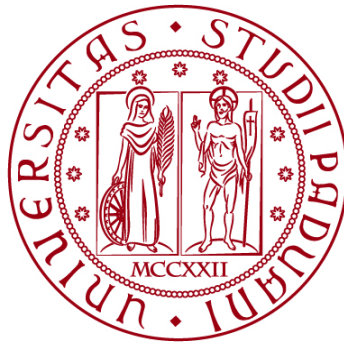


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE
Department Of Civil, Environmental and Architectural Engineering

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile - Curriculum Strutture



TESI DI LAUREA

**Modellazione parametrica in ambiente BIM integrato con
analisi FEM di superfici complesse: test sul progetto di
una Pista da Bob**

Relatore:

Prof. Carlo Zanchetta

Correlatori:

Prof.ssa Francesca da Porto

Ing. Phd. Giovanni Tecchio

Laureanda:

Benedetta Cicioni

ANNO ACCADEMICO 2024-2025

SOMMARIO

ABSTRACT	1
INTRODUZIONE	3
CAPITOLO PRIMO MODELLAZIONE PARAMETRICA E ANALISI STRUTTURALE: PRINCIPI E STRUMENTI	5
1 INTRODUZIONE AL BUILDING INFORMATION MODELING	5
1.1 <i>Genesi e principi del BIM</i>	5
1.2 <i>Applicazione del BIM nel settore delle costruzioni: Autodesk Revit</i>	10
2 PARAMETRIZZAZIONE DEI MODELLI BIM	22
2.1 <i>Dynamo per revit: automazione e modellazione avanzata</i>	23
3 INTRODUZIONE ALL'ANALISI STRUTTURALE FEM	35
3.1 <i>Midas Civil: software per l'analisi strutturale avanzata</i>	35
CAPITOLO SECONDO STRATEGIE E METODI PER L'AUTOMAZIONE DI MODELLI DI SUPERFICI COMPLESSE	41
1 LIMITI E CRITICITÀ NELLA MODELLAZIONE BIM E FEM	41
2 STRATEGIE PER L'AUTOMAZIONE E LA PARAMETRIZZAZIONE DEI MODELLI	42
3 METODOLOGIA PER LA GENERAZIONE AUTOMATIZZATA DEI MODELLI BIM E FEM	43
CAPITOLO TERZO TEST SUL PROGETTO DI UNA PISTA DA BOB	47
1 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO	47
1.1 <i>Storia dello sport</i>	48
1.2 <i>Architettura delle piste e caratteristiche del Bob</i>	49
1.3 <i>Progetto per Milano-Cortina</i>	53
1.4 <i>Curva Cristallo</i>	62
2 MODELLO BIM PARAMETRICO DELLA CURVA CRISTALLO	74
2.1 <i>Sezione geometrica</i>	74
2.2 <i>Armature</i>	85
2.3 <i>Impianti</i>	100
3 ANALISI FEM DELLA CURVA CRISTALLO	105
3.1 <i>Costruzione del modello</i>	105
3.2 <i>Moto del Bob</i>	111
3.3 <i>Applicazione dei carichi</i>	118
3.4 <i>Risultati dell'Analisi FEM</i>	125
CAPITOLO QUARTO ANALISI CRITICA DEI RISULTATI OTTENUTI DALLA PARAMETRIZZAZIONE DEI MODELLI	143
CAPITOLO QUINTO CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	147
1 CONCLUSIONI	147
2 SVILUPPI FUTURI	148
BIBLIOGRAFIA	149
INDICE DELLE TABELLE	155
INDICE ICONOGRAFICO	157

L'evoluzione del progetto architettonico e strutturale verso modelli sempre più complessi richiede strumenti in grado di garantire efficienza, flessibilità e rapidità operativa. Il tradizionale approccio manuale, ancora ampiamente utilizzato, presenta diverse criticità: ripetitività nella modellazione, scarsa reattività alle modifiche, mancanza di interoperabilità tra modelli BIM e FEM e difficoltà nella gestione impiantistica. Queste problematiche rallentano i flussi di lavoro, riducono l'affidabilità del modello e ostacolano l'esplorazione di alternative progettuali, limitando l'ottimizzazione e l'innovazione.

Questa tesi propone un metodo per la parametrizzazione del modello BIM mediante l'uso di script Dynamo, con l'obiettivo di automatizzare le fasi di modellazione, aggiornamento e trasferimento verso l'ambiente FEM. A supporto dello studio è stato sviluppato un caso applicativo reale: una pista da bob, di cui è stato modellato un tratto in ambiente BIM e successivamente analizzato strutturalmente in ambiente FEM.

Il lavoro si articola in due macrofasi. Nella **prima fase**, è stato costruito un modello parametrico BIM di una porzione del corpo pista, comprendente la sezione in calcestruzzo, le armature e gli impianti. L'utilizzo di Dynamo ha permesso di definire input univoci e parametri base in grado di governare la geometria attraverso un numero minimo di variabili, garantendo la rigenerazione automatica del modello in caso di modifiche. La possibilità di collegare gli input a fogli Excel esterni ha ulteriormente ottimizzato la gestione, facilitando l'integrazione collaborativa e l'aggiornamento dei dati senza necessità di intervenire direttamente sul codice. L'integrazione di controlli logici all'interno degli script ha consentito inoltre la verifica automatica della coerenza dei dati e il rispetto di vincoli progettuali.

Nella **seconda fase**, il modello BIM è stato tradotto in ambiente FEM tramite ulteriori script, che hanno incluso anche la sottostruttura. È stata così generata automaticamente una mesh coerente con la geometria dell'opera, riducendo i tempi normalmente richiesti per la preparazione del modello di calcolo. L'analisi strutturale si è concentrata sul comportamento della curva soggetta a differenti forzanti dinamiche.

Lo studio dimostra come l'adozione di un approccio parametrico consenta di superare i limiti dei metodi tradizionali, migliorando la qualità del modello, l'interoperabilità tra discipline e la rapidità nelle fasi iterative. In un contesto progettuale sempre più orientato alla sostenibilità e all'efficienza, l'automazione dei flussi BIM–FEM rappresenta una soluzione utile per affrontare la complessità e supportare un processo decisionale più agile e consapevole.

The evolution of architectural and structural design towards increasingly complex models requires tools that can guarantee efficiency, flexibility, and operational speed. The traditional manual approach, still widely used, has several critical issues: repetitiveness in modeling, poor responsiveness to changes, lack of interoperability between BIM and FEM models, and difficulties in plant management. These issues slow down workflows, reduce model reliability, and hinder the exploration of design alternatives, limiting optimization and innovation.

This thesis proposes a method for parameterizing the BIM model using Dynamo scripts, with the aim of automating the modeling, updating, and transfer phases to the FEM environment. To support the study, a real-world application case was developed: a bobsleigh track, a section of which was modeled in a BIM environment and then structurally analyzed in an FEM environment.

The work is divided into two macro phases. In the **first phase**, a parametric BIM model of a portion of the track body was constructed, including the concrete section, reinforcement, and systems. The use of Dynamo made it possible to define unique inputs and basic parameters capable of governing the geometry through a minimum number of variables, ensuring automatic regeneration of the model in case of changes. The ability to link inputs to external Excel sheets further optimized management, facilitating collaborative integration and data updating without the need to intervene directly on the code. The integration of logical controls within the scripts also allowed for automatic verification of data consistency and compliance with design constraints.

