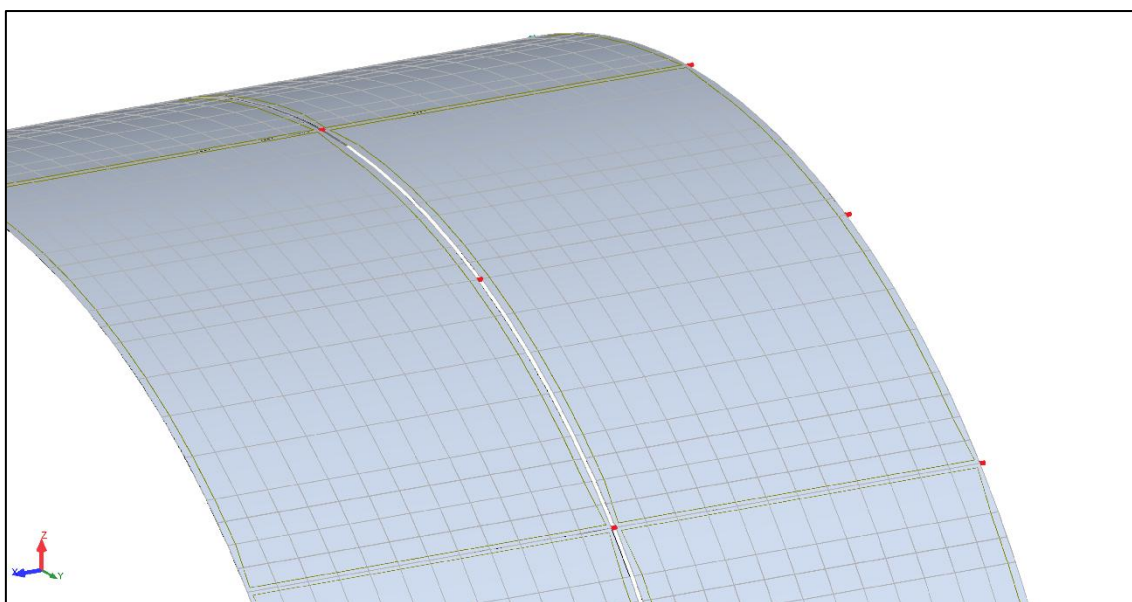
- Colonne verticali: elementi beam in acciaio di lunghezza 4.32 m, sezione 200UC59.5.
- Trave superiore e trave inferiore: elementi beam in acciaio di lunghezza 7.40 m, sezione 2UC310x158, ruotate di 45°.
- Colonne curvilinee: elementi beam create disegnando un arco passante per tre punti discretizzato in 25 parti, sezione 200UC59.5. La scelta di questa discretizzazione è stata anch'essa dettata dalla mesh dei conci. Dividendo la trave in questo modo è stato possibile disegnare degli elementi di connessione con i conci che avessero, con questi, dei nodi in comune.

5.4.3 Connessioni

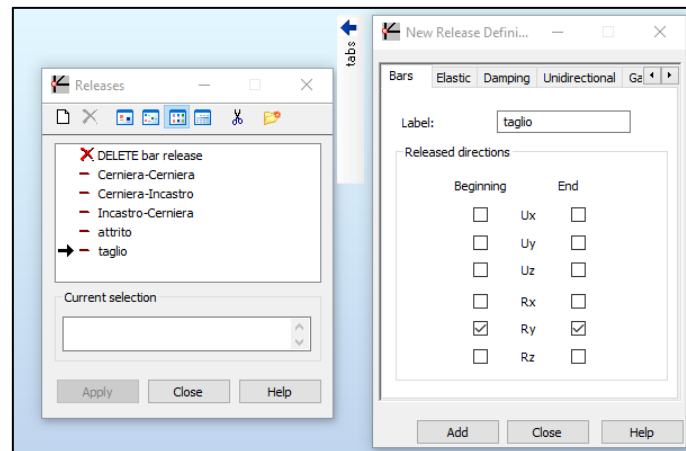
Le connessioni che volevano essere rappresentate nel modello sono: i connettori dowel, delle connessioni che simulassero l'attrito tra anelli consecutivi, connessioni che simulassero la presenza dei bulloni e della malta che connettono le travi della struttura metallica ai conci, le connessioni che collegano le travi curvilinee ai conci. Di seguito sono descritte una alla volta.

5.4.3.1 Connettori Dowel

I connettori Dowel sono stati modellati come elementi *beam* di lunghezza 2 cm. È stata assegnata loro una sezione metallica circolare piena, creata appositamente, di diametro 16mm. Sono 16 per anello, posizionati in corrispondenza dei lati e della mezzeria di ogni concio, quindi le estremità di ognuno di questi elementi corrispondono con i nodi della mesh dei due conci che collegano.

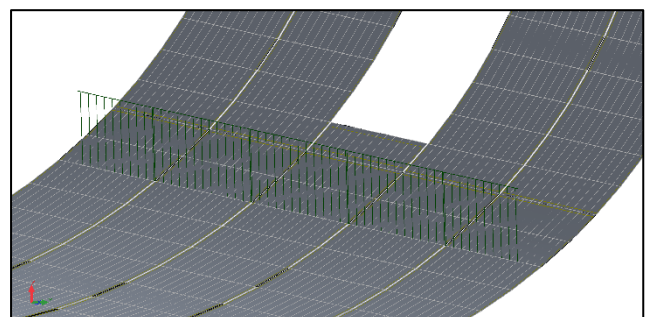
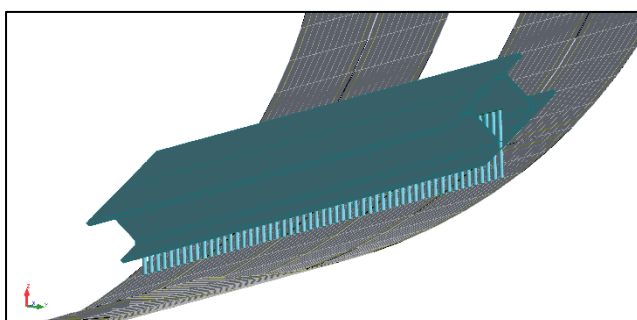
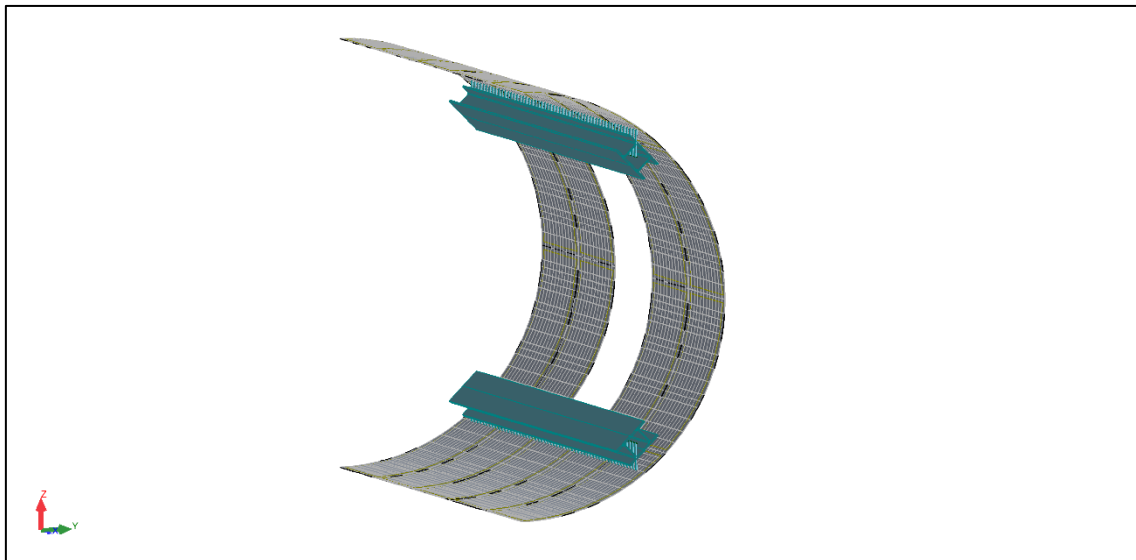


Questi elementi devono solo trasmettere il taglio e forze assiali, per riprodurre questo effetto nel modello sono state usate delle *releases*. È stato creato un nuovo tipo di rilascio, chiamato nel modello “taglio” ed associato a questi elementi, il rilascio è così composto:



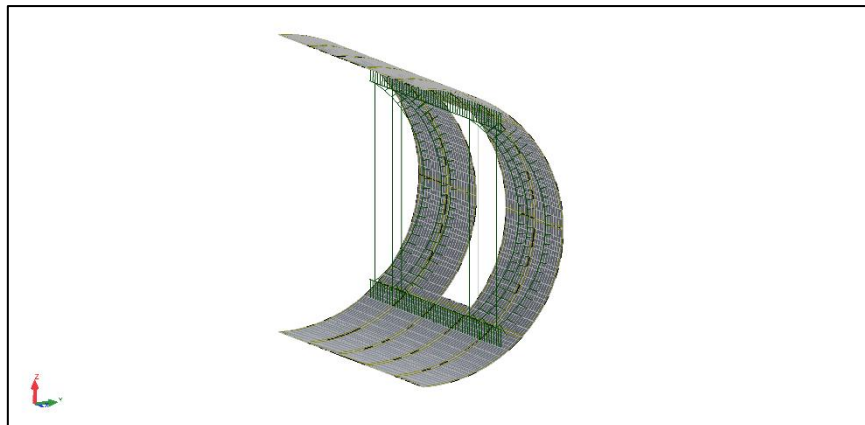
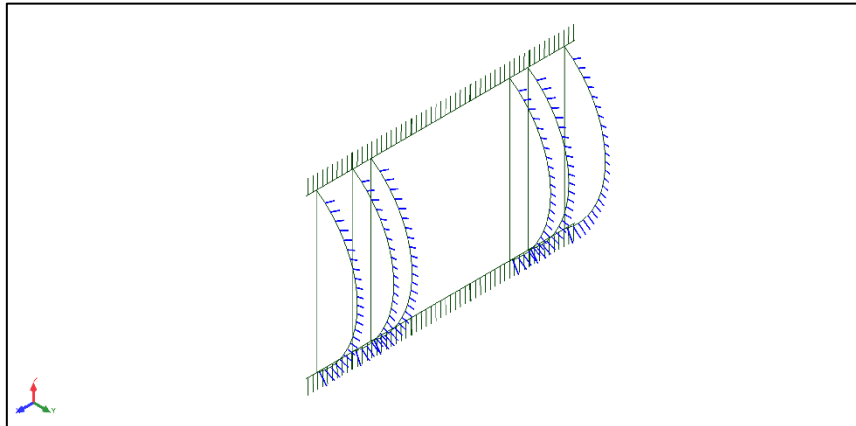
5.4.3.2 Connessioni tra travi della struttura temporanea e conci

Queste connessioni devono simulare il collegamento tra travi, superiore e inferiore, della struttura metallica e la superficie interna del rivestimento del tunnel. Sono state modellate con elementi *beam* a cui è stata assegnata una sezione circolare metallica piena di 24 mm. Queste sono uniformemente distribuite lungo la lunghezza della trave ad una distanza tale da permettere il corretto collegamento con la mesh dei conci a cui sono connesse. Anche queste sono connessioni che trasmettono solo taglio e forze assiali, quindi è stata associata ad esse la stessa *release* “taglio” dei connettori dowel.

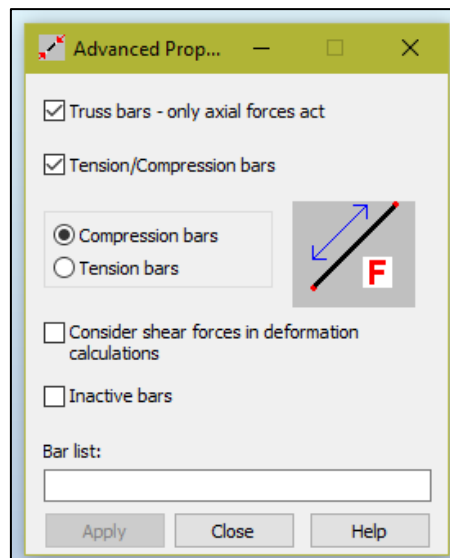


5.4.3.3 Connessioni tra travi curvilinee e conci

Queste connessioni collegano le travi curvilinee alla superficie interna del rivestimento del tunnel. Sono state modellate con elementi *beam* di sezione uguale a quella delle connessioni precedenti, hanno direzione radiale e sono linearmente distribuite lungo le colonne. Anche queste sono state disegnate in modo che i nodi delle estremità coincidono con nodi della mesh dei conci.



Sono elementi che devono trasmettere solo forza di compressione, su Robot esiste un particolare strumento, all'interno degli *additional attributes*, che permette di creare questo tipo di trave. Questo strumento, *advanced bar properties*, permette di trasformare una trave generica in una trave che trasmette solo forze assiali di compressione.