In the **second phase**, the BIM model was translated into the FEM environment using additional scripts, which also included the substructure. This automatically generated a mesh consistent with the geometry of the structure, reducing the time normally required to prepare the calculation model. The structural analysis focused on the behavior of the curve under different dynamic forces.

The study demonstrates how the adoption of a parametric approach allows the limitations of traditional methods to be overcome, improving model quality, interoperability between disciplines, and speed in iterative phases. In a design context increasingly oriented towards sustainability and efficiency, the automation of BIM–FEM flows represents a useful solution for addressing complexity and supporting a more agile and informed decision-making process.

Negli ultimi anni, la crescente complessità dei progetti architettonici e infrastrutturali ha reso necessario il passaggio da una gestione tradizionale a metodi digitali più efficienti e integrati. In particolare, la progettazione parametrica e l'interoperabilità tra ambiente BIM (Building Information Modeling) e FEM (Finite Element Method) rappresentano oggi elementi chiave per affrontare le sfide legate alla modellazione di strutture articolate, soggette a frequenti modifiche e caratterizzate da una forte interdipendenza tra le discipline coinvolte.

Questa tesi si propone di esplorare un metodo di modellazione automatizzata tramite script Dynamo in ambiente Revit, con l'obiettivo di creare un modello BIM parametrico in grado di adattarsi dinamicamente alle variazioni progettuali. Gli script sviluppati si basano su parametri di input organizzati in file Excel esterni, così da consentire un aggiornamento centralizzato e veloce del modello. Ciò garantisce una gestione più flessibile, efficiente e affidabile dell'intero processo di modellazione.

Come caso studio è stato analizzato un tratto della pista da bob, scelto per la sua rappresentatività e complessità. L'analisi di questa porzione ha consentito di sviluppare e testare uno schema di script applicabile all'intero tracciato, creando una base flessibile e ampliabile in funzione delle future esigenze progettuali. In particolare, si è affrontata la modellazione della geometria, delle armature e degli impianti. Questi ultimi sono stati pensati per adattarsi e vincolarsi direttamente alla geometria, così che ogni modifica del tracciato si rifletta automaticamente anche sulle componenti interne. In questo modo, si ottiene un sistema di modellazione completamente integrato, dove ogni parte del modello si aggiorna in funzione a degli input.

La logica sottesa alla modellazione parametrica consente inoltre un controllo preciso e coerente del progetto, permettendo la sperimentazione di soluzioni alternative in tempi ridotti. Tale caratteristica è particolarmente vantaggiosa in contesti in cui le decisioni devono essere supportate da simulazioni e verifiche multiple. Il sistema di script sviluppato, infatti, può essere facilmente modificato o ampliato per rispondere a nuove esigenze progettuali, rendendolo uno strumento scalabile e adattabile anche ad altri contesti infrastrutturali.

Una volta realizzato il modello BIM, si è proceduto alla costruzione del modello FEM. Grazie a uno script dedicato, è stata generata automaticamente la mesh degli elementi strutturali a partire dal modello parametrico, evitando così una lunga fase di ricostruzione manuale. Questa automatizzazione non solo ha ridotto i tempi complessivi di modellazione, ma ha anche migliorato la coerenza tra modello architettonico e modello strutturale, rendendo possibile condurre analisi dinamiche più accurate e affidabili. La rapidità con cui è possibile aggiornare il modello FEM a seguito di modifiche geometriche consente di avere sempre a

disposizione una versione aggiornata del sistema da analizzare, favorendo una progettazione iterativa più solida e informata.

Il modello FEM, costruito sia per il corpo pista che per la sottostruttura, è stato poi utilizzato per applicare diversi scenari di carico. In particolare, sono state messe a confronto le sollecitazioni indotte dal sisma con quelle generate dal passaggio del bob, con l'obiettivo di determinare quale condizione risulti più gravosa per la struttura. Questo confronto ha permesso di evidenziare le differenze tra le due tipologie di azione, fornendo indicazioni utili per la progettazione e la verifica di infrastrutture esposte a carichi dinamici significativi, sia accidentali che ambientali.

Nei capitoli successivi si illustrerà l'intero processo di implementazione, con particolare attenzione all'automazione della modellazione BIM. Verrà mostrato come l'integrazione di script Dynamo per tutte le componenti – geometrie, armature, impianti – rappresenti un approccio strategico per velocizzare il lavoro, ridurre gli errori e garantire un aggiornamento coerente dell'intero modello. L'obiettivo finale è quello di fornire un metodo scalabile, riutilizzabile ed efficiente per affrontare progetti infrastrutturali complessi, in cui l'automazione rappresenta un vantaggio competitivo concreto per la qualità e l'ottimizzazione del progetto.

MODELLAZIONE PARAMETRICA E ANALISI STRUTTURALE:

PRINCIPI E STRUMENTI

Il mondo della progettazione edilizia comporta il trasporto di un numero molto elevato di informazioni, molte discipline si vanno ad unire per realizzare un edificio o un'infrastruttura. Tutte le discipline interessate devono comunicare tra loro ed essere disponibili nel minor tempo possibile. Per queste motivazioni nella fase di progettazione architettonica e poi strutturale si vede la necessità di utilizzare modelli digitali che siano comprensibili, gestibili e ordinati.

Dal punto di vista architettonico da anni si è sviluppato e continua a progredire il mondo del BIM, *Building Information Modeling*. Il BIM è una modalità di progettazione collaborativa dal momento che permette l'integrazione in un solo modello di tutte quelle che risultano essere le informazioni fondamentali in tutte le fasi della progettazione, ovvero: quella strutturale, quella architettonica, quella gestionale, quella energetica e quella impiantistica.

Allo stesso modo nell'ambito della progettazione strutturale è diventato essenziale il Metodo agli Elementi Finiti (FEM, *Finite Element Method*). È uno strumento di calcolo che attraverso l'analisi numerica permette di determinare il comportamento strutturale di edifici, ponti e infrastrutture complesse.

Negli ultimi anni lo sviluppo di tali metodi sta vertendo verso una parametrizzazione e automatizzazione dei processi, questo permette di velocizzare la progettazione ed evitare alcuni ostacoli che si devono affrontare durante questo percorso.

Nel seguente capitolo si procede a presentare i modelli utilizzati nel corso della tesi.

1 INTRODUZIONE AL BUILDING INFORMATION MODELING

Il Building Information Modelling (BIM) è un metodo collaborativo per l'archiviazione, la condivisione, lo scambio e la gestione di informazioni multidisciplinari durante l'intero ciclo di vita di un progetto edilizio, comprese le fasi di pianificazione, progettazione, costruzione, operatività, manutenzione e demolizione (Eastman C. M. 2011).

1.1 Genesi e principi del BIM

Il modello BIM permette di prendere decisioni progettuali sempre più consapevoli perché, in modo semplificato, è un database con tutte le informazioni di un oggetto edilizio poste in un modo ordinato e comprensibile. Attualmente il BIM tocca tutte le figure interessate nel processo edilizio, entra sempre più in profondità coinvolgendo i produttori di materiali da

costruzione, i fornitori di servizi, gli ispettori della salute e della sicurezza, gli ingegneri di cantiere, i subappaltatori, il personale della pubblica amministrazione (Khan et al. 2021).

Nel XX secolo nascevano i primi metodi e tecniche di gestione dei progetti, inizialmente però mancavano i giusti strumenti di verifica e di valutazione, in seguito ci sono stati dei progressi che hanno portato allo sviluppo di metodologie utilizzate ancora oggi in alcuni tipi di progetti edilizi. Però, nella maggior parte dei casi, si utilizzavano i mezzi di comunicazione tradizionale invece che i nuovi metodi. Il distacco dai mezzi tradizionali si è visto con lo sviluppo dei computer; quindi, hanno preso piede le nuove tecnologie CAD e successivamente BIM.

Il BIM ha permesso di rappresentare l'architettura di un edificio in modo completamente diverso. Inizialmente i modelli venivano creati sulla base della documentazione 2D, successivamente questo approccio è cambiato grazie all'avvento e al progresso di librerie parametriche, queste permettono di creare modelli sempre più sofisticati.

Si possono individuare alcune cause principali che hanno distinto il BIM dalle soluzioni CAD, tra queste si possono definire le seguenti:

- La necessità di risolvere automaticamente i problemi di progettazione che non richiedono la decisione del progettista;
- La crescente complessità dei progetti prodotti e il conseguente aumento del numero di disegni, elenchi e relazioni nella documentazione tecnica;
- Con l'aumentare della complessità dei progetti, si è cominciato a riconoscere un numero crescente di collisioni tra progetti, queste però sono più facilmente riconoscibili nello spazio 3D piuttosto che sulla documentazione 2D;
- Le dimensioni di uno spazio 2D sono limitate, quindi a volte non è sufficiente per la quantità di informazioni che si vuole trasmettere (Borkowski 2023).

Già negli anni '90 e nei primi anni 2000 il BIM era stato riconosciuto come un ambito che sarebbe stato molto promettente nel futuro del settore delle costruzioni. Inizialmente questo non ha avuto atto a causa dell'elevato numero di attori coinvolti nel processo (Linderoth 2010). In parte il problema è stato superato grazie a successive implementazioni e all'introduzione di obblighi nazionali, ma la cosa che ha spinto e ancora spinge il progresso del BIM è sicuramente l'educazione (Sharag-Eldin and Nawari 2010). Ciò è stato confermato dai professionisti che continuando a fare esperimenti e investendo sull'apprendimento hanno portato avanti il progetto. Hanno accompagnato lo sviluppo di sistemi di standardizzazione e linee guida nazionali all'evoluzione di piattaforme software concorrenti, portando così al BIM che si conosce oggi.

Negli ultimi anni lo studio ha iniziato a dirigersi verso un impiego del BIM per fornire una visione unificata di tutte le informazioni che riguardano un edificio. Questo concetto prende il nome di Smart City, integra soluzioni di Tecnologia dell'Informazione e della Comunicazione (ICT) e Internet delle Cose (IoT) per una gestione più accurata delle informazioni. Conseguentemente si è arrivati al concetto, in via di sviluppo, del Digital Twin. Il

digital twin è un elemento chiave della rivoluzione ICT per affrontare le sfide che si sono presentate fino ad ora e promuovere una costruzione automatizzata e intelligente (Jiang et al. 2022).

In studi approfonditi svolti da Borkowski (2023), sono stati analizzati gli eventi più significativi che hanno influenzato la formazione ed evoluzione del BIM. Gli eventi sono stati raccolti e classificati come mostrato a Figura 1 secondo la loro rilevanza: epoch-making, milestones and relevant event.

The emerging concept of BIM			Spreading the idea of BIM		
1950s 1960s 1970s	1980s	1990s	2000s	2010s	2020s
1957 - PRONTO	1982 - AutoCAD	1991 - Microstation 3D	2000 - Revit presentation	2010 - BCF	2022 - AI
1962 - article by D.Engelbart	1983 - RADAR CH (Graphisoft Archicad)	1992 - paper by van Needervan and Tolman	2001 - VDC term	2011 - AR/VR	
1963 - Sketchpad	1985 - MiniCad (Vectorworks)	1992 - DXF format	2002 - series of articles by J.Laiserin	2012 - openBIM concept	
1964 - book by Ch.Alexander	1986 - "building modelling" in a publication by R.Aish	1996 - Reflex	2002 - first digital twin by M.Grieves	2013 - IoT	
1973 - BDS by Ch. Eastman	1986 - SONATA	1997 - Charles River Software	2004 - Effort/Effect curve by P.MacLeamy	2015 - Blockchain	
1977 - GLIDE	1988 - Pro/ENGINEER	1997 - IFC 1.0	2008 - the Bew-Richards ramp	2018 - Machine Learning	

nature of events		epoch-making event
		milestone event
		relevant event

Figura 1: Eventi significativi nello sviluppo del BIM (Borkowski 2023).

Come proposto da Borkowski (2023), ci sono più di 40 anni di sviluppo della tecnologia BIM per cui occorre definire una periodizzazione di questo periodo. La divisione temporale mette in luce gli eventi più importanti ma ci sono altri fattori da considerare, oltre al punto di vista temporale occorre considerare le seguenti tematiche:

- Idea;
- Approccio;
- Cultura organizzativa.

1.1.1 Periodizzazione del BIM per idea

A partire dal 1968 ci fu la prima definizione del BM (*Building Modeling*) ma l'idea non si diffuse (Januszkiewicz and Kowalski 2020). A causa delle ISO10303 dal 1986 al 1998 tra i termini Product Model, Building Product Model o Building Model si preferì il primo: *Product Model*. Il primo tentativo di utilizzare il termine BIM dal 1991.

In una prima fase il BIM era stato concepito solo come un'evoluzione del CAD, passando da visualizzazioni 2D a viste 3D del modello di un edificio. Il BIM veniva concepito come una tecnica per realizzare modelli che riproducessero solo l'aspetto di un edificio; quindi, si poteva sfruttare per avere una panoramica completa dello stesso attraverso delle viste tridimensionali (van Nederveen and Tolman 1992).

Dal 2002, grazie ad una serie di articoli di Jerry Laiserin e alla pubblicazione del White Paper pubblicato da Autodesk (2002), l'idea del BIM si è ampliata alle altre discipline legate alla progettazione. La ricerca è stata indirizzata verso la pre-pianificazione, l'individuazione dei clash, sulla quantificazione, sul calcolo dei costi e sulla gestione dei dati. A questo hanno trovato applicazione settori specifici come l'analisi energetica, l'analisi strutturale, la programmazione, il monitoraggio dell'avanzamento e la sicurezza del lavoro nel software.