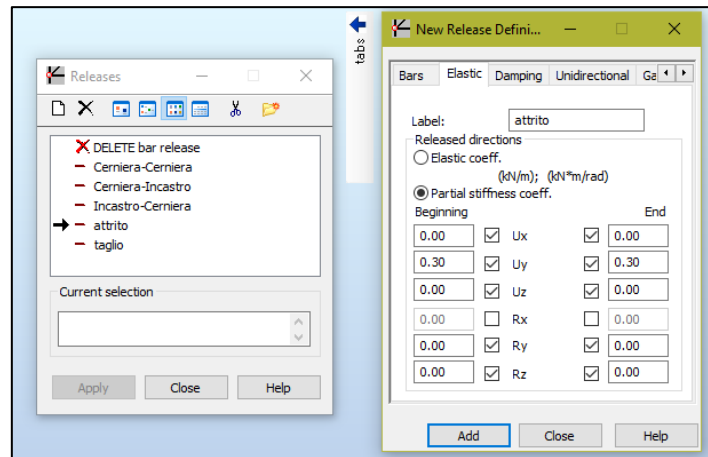
Tuttavia, una volta assegnata questa proprietà alle travi in oggetto l'analisi dà un errore di non convergenza e non arriva al completamento, per evitare però che questi elementi lavorassero come se fossero incastrati-incastrati alle estremità è stato assegnato loro lo stesso tipo di rilascio delle altre connessioni. Quando verranno mostrati i risultati delle analisi si dovrà però tenere in mente che questi elementi lavorano solo in compressione.

5.4.3.4 Connessioni per simulare l'attrito

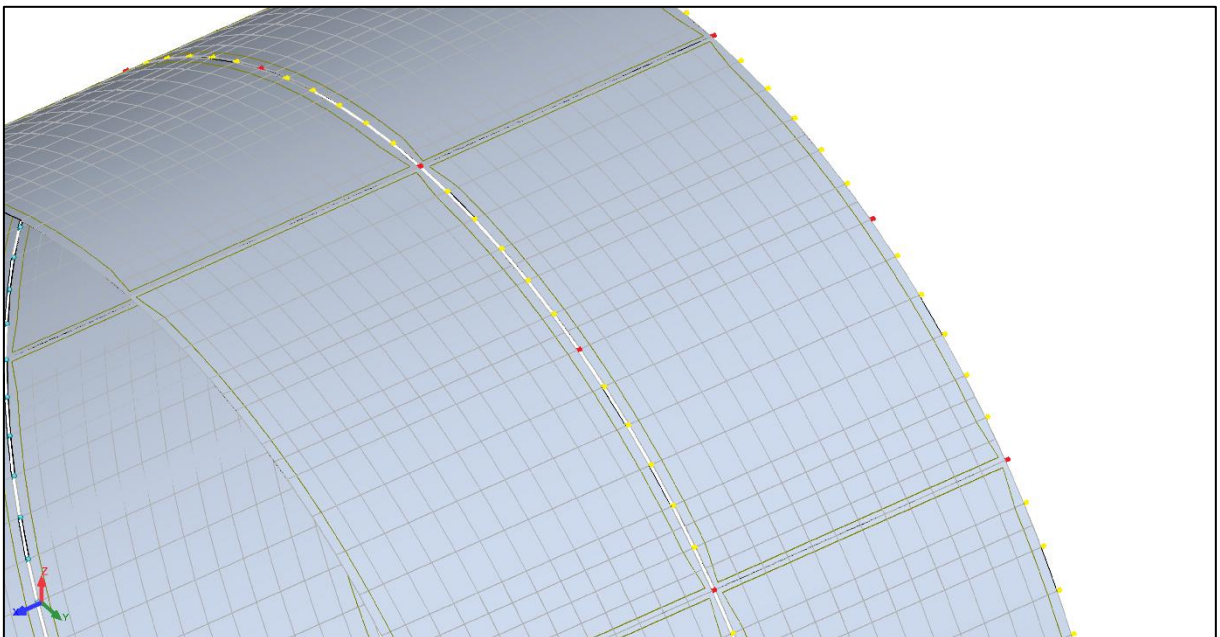
L'idea era quella di simulare l'attrito che si crea dal contatto tra gli anelli, quindi inserire nel modello degli elementi posizionati tra anelli adiacenti che dessero lo stesso effetto. Per questo comportamento particolare Robot non offre uno strumento diretto, l'unico strumento a disposizione è, di nuovo, il rilascio.

L'attrito si simula analiticamente moltiplicando la forza per un certo fattore, chiamato coefficiente d'attrito, che dipende dalla natura delle superfici a contatto. Essendo la forza il prodotto della rigidità per lo spostamento, $F = k \times u$, se si vuole ottenere μF si deve moltiplicare lo stesso fattore per uno dei due fattori del prodotto:
 $\mu F = \mu k \times u$.

Robot dà la possibilità di creare un rilascio elastico, considerando che non esiste all'interno del programma uno strumento diretto che simula l'attrito, questo era l'unica soluzione che si avvicinava all'idea di attrito appena analizzata. Quindi è stato creato un nuovo rilascio elastico assegnando alla direzione y (direzione di applicazione dell'ideale forza di attrito) un coefficiente parziale di rigidità equivalente al coefficiente d'attrito tra due superfici di cemento.



Sono stati disegnati degli elementi *beam* a cui è stata assegnata la stessa sezione degli elementi *dowel*, e sono stati posizionati tra anelli consecutivi in corrispondenza di ogni nodo della mesh. A queste travi sono stati assegnati il rilascio appena descritto. Nella seguente immagine questi elementi sono stati colorati di giallo, quelli in rosso sono le connessioni *dowel*.



Tuttavia, anche in questo caso l'elemento dava problemi al momento dell'analisi, comparivano due errori: eccessivi rilasci alle barre e problema di non convergenza. È stata, perciò, presa la decisione di eliminare queste travi e fare a meno di elementi che simulassero l'attrito.

5.4.4 Vincoli

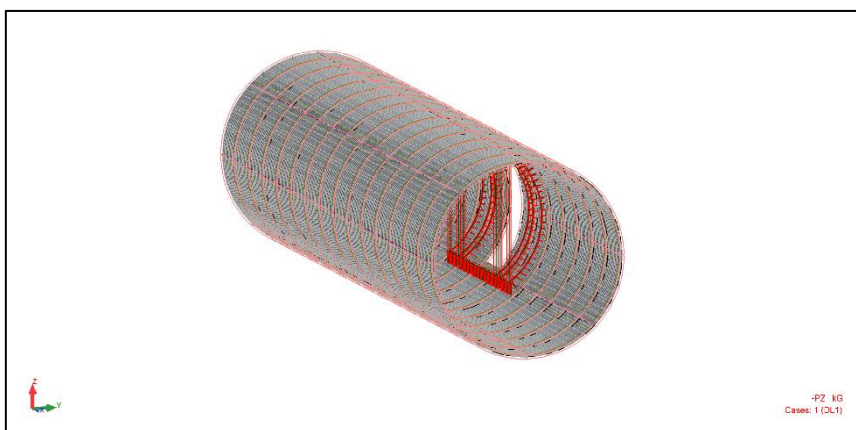
Il vincolo che simula la presenza del terreno a contatto con i pannelli è stato preso in conto nella proprietà del pannello stesso, come spiegato nel capitolo 5.4.1.

Sono inoltre presenti nel modello dei vincoli traslazionali posizionati alle estremità del tunnel.

5.4.5 Carichi

Al modello sono stati applicati due condizioni di carico: il peso proprio della struttura q_1 e il carico del terreno che agisce come carico distribuito sui pannelli q_2 . Ai fini dell'analisi questi sono stati combinati nel seguente modo: $0.3q_1 + 0.5 q_2$.

Una volta assegnati materiali e spessori ad ogni elemento, Robot può calcolare automaticamente il peso proprio.

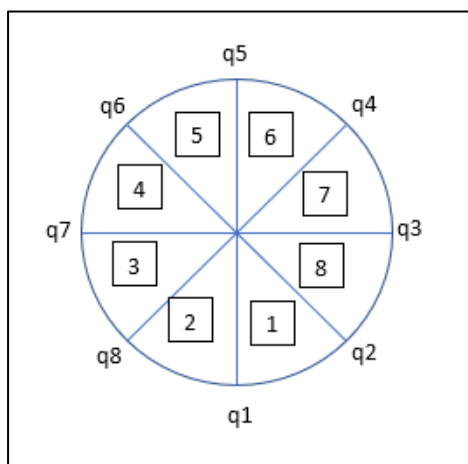


Il carico del terreno deriva da analisi numeriche effettuate precedentemente con il software PLAXIS 2D sul rivestimento della galleria. Per simulare in modo realistico i carichi che agiscono sugli anelli, ognuno di essi è stato diviso in 8 punti in cui agisce la forza precedentemente calcolata su PLAXIS. La forza calcolata in condizioni geostatiche è trasformata nella pressione che agisce lungo la circonferenza del tunnel attraverso la formula di Mariotte:

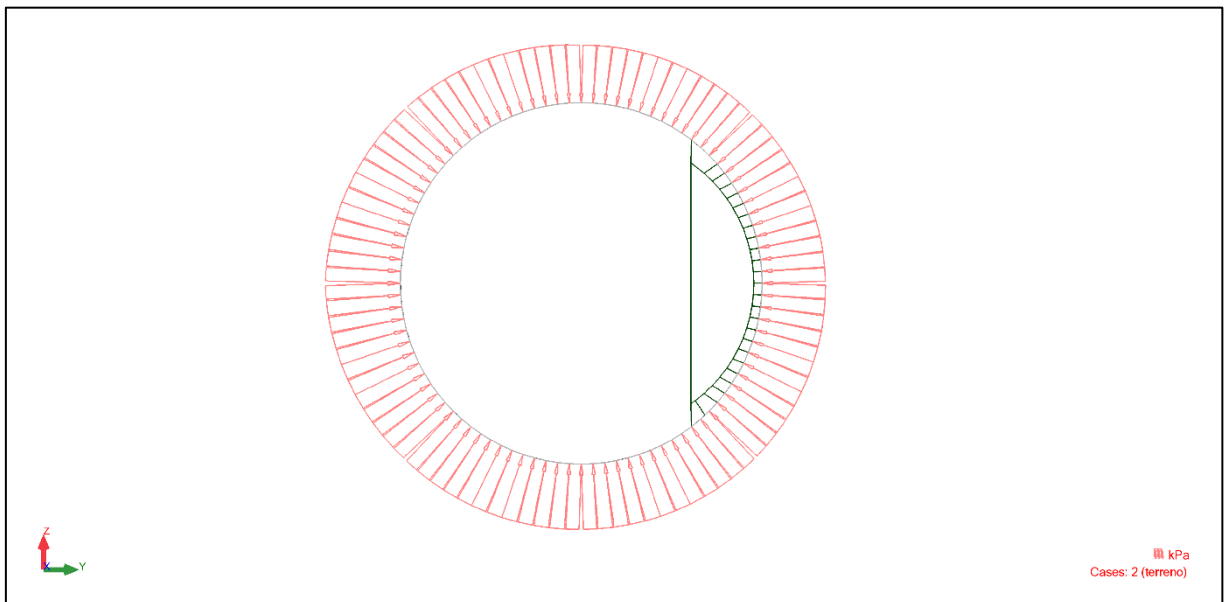
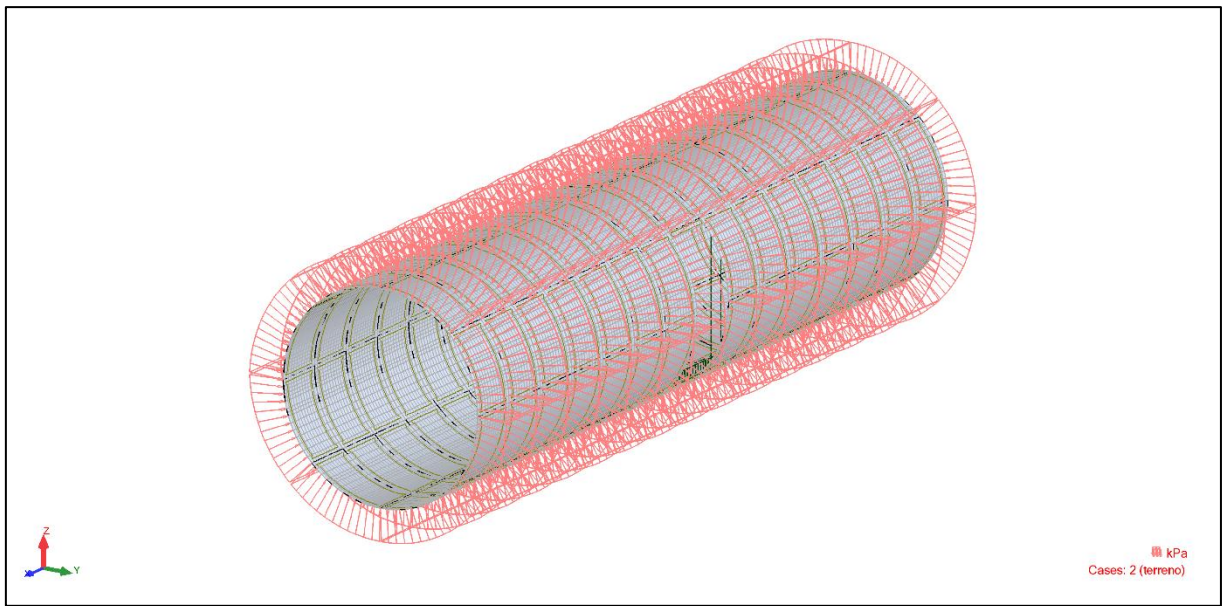
$$q = \frac{2N_k}{D}$$

Dove: N_k è la forza ottenuta dal calcolo su PLAXIS e D è il diametro del tunnel.

Il carico del terreno così calcolato è stato poi applicato al modello su Robot. Questo è un carico distribuito che varia linearmente, di seguito sono riportati i valori ricavati dall'analisi geotecnica e lo schema con cui sono stati applicati al modello:



concio	carico (kPa)	
1	q1=317,465	q2=318,702
2	q8=331,685	q1=317,465
3	q7=364,76	q8=331,685
4	q6=326,121	q7=364,76
5	q5=279,011	q6=326,121
6	q4=288,841	q5=279,011
7	q3=307,944	q4=288,841
8	q2=318,702	q3=307,944



5.4.6 Fasi costruttive

In questo lavoro di tesi l'analisi è stata effettuata per fasi di costruzione. Sono state analizzate tre fasi:

1. Fase 1: nella prima fase si tiene conto del tunnel. Sulla struttura agisce il peso proprio e il carico del terreno.
2. Fase 2: nella seconda fase viene inserita all'interno del tunnel la struttura metallica temporanea. Sulla struttura agisce il peso proprio e il carico del terreno.
3. Fase 3: nella terza fase viene creata l'apertura, quindi questa fase comprende il tunnel completo di apertura per il cross passage e la struttura metallica temporanea. Sulla struttura agisce il peso proprio e il carico del terreno.

Robot permette di definire le fasi di costruzione dalla sezione *Geometry*. I risultati dell'analisi, poi, possono essere visualizzati fase per fase.

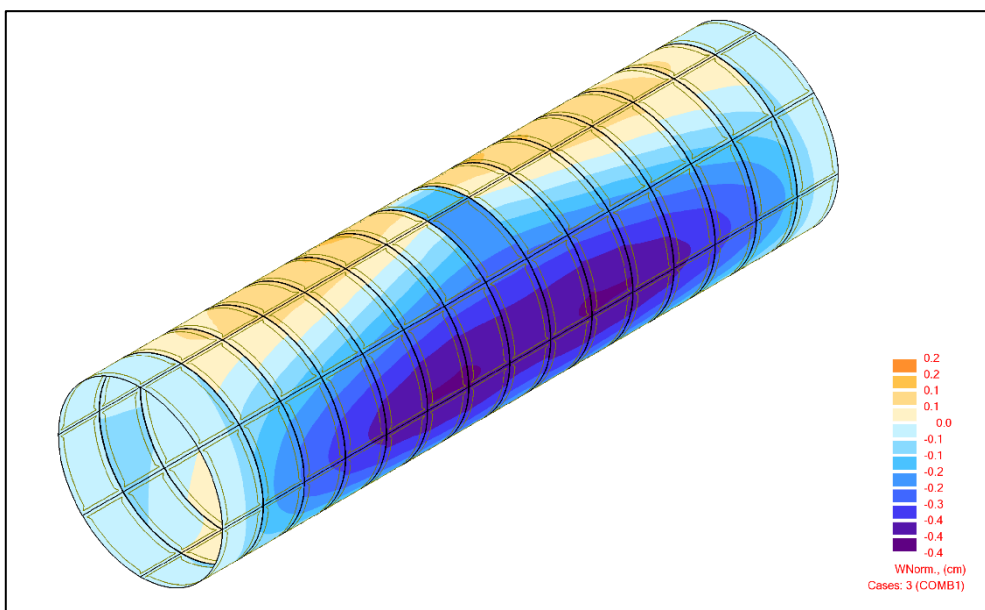
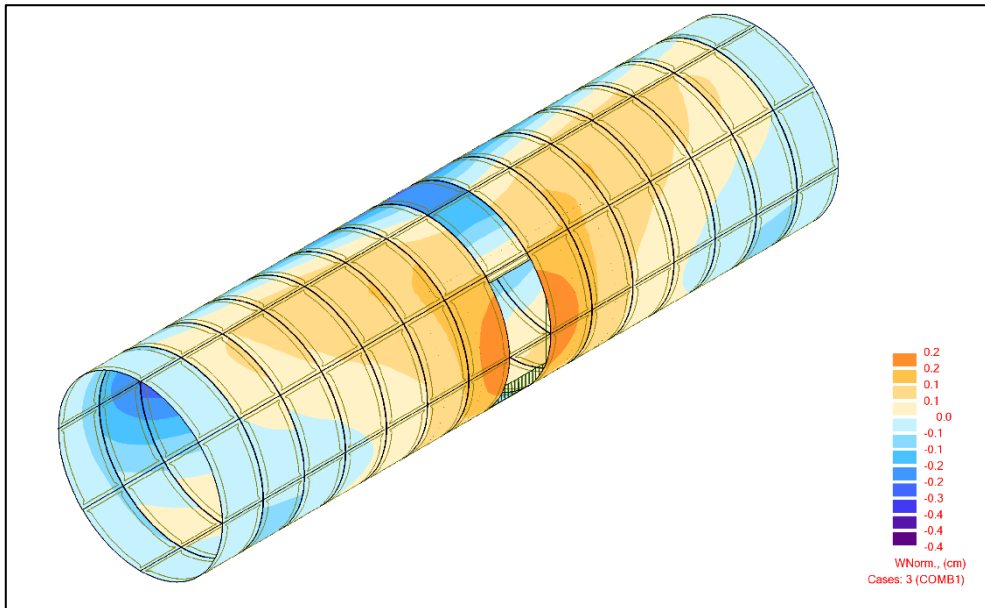
6 Analisi

In questo capitolo si riportano i risultati dell'analisi divisi per elementi del modello.

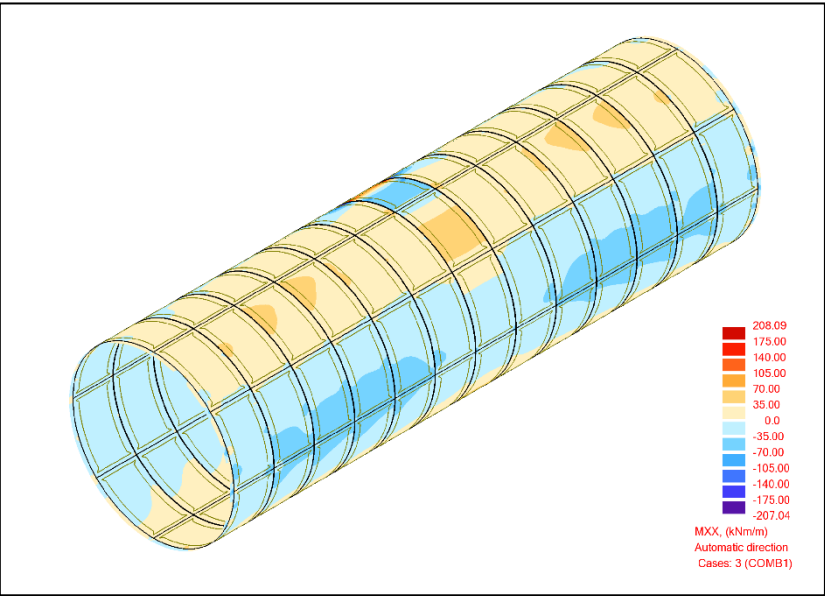
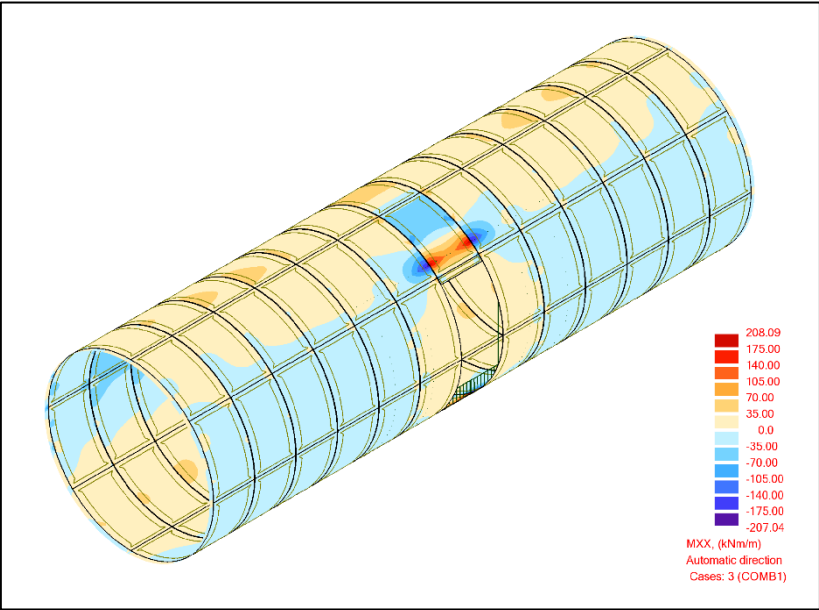
6.1 Tunnel

Il sistema locale dei pannelli vede l'asse Z direzionata verso l'esterno e l'asse X che segue la direzione dell'asse del tunnel.

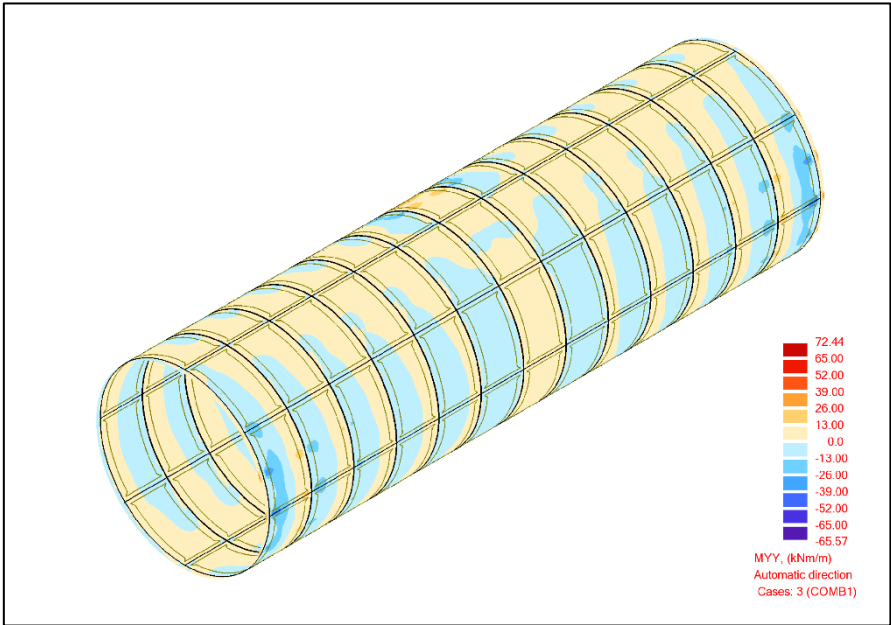
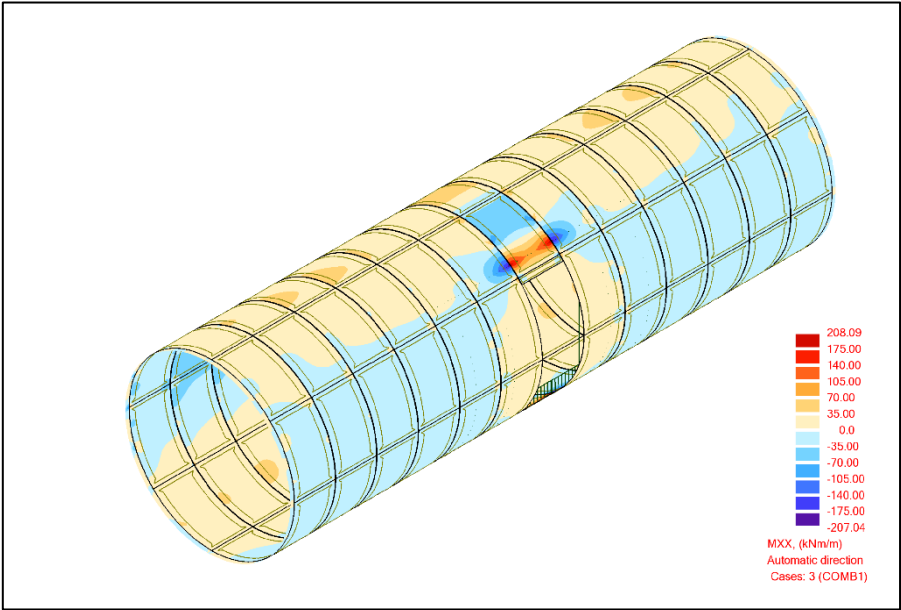
Spostamenti:



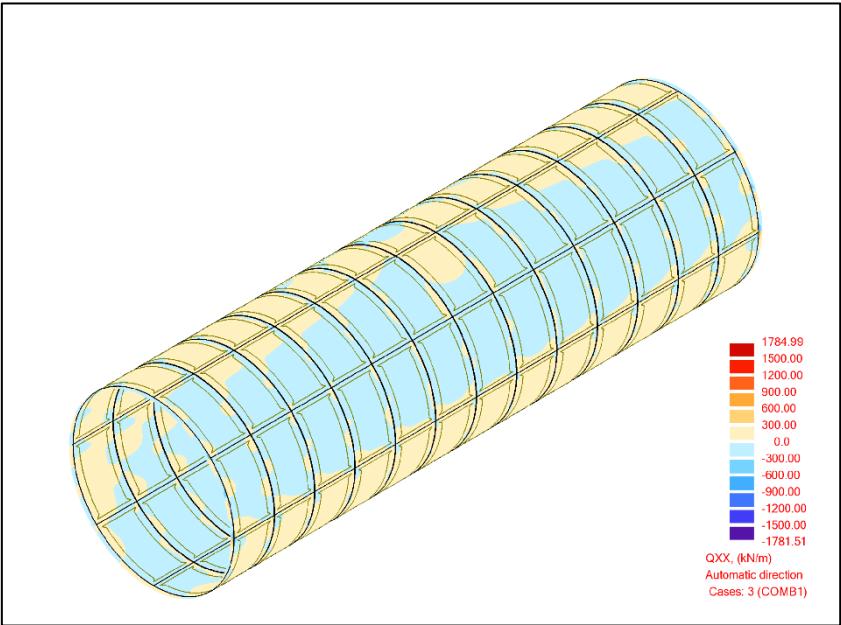
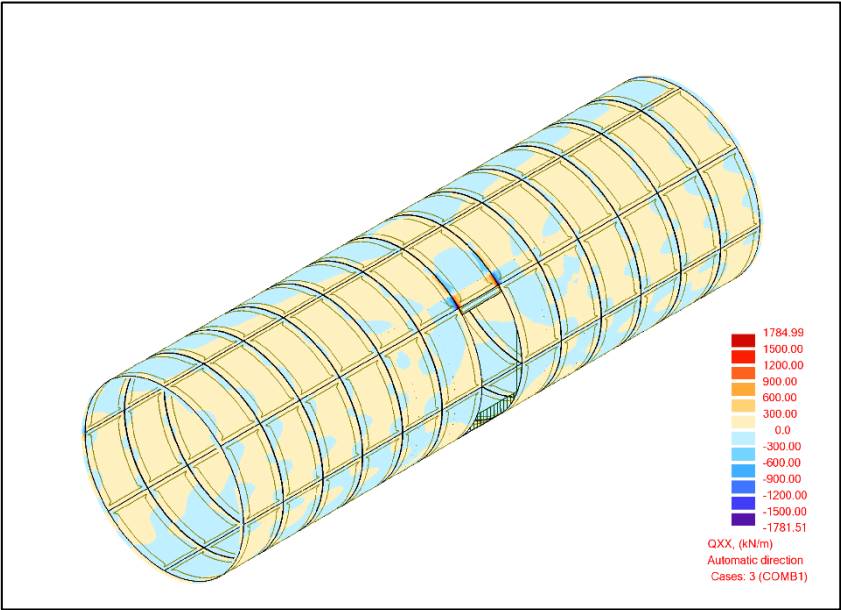
Momento Mxx:



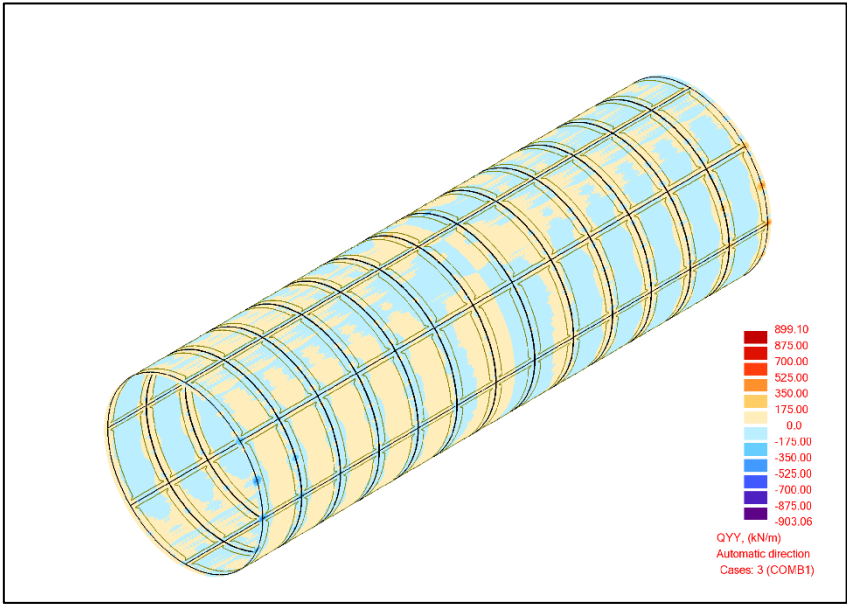
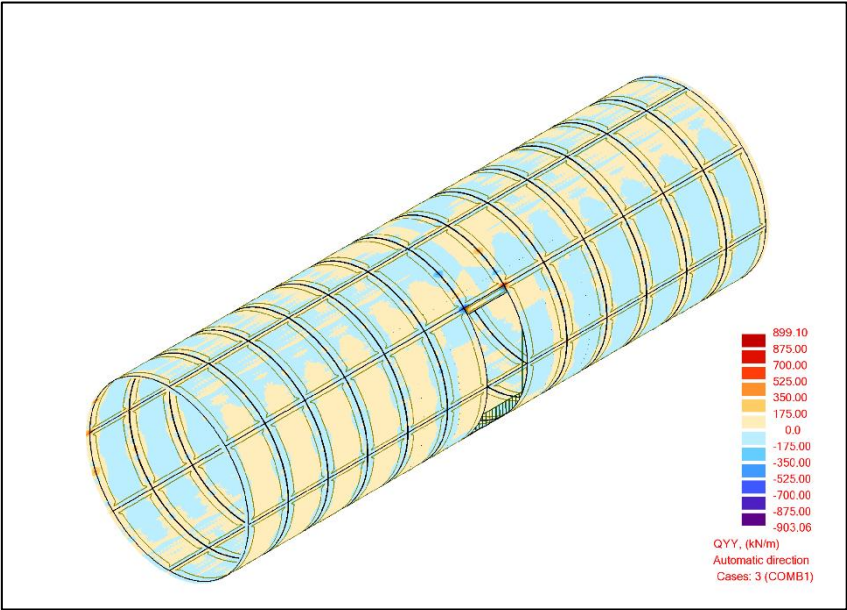
Momento Myy:



Taglio Qxx:



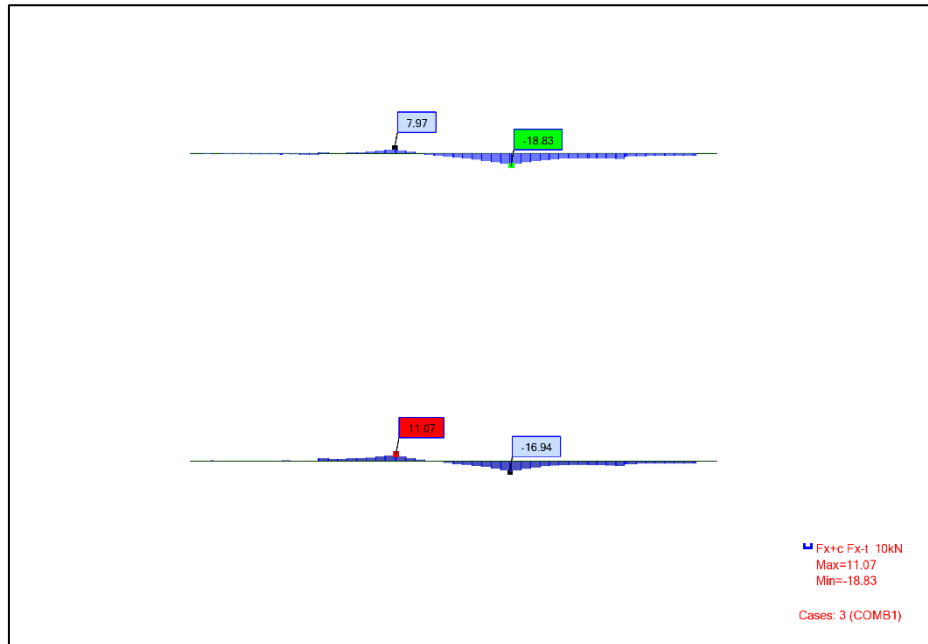
Taglio Qyy:



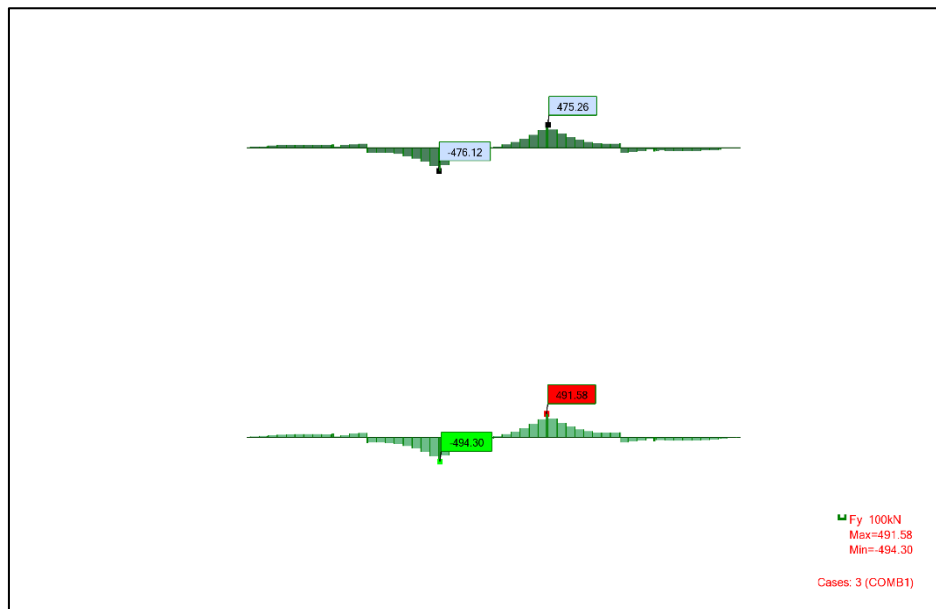
6.2 Struttura metallica temporanea

- Travi

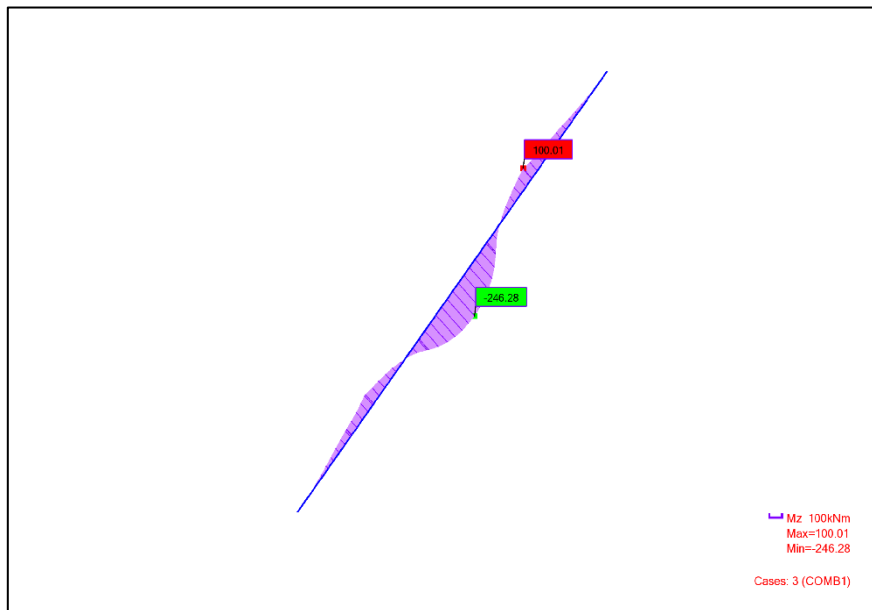
Forza assiale Fx:



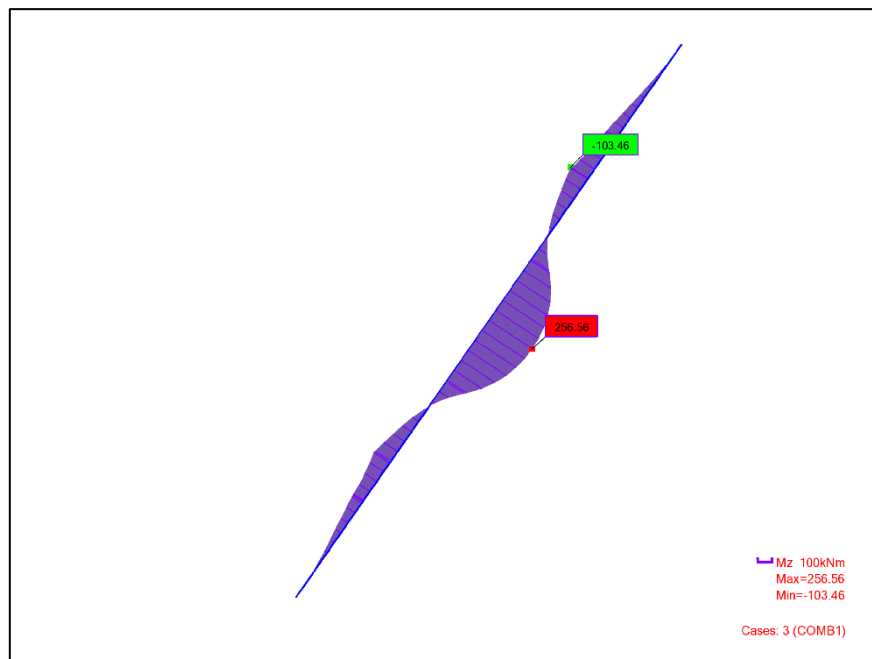
Taglio Fy:



Trave superiore: momento flettente

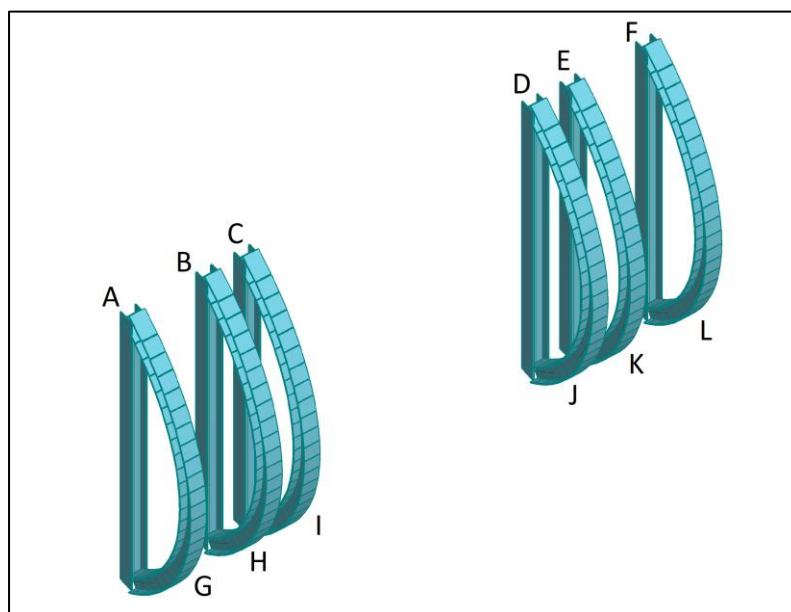


Trave inferiore: momento flettente



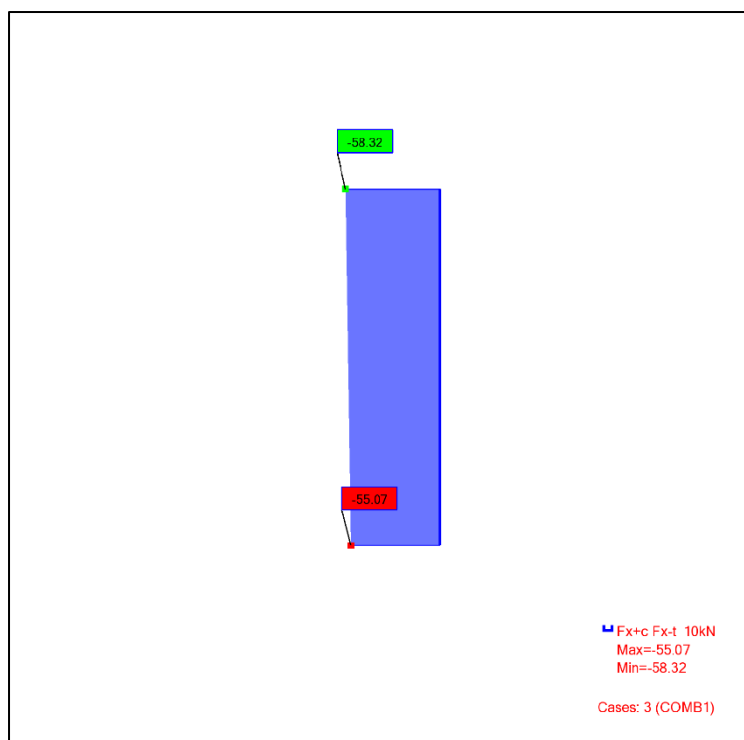
- Colonne

Ai fini della rappresentazione di risultati dell'analisi le colonne sono state nominate come nell'immagine di seguito:

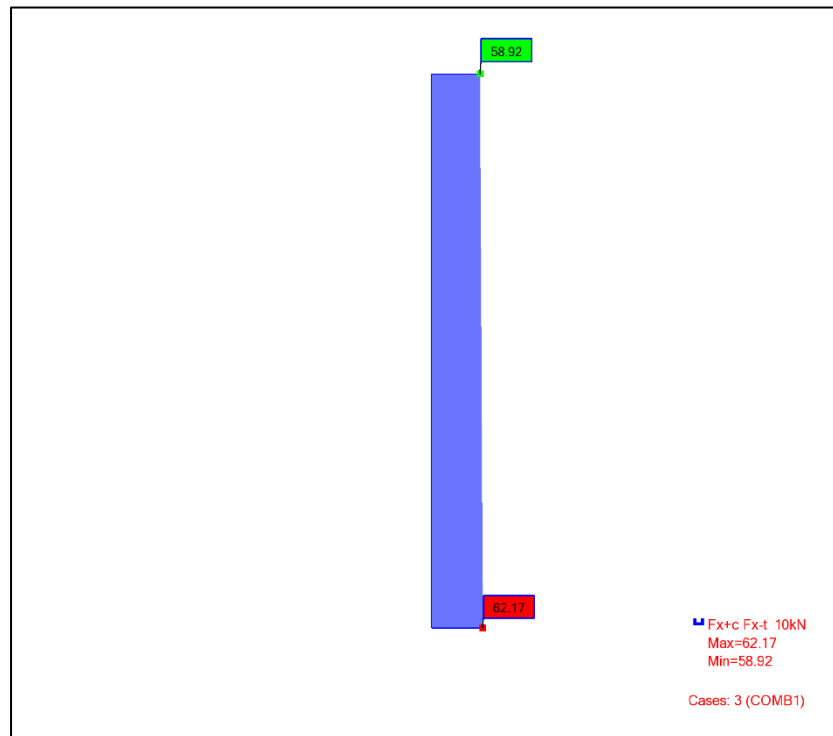


Le colonne si comportano come dei puntoni quindi si riportano solo i grafici della forza assiale.

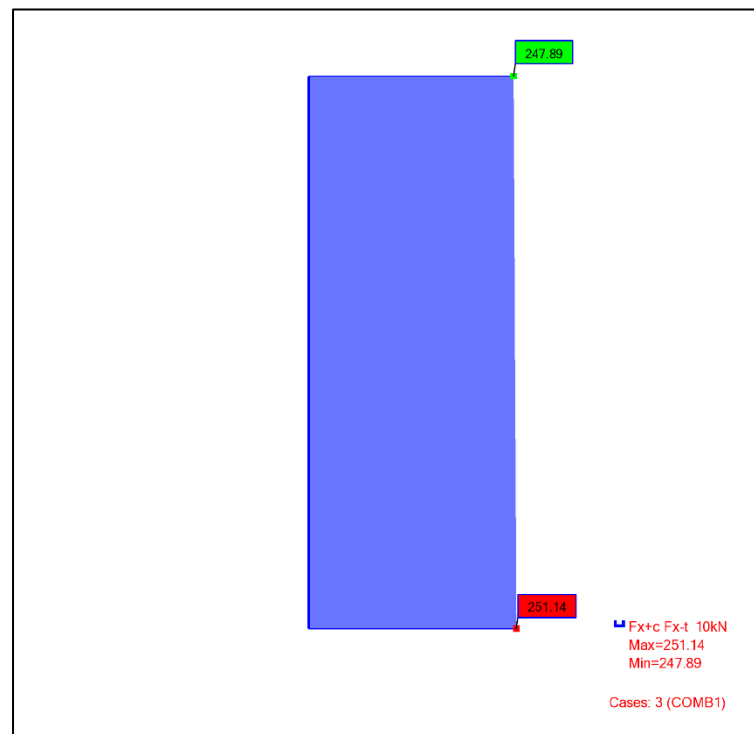
Colonna A:



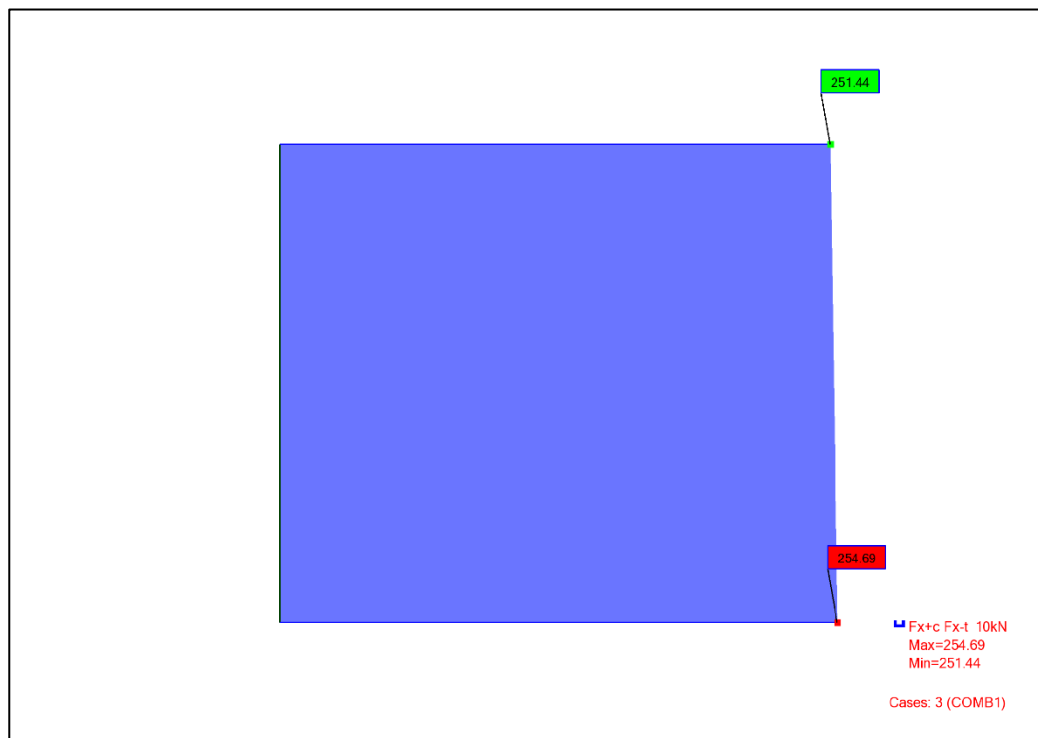
Colonna B:



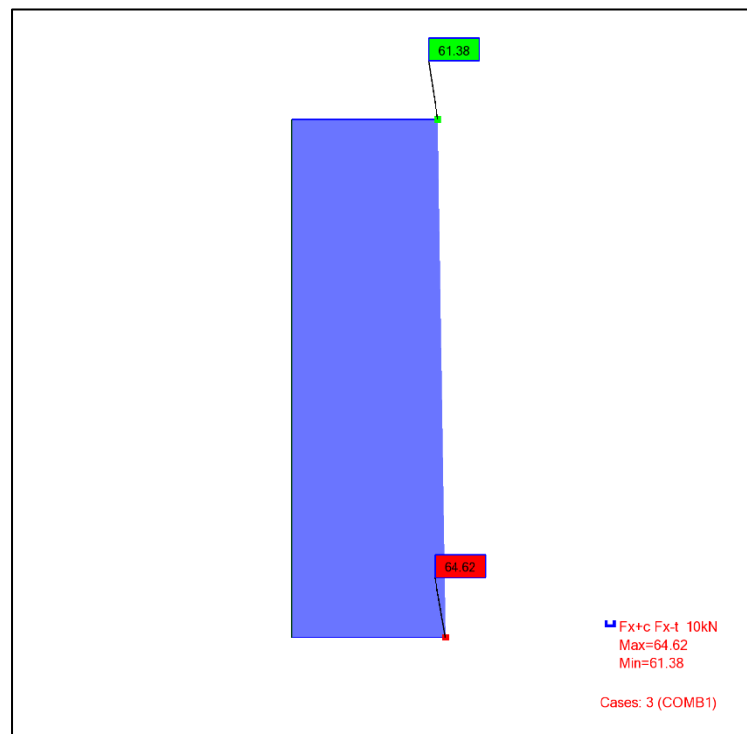
Colonna C:



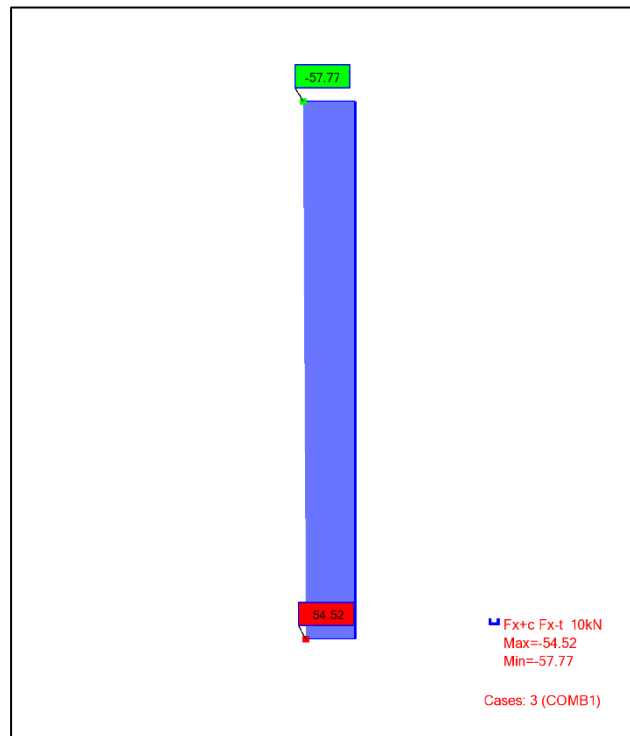
Colonna D:



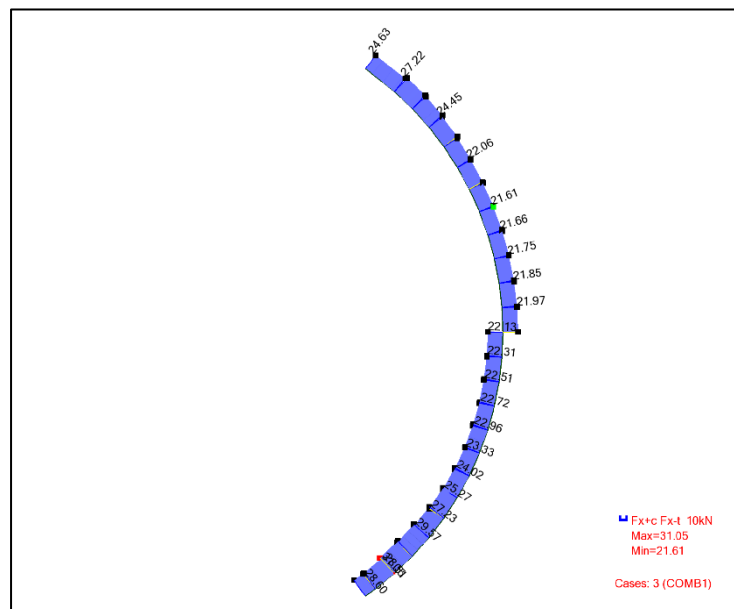
Colonna E:



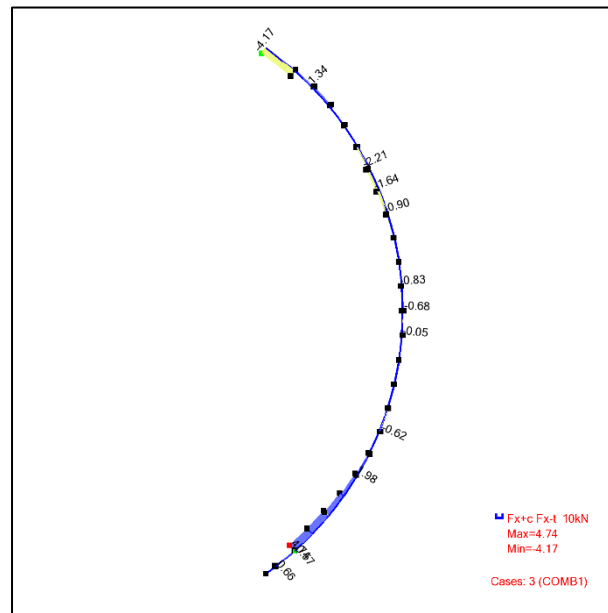
Colonna F:



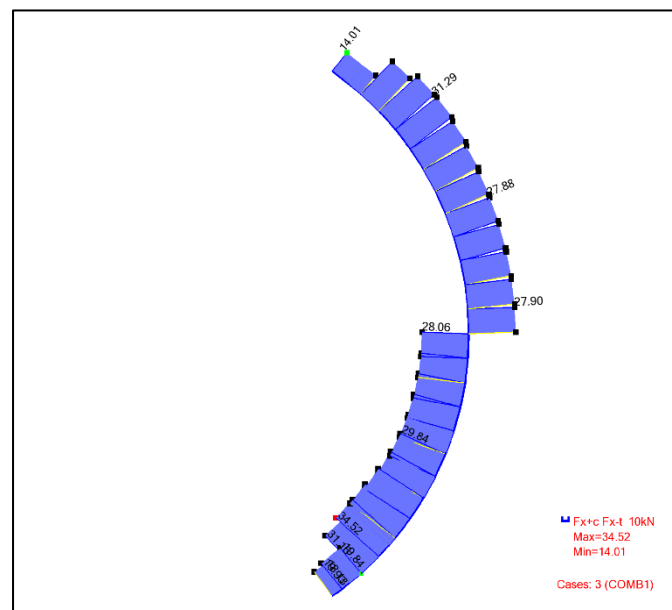
Colonna G:



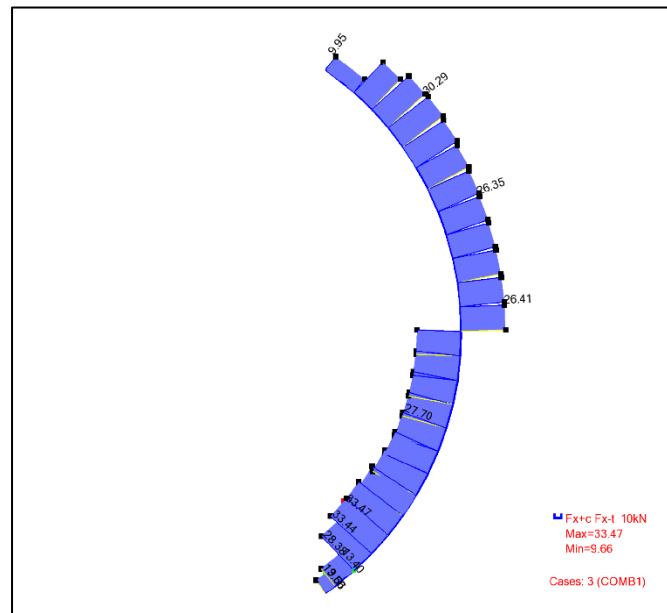
Colonna H:



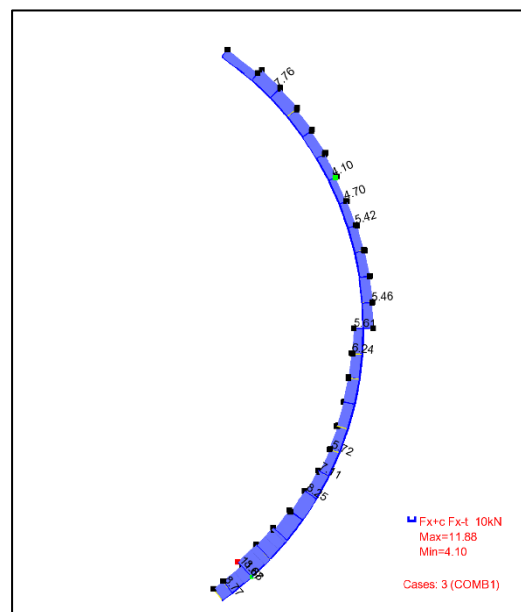
Colonna I:



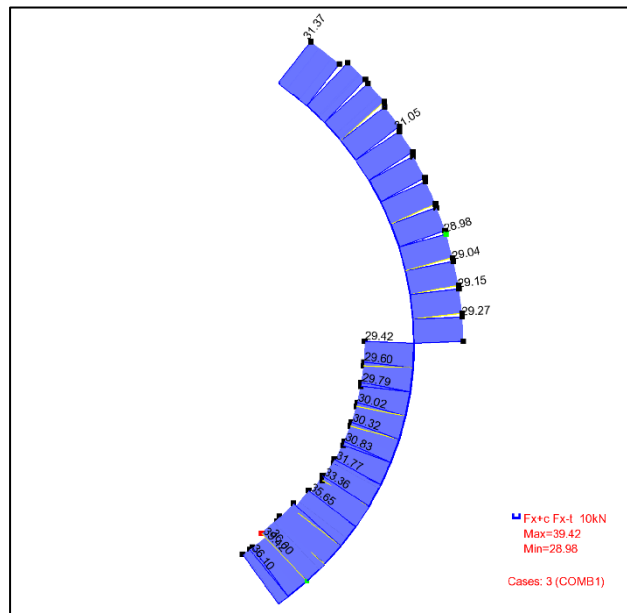
Colonna J:



Colonna K:



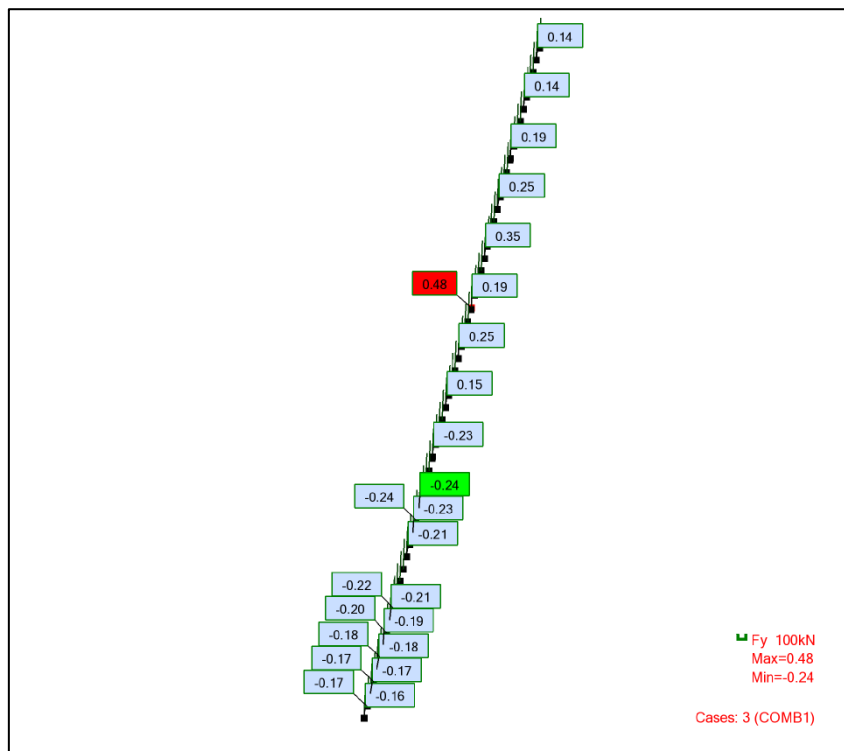
Colonna L:



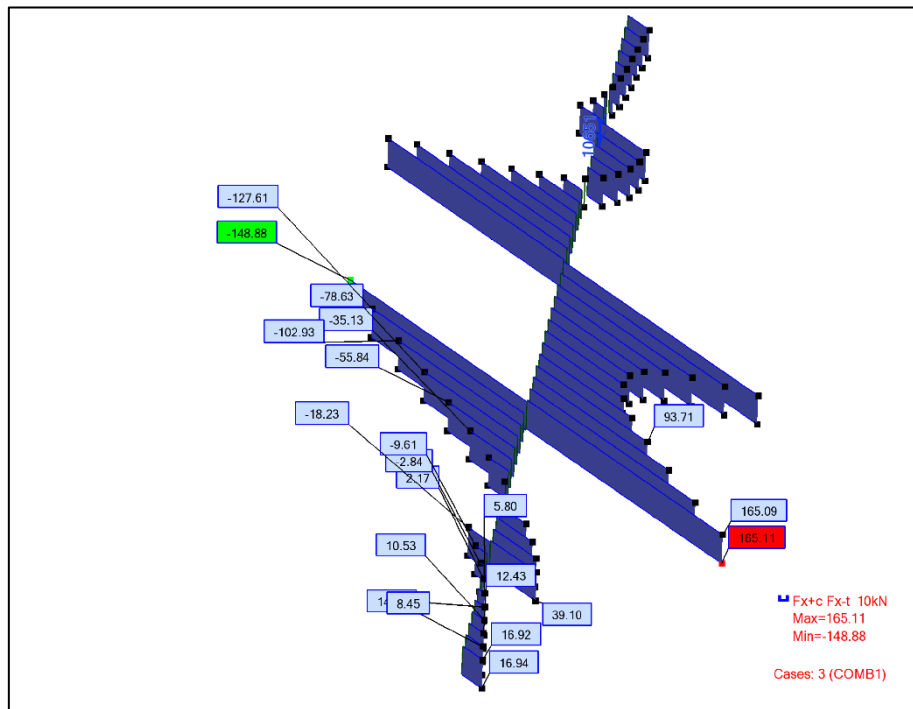
6.3 Connessioni struttura metallica

- Connessioni tra la trave superiore e il rivestimento della galleria: queste connessioni trasmettono solo forza assiale e taglio.

Taglio:

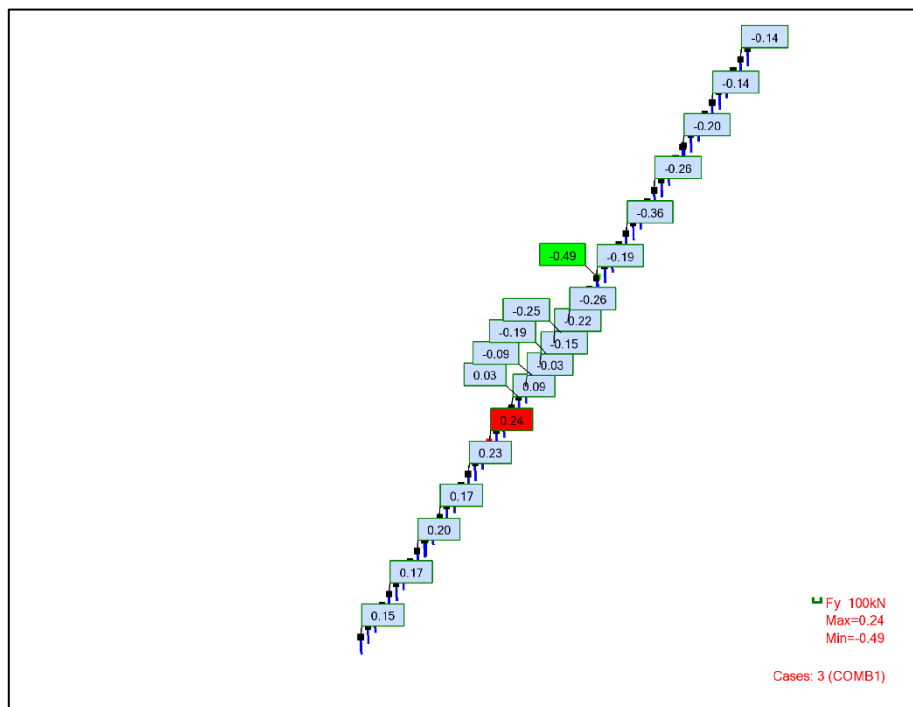


Forza assiale:

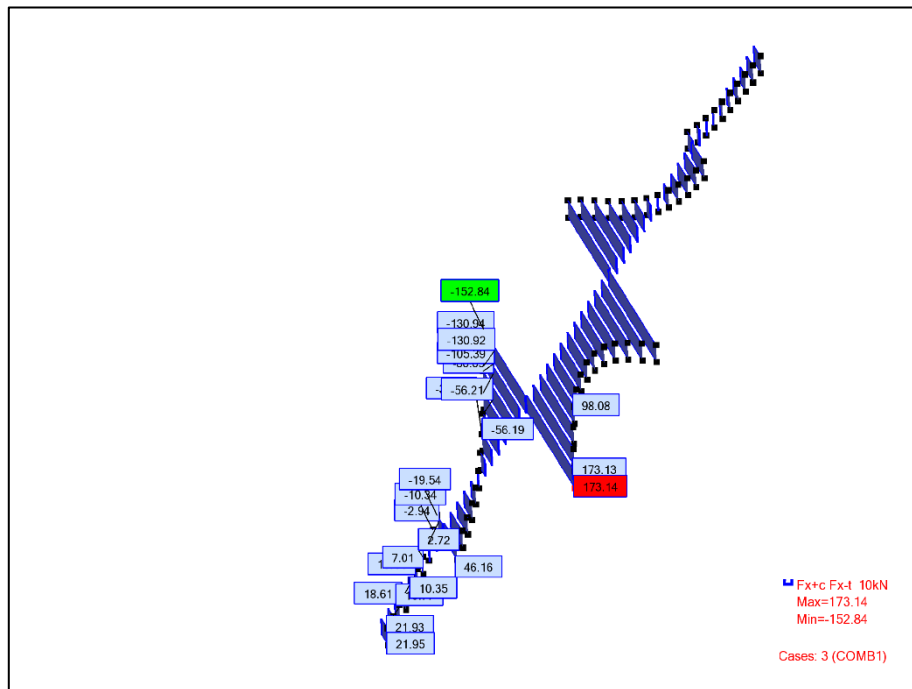


- Connessioni tra la trave inferiore e il rivestimento della galleria: queste connessioni trasmettono solo forza assiale e taglio.