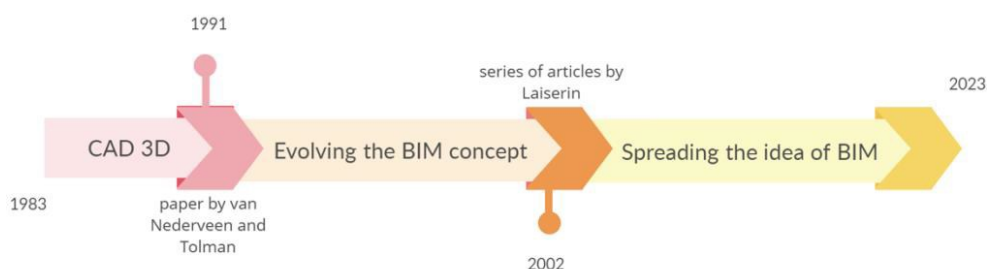


Figura 2: Periodizzazione del BIM per idea (Borkowski 2023).

1.1.2 Periodizzazione del BIM per approccio

Negli anni 80' e 90' la progettazione nelle diverse applicazioni si basava su singoli edifici e su infrastrutture che si estendevano per pochi chilometri. Nonostante i programmi disponevano di blocchi (AutoCAD), oggetti (Archicad), famiglie (Revit) o componenti che acceleravano molto il lavoro, i modelli risultavano comunque limitati. I principali problemi erano: area di lavoro limitata a due miglia dal punto centrale, funzionalità ridotte (come la scomposizione in strati di un muro), debolezza dei computer dell'epoca. Alcune problematiche sono state superate grazie all'avanzamento di sistemi informatici e software, da cui i modelli potevano essere più dettagliati e i programmi più completi.

Nonostante i passi avanti rimanevano problematiche legate alla mancanza di interoperabilità. I software che provenivano da produttori diversi non permettevano di avere una collaborazione tra modelli; anche all'interno dello stesso produttore era difficile operare

tra i vari settori, ad esempio Autodesk Revit inizialmente veniva venduto in tre discipline separate (Revit Architecture, Revit Structure, Revit MEP). Questa fase in cui il coordinamento tra modelli e discipline non era possibile è stata definita come epoca del *closed BIM*.

Dal 2012 ebbe sviluppo l'approccio dell'*openBIM*, annunciato da Building SMART International (2012). Si basa sulla compatibilità del flusso di lavoro piuttosto che su quella dei dati, creando un linguaggio comune tra diversi software che permette di collaborare con altri professionisti (Borkowski 2023).

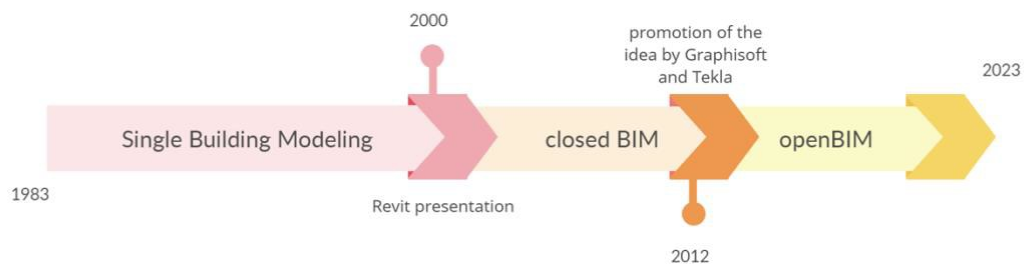


Figura 3: Periodizzazione del BIM per approccio (Borkowski 2023).

1.1.3 Periodizzazione del BIM per cultura organizzativa

Un altro modo di definire i diversi periodi del BIM è in base all'organizzazione che si è voluta raggiungere. Nella prima fase i modelli erano monodisciplinari e non permettevano interazione o coordinamento tra i settori per mancanza di sufficienti strumenti, inoltre l'innovazione era principalmente collegata alla volontà di sviluppare un modello 3D come solo un'evoluzione del 2D. Questa fase prende il nome di *closed BIM*.

In seguito, nella fase del *federated BIM*, si procede nell'individuazione dei primi strumenti collaborativi che permettono la gestione centralizzata dei dati e la collaborazione tra diverse figure facenti parte del processo. Allo stesso tempo vengono individuati dei rischi di sicurezza legati alla condivisione di dati via cloud che aumenta la vulnerabilità agli attacchi informatici. Questi rischi possono avere ripercussioni a livello finanziario, possono far interrompere l'attività o portare danni di reputazione (Turk, Sonkor, and Klinc 2022).

Si arriva dunque all'*anticipated BIM*. Qui si vuole ottenere un'integrazione completa dei modelli, coprendo tutte le fasi del progetto; questo implica una piena integrazione dei processi e una gestione continua e aggiornata delle informazioni del progetto da tutte le part coinvolte.

Uno dei principali ostacoli per raggiungere in BIM integrato (iBIM) è la difficoltà di superare i vecchi processi di lavoro, modelli di business e l'atteggiamento conservatore di una parte dei professionisti del settore. Però negli ultimi anni si volta molto l'attenzione verso il cambiamento e miglioramento nei processi e nei modelli di business (Kocatürk and Medjdoub 2011). Per gli standard per arrivare all' iBIM si deve raggiungere il Livello 3, questo però risulta

irraggiungibile per molti che anche per raggiungere il Livello 2 devono spesso utilizzare componenti aggiuntivi o scrivere soluzioni proprie (Beach et al. 2017). Il Livello 3 prevede di realizzare un modello completamente integrato e completo di informazioni sul sito dell'edificio, deve essere sviluppato e aggiornato in tutte le fasi del processo e le informazioni devono essere disponibili e consultabili da tutte le parti interessate al procedimento. Essendo questo un obiettivo chiaramente irraggiungibile per il momento, è stata scelta un'ulteriore suddivisione in livello 3A, 3B e 3C: il miglioramento dello scambio di informazioni con l'aiuto di standard aperti è il 3A, la connessione diretta tra sensori e macchine è il 3B, il trasferimento dei dati dei sensori in tempo reale è il 3C (Borkowski 2023).

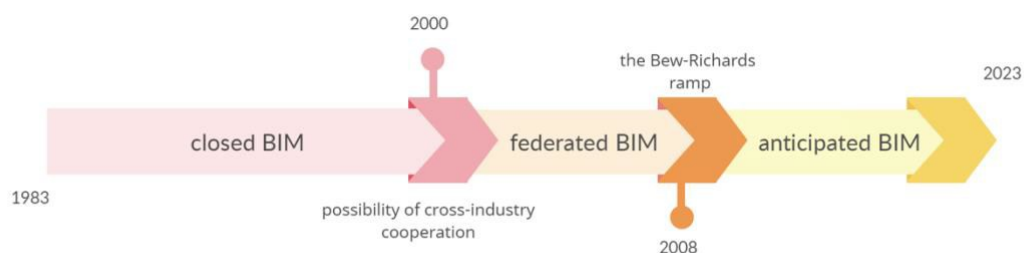


Figura 4: Periodizzazione del BIM per cultura organizzativa (Borkowski 2023).

1.2 Applicazione del BIM nel settore delle costruzioni: Autodesk Revit

La tecnologia BIM è stata studiata e viene applicata in tutto il mondo nella progettazione, costruzione, gestione degli edifici e persino nella demolizione. Tra i pionieri si trovano gli Stati Uniti, attualmente sono considerati i maggiori consumatori e produttori di prodotti BIM; uno dei motivi principali è che diversi livelli del settore pubblico (come università e organizzazioni nazionali) contribuiscono attivamente all'implementazione del BIM. Anche in Europa il BIM è molto utilizzato, il Regno Unito è uno dei principali paesi che hanno contribuito all'implementazione e uno dei più avanzati nella tecnologia. Nel maggio 2011, la *Government Construction Strategy* del Regno Unito ha richiesto che tutti i dipartimenti governativi centrali adottassero il BIM di livello 2 entro il 2016. Per raggiungere l'obiettivo nello stesso anno è stato istituito il BIM Task Group, ovvero un consorzio industriale che riunisce le competenze dell'industria, del governo, dei clienti pubblici, delle istituzioni professionali e del mondo accademico. L'Europa ha pubblicato 34 standard BIM, di questi 18 vengono dal Regno Unito. La maggior parte di questi contiene la metodologia di modellazione e lo stile di presentazione dei componenti per facilitare l'uso efficiente dei dati e dei modelli BIM (Cheng, Lu, and Student 2015).

Nello studio condotto da (Jayasena et al. 2023) sono state svolte delle interviste per diverse categorie professionali per fare delle analisi nella pratica e utilizzo del BIM. Sono stati intervistati architetti, computisti, modellatori BIM, ingegneri MEP e strutturisti con più di cinque anni di esperienza. Nello specifico, la maggior parte degli intervistati ha oltre 10 o 15

anni di esperienza, con un caso che supera i 25 anni. Lo studio ha evidenziato che, in tutti i casi, il BIM viene utilizzato in modalità collaborativa, ad eccezione di un unico caso (Architetto con 20+ anni di esperienza) in cui è impiegato individualmente. Inoltre, lo studio riporta che il software predominante è Revit (utilizzato da tutti), alcuni oltre a questo utilizzano CostX o Cubicost per i computi e SolidWorks per la modellazione.

In linea con quanto riportato dallo studio bibliografico, anche nella presente ricerca **Revit** è stato adottato come software principale, con un focus specifico su alcune componenti particolari, che verranno descritte nel dettaglio successivamente.

Secondo la guida ufficiale di Autodesk (2024), Revit offre un'ampia varietà di strumenti per la modellazione avanzata, che consentono di progettare in modo più preciso e dettagliato. Il modello costruito in Revit è un **modello parametrico**, questo comporta delle relazioni tra gli elementi presenti nel progetto. Queste relazioni sono i parametri degli oggetti che vengono creati in automatico dal software oppure possono essere definiti o modificati dall'utente. Il vantaggio dei parametri è che una volta modificati per un elemento si riflettono su tutte le componenti del progetto della stessa tipologia. Tutte le informazioni del modello Revit sono presentate attraverso le tavole 2D, viste 3D e abachi; essendo un modello parametrico, quando si effettuano modifiche agli oggetti, le visualizzazioni saranno aggiornate in automatico.

Gli elementi che si vanno ad inserire in un progetto Revit sono definiti **famiglie**, queste contengono i parametri e la definizione geometrica dell'oggetto. Il software utilizza tre tipi di elementi (Figura 5):

- *Model elements* (elementi di modello): rappresentano l'effettiva geometria 3D dell'edificio e si distinguono tra Hosts e Model components, le due tipologie sono collegate tra loro perché la prima può essere posizionata in qualunque punto dello spazio (parete, pavimento ecc.) mentre la seconda può essere solo contenuta da un Host (finestre, porte ecc.);
- *Datum elements* (elementi di riferimento): aiutano a definire e ad orientarsi all'interno del contesto del progetto, tra questi si hanno i livelli, le griglie e i piani di riferimento;
- *View-specific elements* (elementi specifici della vista): mostrano le informazioni e dettagli degli oggetti del documento, sono riferite alla singola vista o tavola.

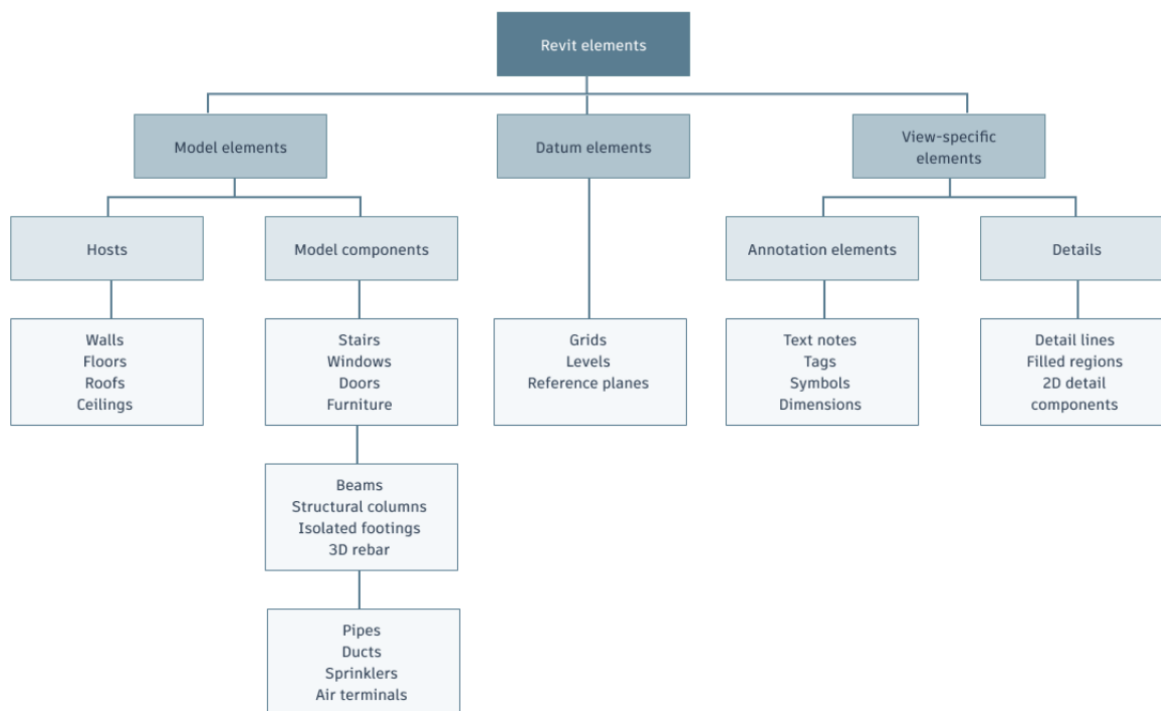


Figura 5: Schematizzazione delle tipologie di elementi in Revit (Autodesk Inc. 2024).

Il comportamento delle famiglie è strettamente legato al contesto in cui vengono inseriti. Se si conosce bene il contesto e il comportamento dell'oggetto è possibile modificarlo gestendo i vincoli della famiglia per la singola istanza. Per comprendere questo concetto è necessario spiegare la *gerarchia degli oggetti* Revit.