Taglio:

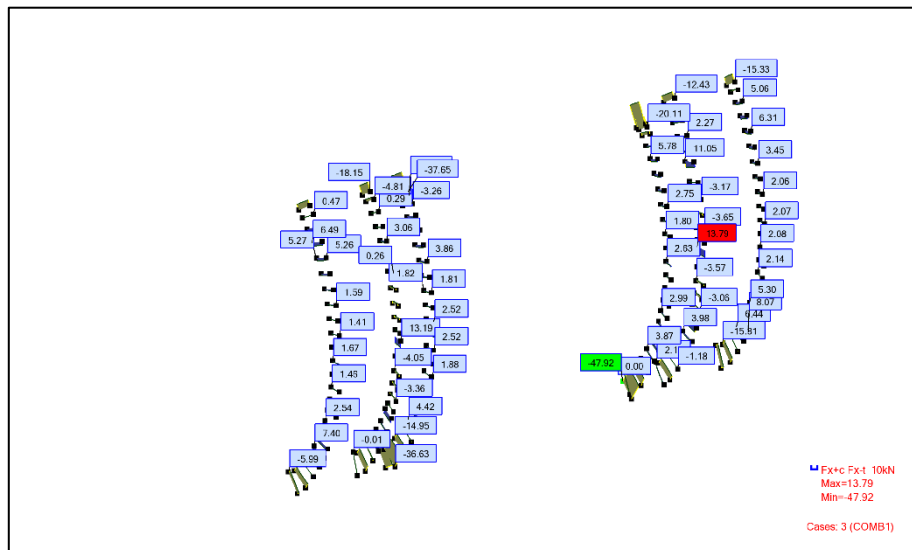


Forza assiale:



- Connessioni tra le travi curvilinee e il rivestimento della galleria: di seguito sono riportata la forza assiale ma è da tenere in mente che queste connessioni lavorano solo a compressione.

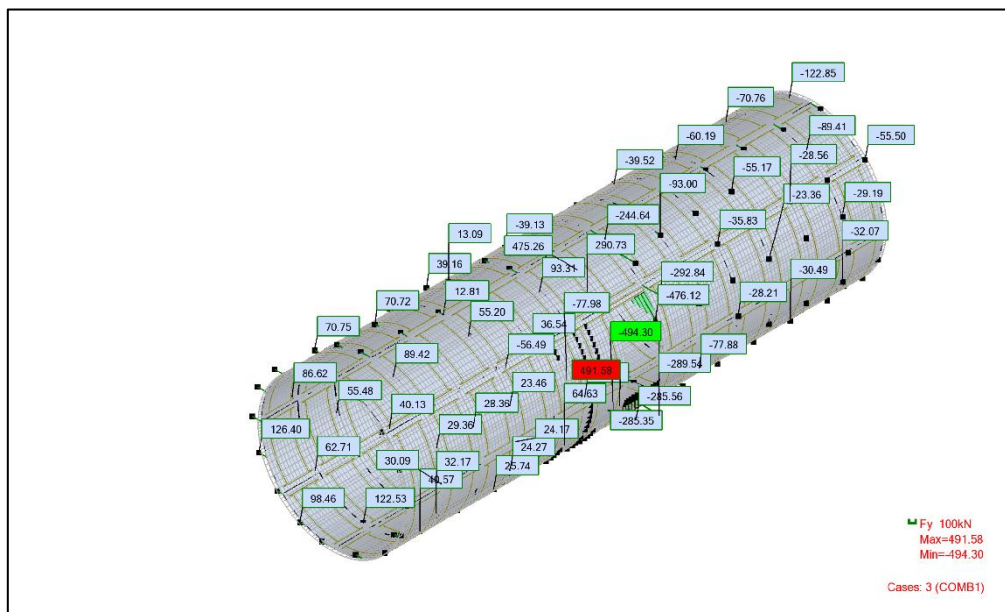
Forza assiale:



6.4 Connettori Dowel

I connettori Dowel trasmettono solo il taglio.

Taglio:



Nel capitolo 5.1 è descritto il comportamento di questi elementi, in particolare dal grafico Taglio – Spostamento si nota che il taglio massimo che l'elemento può raggiungere è 140kN. Dai risultati dell'analisi risulta che i connettori posizionati tra gli anelli interessati dall'apertura sono sollecitati da una forza tagliante di quasi 500 kN, è chiaro quindi che con una forza sollecitante di questo tipo il connettore collaserebbe. Si ricorda, però, che in questo modello non è stato preso in considerazione l'attrito tra gli anelli. Se si tenesse in conto l'attrito, la forza tagliante si distribuirebbe in un altro modo e questi elementi sarebbero molto meno sollecitati.

7 BIM e interoperabilità applicati al progetto

Il modello usato in questo lavoro è stato interamente creato su Robot, quindi non sono stati utilizzate le funzionalità che questo nuovo tipo di progettazione, BIM, mette a disposizione.

L'aspetto del BIM che è interessante applicare a questo progetto è l'interoperabilità tra software di modellazione architettonica e software di analisi strutturale. In questo caso si parla di interoperabilità tra AUTODESK REVIT e AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS. In un classico iter progettuale il passaggio da un software all'altro avviene due volte. Si modella la struttura nel programma di modellazione architettonica e il modello completo viene trasferito al programma di analisi per lo studio strutturale, questo è il primo passaggio. Completata l'analisi e la verifica della struttura avviene il secondo passaggio, il modello viene trasferito nuovamente nel software di modellazione architettonica per passare alla creazione e gestione delle carpenterie, ricavare gli abachi contenenti le informazioni sulla struttura che possono essere utilizzate per esempio per i computi metrici, passare il modello ad ulteriori software che si occupano di analisi energetiche, gestione del cantiere, gestione dell'edificio etc. Tornando a questo particolare lavoro, il modello che è stato creato, ben definito in tutti i suoi elementi, risulta perfettamente utilizzabile per la creazione e gestione delle carpenterie con il software AUTODESK REVIT STRUCTURE. Esiste, infatti, un'applicazione specifica che permette il passaggio del modello da un software all'altro.

Tenendo conto delle considerazioni iniziali che sono state fatte all'inizio del lavoro, è risultato più semplice disegnare il modello partendo da un elemento disegnato su AUTOCAD e proseguire direttamente sul software di calcolo.

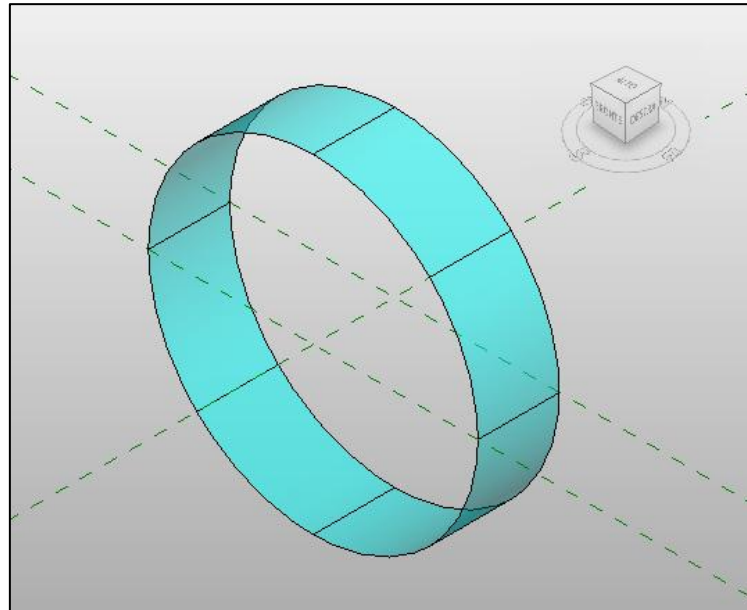
Ma se si volesse partire da un modello architettonico creato su REVIT una strada da seguire esiste.

Partiamo dal presupposto che per utilizzare l'integrazione REVIT – ROBOT è necessario che nel modello architettonico esista un modello analitico perché è quello che viene poi trasferito.

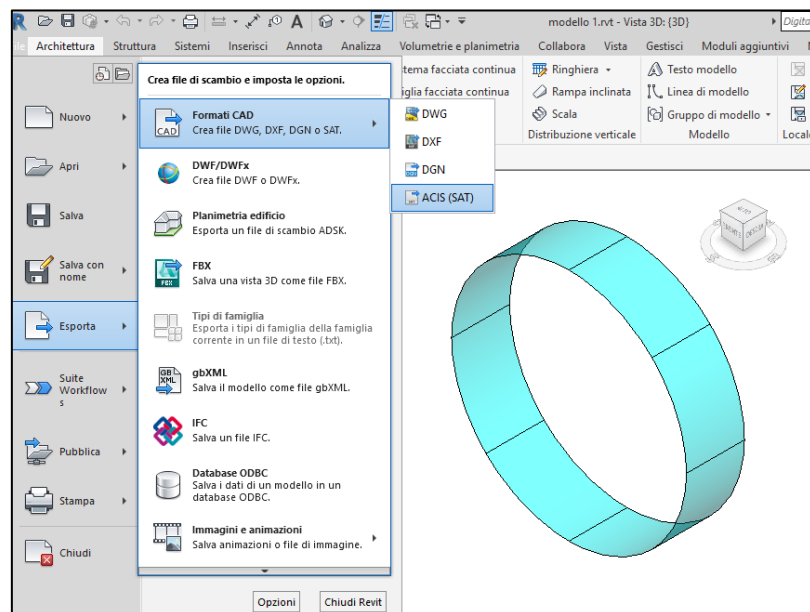
Le travi possono essere disegnate su REVIT senza difficoltà. Si caricano le famiglie delle travi con i profili di cui è composta la struttura e si disegnano gli elementi con il comando diretto *trave* della sezione strutturale. Per le travi viene automaticamente creato nel modello analitico un elemento monodimensionale nella posizione dell'asse della trave.

È, invece, più complicato modellare la galleria. In questo caso non si sono potuti utilizzare gli strumenti diretti che REVIT mette a disposizione come muro strutturale, pavimento o tetto. Si può, però, seguire il seguente procedimento:

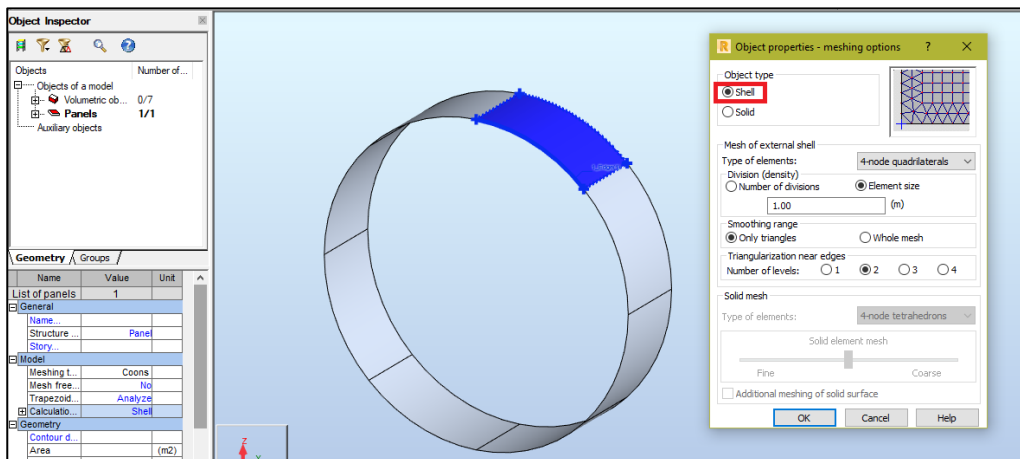
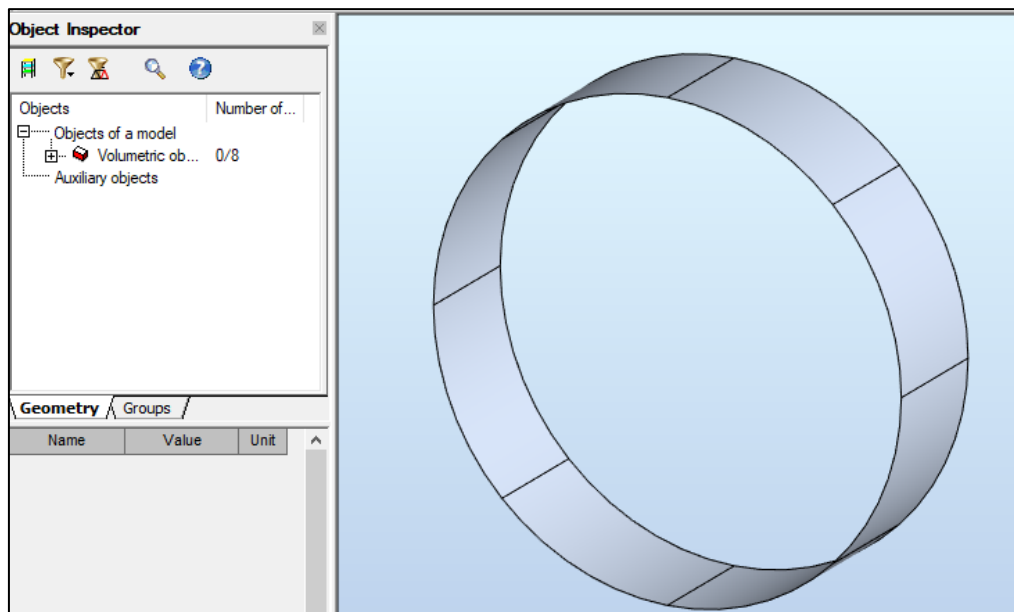
- Si crea una nuova famiglia di massa concettuale: si impostano due piani di lavoro paralleli a distanza corrispondente alla larghezza dell'anello, 1.6 m. Nei due piani si disegna l'arco corrispondente al lato di un concio e si fa un'estrusione, in questo modo si è ricavato un concio. Il concio viene copiato e specchiato finché non si completa l'anello.