All'inizio della gerarchia ci sono le **Categories**, queste sono la struttura organizzativa principale poiché sono raggruppamenti di elementi (Structural Columns, Structural Framing, Walls ecc.). Ogni categoria contiene le **Families**, in particolare queste si distinguono in tre classi: famiglie di sistema, famiglie caricabili e famiglie in-place. La *famiglia di sistema* è la classe di famiglie già presente nel modello di progetto scelto e ricoprono tutte le tipologie base di elementi che vanno a popolare un progetto. Le *famiglie caricabili* si possono importare nel progetto e generalmente vengono utilizzate quando sono necessari oggetti più specifici rispetto a quelli rappresentati dalle famiglie di sistema. Le *famiglie in-place* sono utilizzate per creare elementi unici, richiesti per rappresentare al meglio la realtà del progetto. Le famiglie sono poi composte da **Family Types**, questi si differenziano per dimensioni, materiale o altri parametri riconducibili alla stessa famiglia; ad esempio, la famiglia finestra può avere il tipo 60x40 cm o 40x40 cm, oppure una trave strutturale in calcestruzzo può avere il tipo con sezione 30x30 cm o 40x20 cm. La singola family type ha inoltre le **Instances**, questi sono proprietà specifiche che non vanno ad influenzare l'intero type ma solo il singolo oggetto. Alla Figura 6 è riportato un esempio di gerarchia degli oggetti per la categoria della *Structural Beam* (Autodesk 2022).

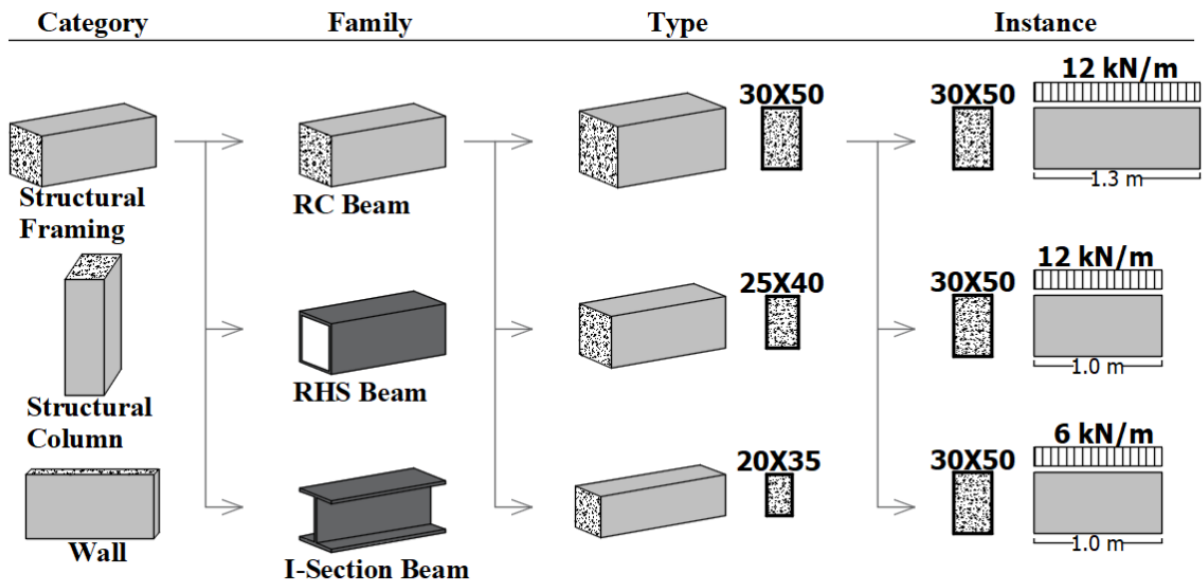


Figura 6: Gerarchia degli oggetti di Revit: categoria delle Structural Framing (Habte and Guyo 2021).

In Revit è possibile lavorare nei tre ambiti principali: Architettonico, Strutturale e MEP. Il primo approccio al lavoro nei 3 ambiti fu organizzato in modo tale da vendere 3 prodotti separati: Revit Architecture, Revit Structure e Revit MEP (Borkowski 2023). È stato riscontrato che questo metodo non funzionasse correttamente, quindi, in seguito a varie implementazioni, si è arrivati alla struttura attuale: il lavoro è separato per le 3 discipline che vengono poi collegate ad un Modello Centrale che ha la funzione di database comune.

La condivisione avviene su regole ben precise così da avere un miglior coordinamento del gruppo, si vuole avere una distribuzione appropriata del lavoro e fare in modo che questo non si vada a sovrapporre o contraddire. Il Central Model e quelli locali devono essere costantemente connessi per ricevere e inviare informazioni in modo da non avere incompatibilità (Modelical 2024). Localmente, quindi, si lavora nei 3 modelli: Architectural Model, Structural Model e MEP Model. Di seguito si va a definire l'impostazione generale dei 3 modelli in Revit, evidenziando le caratteristiche principali che hanno interessato lo studio di questa tesi.

1.2.1 Architectural Model

Revit fornisce diverse tipologie di template per il modello architettonico. Per avere un modello ordinato e coerente con le effettive attività di cantiere è possibile definire la posizione nel progetto in modo accurato e le diverse fasi di costruzione che riguardano l'edificio o l'infrastruttura. Dal punto di vista architettonico è importante conoscere e riprodurre le impostazioni del sito e la sua topografia.

Alla base del progetto architettonico è necessario creare e monitorare i **livelli**, su questi si basano tutti gli elementi del progetto, quindi, è bene averli chiari fin da subito. Generalmente

è bene limitarsi ad utilizzare i livelli architettonici adattandoli a quelli strutturali, così da avere quelli che rappresentano i piani dell'edificio. Per fare questo è possibile utilizzare i modelli collegati al centrale, così da avere le modifiche coordinate con la parte strutturale.

Nel browser di progetto è possibile organizzare le **viste** in gruppi e sottogruppi a seconda dell'uso che se ne fa. Per prima cosa si possono visualizzare le viste relative alle piante dei diversi livelli, se ne possono creare delle copie a seconda che serva una vista più o meno dettagliata. Sulla stessa pianta si può avere una copia di dettaglio, in cui si presentano quote, etichette e dettagli, e una copia di lavoro in cui si tengono gli elementi principali. In questo è molto utile anche definire il *grado di dettaglio di una vista*, si può infatti scegliere tra Course (grezzo), Medium (medio) e Fine (dettagliato). Si passa dal grado Course in cui gli elementi vengono rappresentati in modo semplificato, con linee semplici e sagome base, al grado Fine in cui sono mostrate fedelmente tutte le componenti di un oggetto come una finestra, una porta o la stratigrafia di una parete.

Oltre alle viste in pianta, è possibile creare **sezioni e prospetti** del progetto. Le sezioni si individuano direttamente dalla pianta, scegliendo quali elementi devono essere tagliati. È possibile definire l'estensione della vista sezionata: ad esempio, si può creare una sezione localizzata per visualizzare un dettaglio come il collegamento parete-solaio, oppure una sezione estesa che attraversa l'intero edificio. Anche in questo caso si possono impostare i gradi di dettaglio (Course, Medium, Fine) in base alle informazioni che si desidera estrapolare dalla vista. I prospetti, invece, sono utili per visualizzare le diverse facciate del progetto e vengono identificati da simboli specifici nelle piante, che indicano la direzione della vista.

Impostato il progetto si prosegue nella costruzione degli elementi utilizzando le categorie e famiglie presenti in Revit. Tra gli oggetti più comuni troviamo i **Muri** (*Walls*), nella disciplina architettonica questi hanno delle stratigrafie specifiche che è bene suddividere in 3 porzioni (Exterior, Core e Interior) come fossero 3 muri distinti e ognuno con le sue parti. All'interno dei muri si posizionano **Porte** (*Doors*) e **Finestre** (*Windows*). Si possono utilizzare le famiglie già presenti e modificare le dimensioni principali attraverso i loro parametri. Altrimenti di vanno a caricare nuove famiglie di queste in base all'esigenze (Modelical 2023).

Oltre agli elementi principali come muri, porte e finestre, nel modello architettonico si possono inserire tutte le altre componenti fondamentali per la costruzione e la rappresentazione completa di un edificio, come **Scale** (*Stairs*), **Solai** (*Floors*) e **Tetti** (*Roofs*). Le scale possono essere modellate automaticamente tramite strumenti parametrici che permettono di definire con precisione la forma, il numero di alzate e pedate, i pianerottoli e il corrimano. È possibile personalizzarle in base alle esigenze progettuali e costruttive, mantenendo sempre un collegamento dinamico con i livelli dell'edificio. I solai rappresentano gli elementi orizzontali di calpestio e possono essere creati con diversi spessori e stratigrafie, scegliendo materiali, inclinazioni e dettagli costruttivi. I tetti possono essere disegnati secondo vari metodi (perimetrale, per estrusione o per falde inclinate), adattandosi a ogni tipologia architettonica. È anche possibile arricchirli con elementi accessori come gronde, abbaini o

lucernari.

Per sviluppare e presentare il modello, ci sono inoltre numerosi **elementi di annotazione** che permettono di arricchire il progetto con informazioni aggiuntive e di garantire una comunicazione chiara e precisa tra i diversi attori coinvolti. Le annotazioni in Revit comprendono una vasta gamma di strumenti che facilitano la documentazione e la comprensione del progetto, come dimensioni, etichette, simboli e testi. Le dimensioni vengono applicate per misurare con precisione gli elementi del progetto, come distanze tra muri o altezze di porte e finestre. Le etichette, d'altra parte, sono utilizzate per identificare specifici oggetti nel modello, come materiali o tipologie di porte. I simboli, invece, vengono usati per rappresentare in modo visivo alcune informazioni, come gli accessi o le zone di sicurezza.

Un aspetto interessante di Revit è che molte annotazioni sono collegate direttamente agli oggetti nel modello. Ciò significa che, se un oggetto viene spostato o modificato, le annotazioni ad esso correlate si aggiornano automaticamente. Questo riduce gli errori e aumenta l'efficienza del processo di progettazione. Inoltre, Revit permette di personalizzare le annotazioni in base alle necessità del progetto, consentendo di definire stili, dimensioni e formati specifici. Le annotazioni sono cruciali per la preparazione di documenti tecnici come disegni esecutivi e planimetrie, dove la chiarezza delle informazioni è fondamentale per il successivo processo di costruzione.

Il processo edilizio è costituito da diversi periodi temporali o stadi di avanzamento, per questo si utilizzano le **fasi**. Attraverso queste è possibile gestire e documentare il progetto in relazione all'evoluzione dello stesso, si va così a facilitare la rappresentazione grafica e la produzione degli elaborati specifici. In base alla complessità e alla sequenza dei lavori si possono definire più o meno fasi, generalmente si lavora con le fasi *Esistente*, *Nuova costruzione*, *Demolizione*. Ad ogni elemento costruito in Revit, si può assegnare la fase specifica così anche nelle viste è possibile fare delle comparative semplici andando a selezionare la fase desiderata (BIM Me Up 2023).

1.2.2 *Structural Model*

La parte architettonica e quella strutturale di un edificio sono strettamente interconnesse, ma per una corretta definizione e gestione del progetto risulta fondamentale distinguerle. Per questo motivo, nella pratica progettuale è consuetudine affiancare al modello architettonico un modello strutturale dedicato, mantenendo tra i due una costante comunicazione al fine di garantire coerenza e coordinamento durante tutte le fasi di sviluppo.

Revit dispone di tutte le categorie di elementi portanti che possono costituire una struttura: **Travi** (*Beams*), **Pilastri** (*Columns*), **Pareti** (*Walls*), **Fondazioni** (*Foundations*), **Solai** (*Slabs*), **Armature** (*Rebar*) ecc. Gli elementi strutturali fanno parte di tutta una serie di categorie che seguono regole specifiche, coerenti con la pratica comune. Possono essere modellati

facilmente andando a definire dimensioni, tipo e materiale e il software garantisce la giusta connessione e integrazione con il progetto.

Per realizzare il modello di progetto si possono definire le unità e gli standard specifici dell'oggetto, può essere basato su **livelli** e **griglie** che definiscono la struttura dell'edificio. I livelli distinguono i piani della struttura, le griglie forniscono un riferimento di posizionamento per gli elementi strutturali. L'evoluzione del progetto, anche in questo caso, può essere regolata attraverso le **fasi** temporali e costruttive.

È possibile anche andare a realizzare un **modello analitico** a partire dagli elementi strutturali, questo può essere quindi utilizzato per l'analisi strutturale. Al modello analitico è possibile applicare carichi e metterli in combinazione. Questo modulo può essere utilizzato come interoperabilità tra la parte di progettazione strutturale e la arte architettonica.

Attraverso le diverse viste in **sezione**, **prospetto**, **pianta** e di **dettaglio** è possibile fornire una documentazione di costruzione esaustiva. È possibile estrarre in modo parametrico il computo metrico, elenco dei materiali, elenco delle armature e tante altre informazioni utili per le fasi successive del progetto (Novatr 2023).

Con Revit è possibile modellare elementi altamente specifici o unici per uno specifico caso studio. Il software consente infatti di spingersi a un livello di dettaglio molto elevato, permettendo la rappresentazione precisa di geometrie complesse e personalizzate, difficilmente realizzabili con strumenti più generici.

Degli strumenti utili a rappresentare degli elementi adattivi con geometria variabile sono le **ADAPTIVE FAMILY**. Queste sono delle componenti parametriche avanzate, che permettono di realizzare elementi complessi e adattarli all'interno del progetto.

L'adaptive family può essere un elemento architettonico o strutturale, in base alle proprietà che vengono attribuite. Per essere un elemento strutturale può essere definito con un materiale strutturale con calcestruzzo, con le sue proprietà specifiche di resistenza. Si può impostare con capacità di ospitare armature, che andranno quindi a seguire le regole di adattamento di queste.

L'impostazione può essere basata su *reference planes* che consentono di controllare l'allineamento e la posizione degli elementi, si possono utilizzare per controllare la geometria delle famiglie applicando a questi i parametri dimensionali dell'elemento (Autodesk Inc. 2022).

I parametri che definiscono la geometria possono essere di diverse tipologie e ognuna ha un comportamento specifico. I *Type Parameters* definiscono le proprietà comuni a tutti gli elementi dello stesso tipo (es. spessore trave), andando a modificare questi parametri vengono influenzate tutte le istanze. I *Instance Parameters* sono specifici per ogni singolo elemento, quindi portano modifiche locali per l'istanza selezionata (Autodesk Inc. 2014).