- Si carica la famiglia in un nuovo progetto. Dal progetto si esporta l'elemento come file .sat



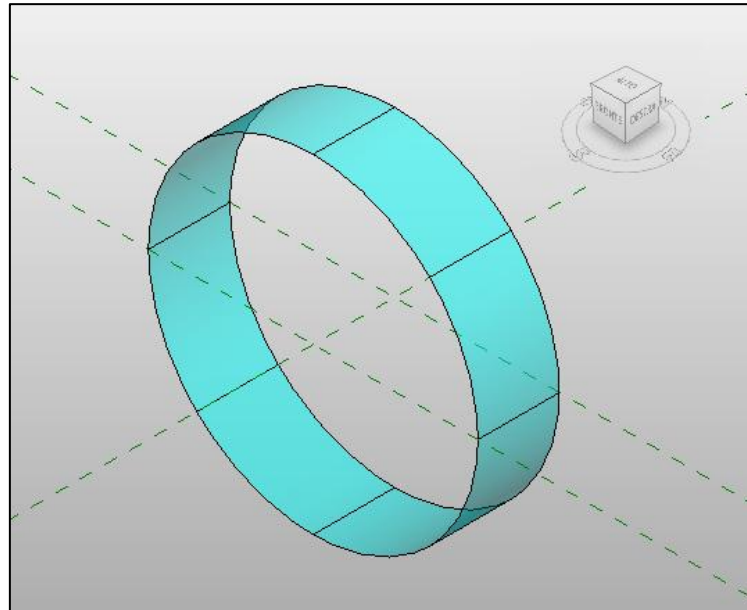
- Su un progetto nuovo di ROBOT si apre il file .sat tramite il comando *open*. Si ricava un modello di anello composto da otto elementi di volume con una sola faccia. Aprendo il pannello delle proprietà di questi elementi è possibile cambiare la natura dell'elemento e trasformarlo in shell.



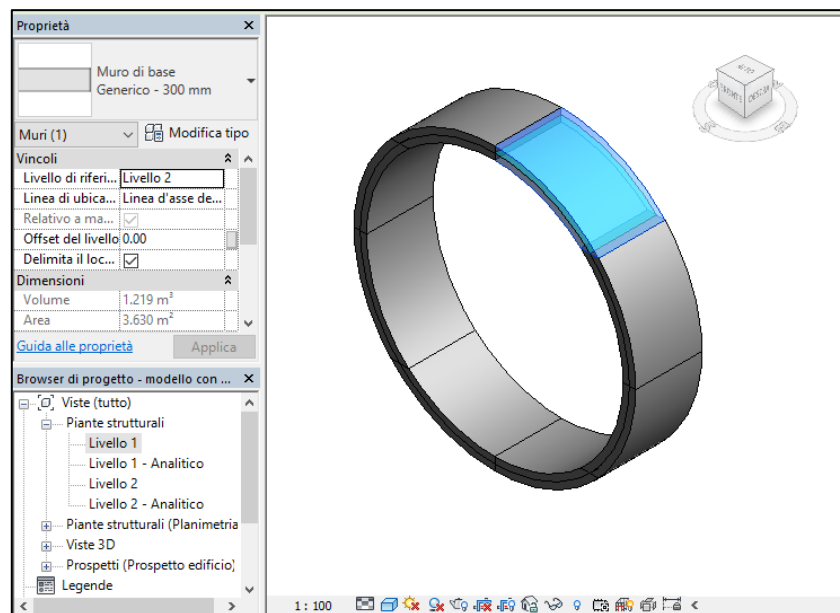
- Si riesce, quindi, ad arrivare al modello dell'anello composto da 8 pannelli, esattamente come quelli del modello utilizzati nell'analisi, a cui può essere assegnato uno spessore, applicato un carico, etc.

Oppure si può seguire un'altra strada:

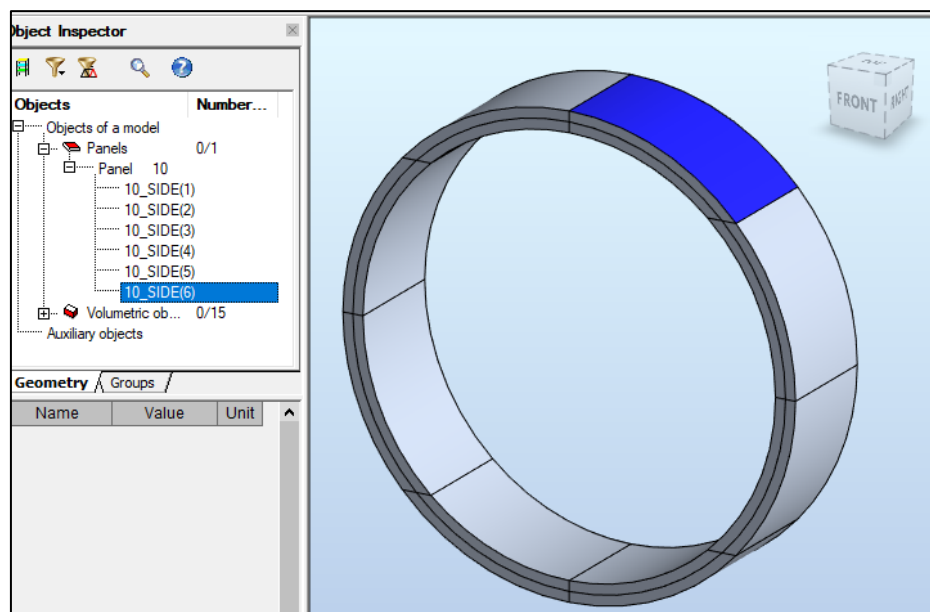
- Si crea una nuova famiglia di massa concettuale: si impostano due piani di lavoro paralleli a distanza corrispondente alla larghezza dell'anello, 1.6 m. Nei due piani si disegna l'arco corrispondente al lato di un concio e si fa un'estrusione, in questo modo si è ricavato un concio. Il concio viene copiato e specchiato finché non si completa l'anello.



- Si carica la famiglia in un nuovo progetto. Nel progetto si crea una famiglia di muro a cui vengono date le proprietà del concio. Si estrude il muro dalla massa concettuale



- Si esporta questo modello come file .sat e si apre su ROBOT. In questo caso viene aperto un modello di anello formato da 8 elementi volumetrici con 10 facce ciascuno. Utilizzando lo stesso procedimento di prima per trasformare l'elemento volumetrico in pannello si riesce solo a creare un pannello per ogni faccia.



Da queste prove sembra che il procedimento più corretto da seguire sia il primo.

8 Conclusioni e sviluppi futuri

In conclusione, questo lavoro di tesi è servito al candidato per acquisire conoscenze riguardo l'uso di un software di calcolo in partenza sconosciuto. Nonostante la struttura complicata si è arrivati alla creazione di un modello ben definito in tutti i suoi elementi, la cui analisi risulta veritiera e coerente con modelli precedentemente creati con altri software di calcolo strutturale.

L'impiego del software Autodesk Robot Analysis per affrontare questo specifico caso progettuale complesso ha evidenziato alcune problematiche di seguito descritte:

- assenza di elementi di contatto/collegamento che simulino l'attrito tra due superfici. Questo aspetto risulta di rilevante importanza, poiché non è possibile dissipare le azioni tangenziali che si manifestano da concio e concio e tale sollecitazione si distribuisce totalmente sui connettori (dowel) che, pertanto, risultano maggiormente caricati;
- assenza di elementi di collegamento a comportamento non lineare (solo compressione / solo trazione). La proprietà di un elemento denominata "*truss bar/compression bar*", è stata impiegata in altri casi più semplici senza riscontrare problematiche e mostrando un comportamento corretto. Invece, applicata in questa complessa modellazione ha fatto riscontrare problemi di convergenza del modello che ne hanno sconsigliato l'utilizzo.

Si è giunti a tali conclusioni mediante il confronto con analisi similari sviluppate con altri software. Pertanto, a seguito di quanto verificato in questo lavoro di tesi, è possibile affermare che il software impiegato risulta versatile e con un'impostazione "*user friendly*", ma non sviluppato principalmente per affrontare questo genere di modellazioni complesse. Per questo motivo, si consiglia di utilizzare software più completi che possano gestire anche elementi a comportamento non lineare.

È Inoltre possibile approfondire questo studio inserendo altre due fasi costruttive:

Fase 4: Creazione del collare permanente in cemento armato

Fase 5: Rimozione della struttura metallica temporanea

In questo modo si riuscirebbe ad avere un'analisi completa di tutte le fasi costruttive che realmente interessano questo tipo di intersezione tra tunnel.

L'approccio alla soluzione di codesta problematica progettuale potrebbe anche essere affrontato sviluppando le travi superiori e inferiori della struttura provvisoria con elementi tridimensionali. Sebbene tale procedimento renda ancor più complessa la modellazione, consente di cogliere un comportamento globale della struttura ancor più verosimile. Tale approccio però implica il rifacimento complessivo del modello strutturale nel software dedicato, perdendo completamente l'interoperabilità e lo scambio dati automatico, tipico dei processi BIM.

Per quanto riguarda l'interoperabilità tra software diversi, si è potuto riscontrare un ottimo interscambio dati tra Autodesk Revit Structure e Autodesk Robot Analysis per quanto riguarda l'aspetto delle carpenterie. Si verificano invece alcune lacune nel caso in cui il progetto diventi complesso (come in questo caso), poiché tutti gli elementi di contatto e collegamento devono essere inseriti manualmente, non essendo realmente presenti nel progetto. Questo aspetto merita alcune considerazioni:

stimola l'operatore a pensare nei minimi particolari a come realizzare il reale comportamento della struttura ed a quali elementi impiegare per raggiungere tale obiettivo;

l'assenza degli elementi di contatto nel modello delle carpenterie ha come diretta conseguenza la creazione di un modello con un numero ed una disposizione di nodi inadeguata. Ciò impone una correzione, che in alcuni casi diventa rifacimento, dal modello per poterlo adattare a quanto descritto precedentemente.

È possibile quindi concludere che non sempre la metodologia BIM risulta semplicemente ed automaticamente applicabile alla modellazione strutturale: ad una crescente complessità dei modelli di calcolo si riscontra che l'importazione pura e semplice del modello dai programmi architettonici non è sempre applicabile, questo più che un limite dell'approccio BIM dovrebbe essere considerata come una sfida futura che porti verso un'interoperabilità sempre più spinta. Il programma di calcolo scelto, certamente valido per strutture più semplici, non permetteva l'inserimento di alcuni elementi necessari per un calcolo più corretto, bisogna ancora affinare i software al fine di consentire l'utilizzo del processo BIM che ad oggi rappresenta, da un punto di vista concettuale, la migliore simulazione della realtà, è un processo che non disegna l'elemento ma lo costruisce pur se virtualmente. In questa ottica si potrebbe indagare ulteriormente sullo sviluppo della complessa progettazione dell'intersezione in sotterraneo con l'approccio BIM partendo dalle indicazioni suggerite nel capitolo 7 di questo elaborato per creare un modello che rispecchi le proprietà di questo diverso tipo di progettazione. In particolare, capire se AUTODESK REVIT e AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS sono i corretti software da utilizzare per questo lavoro o se ne esistono altri che permettono la creazione di un modello BIM, utilizzabile per il calcolo strutturale, in modo più semplice e diretto.

9 Bibliografia e Sitografia

AA.VV. curato da Osello A., *BIM GIS AR per il Facility Management*, Palermo, Dario Flaccovio Editore, 2015

Peila Daniele, *Tunneling*, materiale didattico per le lezioni

Tanzini M., *Scavo meccanizzato di opere sotterranee e gallerie*, Dario Flaccovio Editore

<https://cityrailways.com/tecniche-costruttive-per-gallerie-in-ambito-urbano/>

[https://it.wikipedia.org/wiki/Galleria_\(ingegneria\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Galleria_(ingegneria))

<http://diectad.unipv.it/corsi/PdIV/11%20-%20Gallerie%20-%20tecnologie%20di%20scavo%20in%20terreni%20incoerenti.pdf>

<https://www.acca.it/bim-building-information-modeling>