Le **Nested families** sono famiglie annidate all'interno di una famiglia host. Sono utilizzate per gestire meglio forme complesse, evitando di combinare forme diverse nella

stessa famiglia. È possibile nidificare a più livelli di profondità, ogni livello deve essere gestito in modo da non perdere informazioni utili. I parametri della nested family devono essere associati alla host family per essere controllati, è possibile con parametri di istanza e con parametri di tipo.

Si introducono gli *Shared Parameters*, parametri condivisi tra famiglie e progetti, fondamentali con le famiglie annidate. Questi sono proprietà utilizzabili in più famiglie o progetti. Sono memorizzati in un file esterno, indipendente dai file di progetto o famiglia, permettendo così il riutilizzo e la coerenza delle informazioni.

La famiglia nidificata con parametri condivisi permette di trattare ogni proprietà in modo separato, gestibile all'interno del progetto; a differenza delle famiglie con parametri non condivisi, che si comportano come un unico blocco (Modelical 2025b). Attraverso gli shared parameters è possibile associare i parametri della famiglia host a quelli della nested family, direttamente dal pannello proprietà. Si possono anche utilizzare della formula di associazione (Autodesk Inc. 2023).

La famiglia host può essere una famiglia adattiva, questa presenta alcuni elementi base come punti, linee e curve. Il punto può essere un **Reference Point** o un **Adaptive Point**. Il primo è un punto di riferimento base, con proprietà di istanza modificabili, come posizione e visibilità dei piani di riferimento. Il secondo è un tipo di reference point che diventa un punto di posizionamento (placement point) per l'elemento adattivo e viene numerato in ordine di inserimento, questi punti permettono alla famiglia di adattarsi a contesti spaziali variabili e di essere posizionata su superfici o curve.

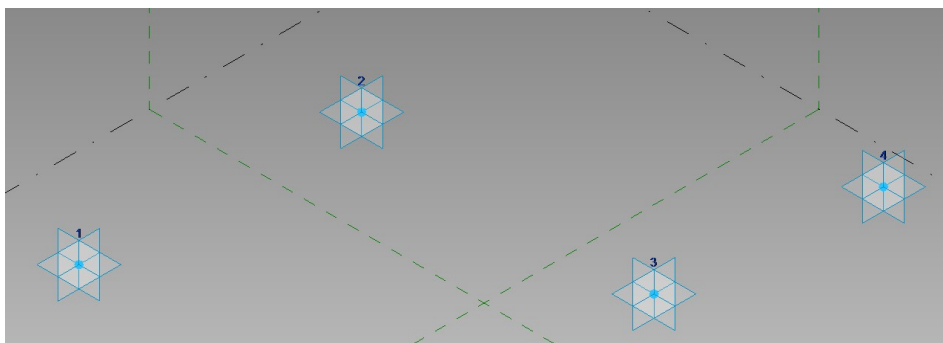


Figura 7: Adaptive points.

Un altro elemento fondamentale è la **Reference Line**, una linea di riferimento che può avere piani di lavoro associati (work planes) alle sue estremità o lungo la sua direzione. Serve come scheletro parametrico per costruire geometrie complesse e per guidare la forma della famiglia adattiva. Su di essa possono essere inseriti dei *reference point* a lunghezze precise. Altrimenti ci sono le **Model Line** usate per disegnare forme visibili nella famiglia, ma senza piani di lavoro associati. Può essere usata per dettagli o per definire contorni di sezioni.

Per i punti si possono fare passare le **Curve**, tramite la funzione *Create Spline Through Points*, è possibile creare curve spline che passano esattamente attraverso reference points o adaptive points. Queste curve sono parametriche e si aggiornano dinamicamente al movimento dei punti, permettendo forme complesse e adattive. Come per le linee è possibile inserire dei punti di riferimento lungo il percorso, definendo la distanza unitaria.

I **work planes** sono delle superfici di lavoro molto utili per la modellazione, ci sono i piani generici nello spazio o quelli associati a linee e punti. I punti adattivi hanno i tre piani principali, le linee hanno i piani ortogonali alla direzione e i piani alle estremità, le curve hanno i piani ortogonali alle estremità e quelli perpendicolari a punti lungo il percorso.

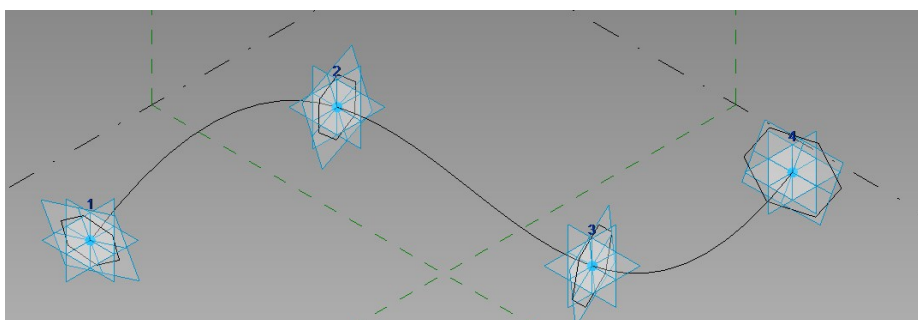


Figura 8: Spline Through Points.

Andando a realizzare delle sezioni trasversali nei piani di lavoro è possibile creare dei **Solidi**. La geometria solida si genera tramite l'uso di sezioni trasversali e curve guida (reference line o spline). Utilizzando il comando *Create Form*, Revit crea solidi estrusi o sweep che seguono le curve definite dai punti adattivi, consentendo modelli 3D flessibili e parametrici (Modelical 2025a)

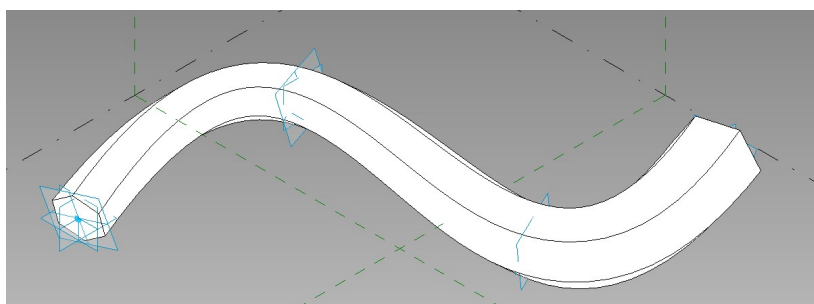


Figura 9: Solido da curva e sezioni.

Le famiglie adattive possono essere utilizzate nel progetto Revit inserendole come dei Generic Model. Il **Generic Model** è un tipo di famiglia in Revit molto versatile, utilizzato per creare componenti parametrici che non rientrano nelle categorie di sistema standard. Con questa componente è possibile creare forme 3D personalizzate tramite reference planes, reference lines, punti di riferimento e modelli di geometria (estrusioni, sweep, blend, revolve). Dato che le adaptive families sono basate su punti adattivi e curve di riferimento, in base a dove vengono posizionate nel progetto queste si adatteranno (Autodesk Support 2018).

All'interno degli elementi strutturali è possibile andare a posizionare le **STRUCTURAL REBAR**, in maniera precisa e coerente con il progetto reale. Questi elementi seguono delle regole predeterminate che permettono di adattare le armature all'elemento host.

In Revit le barre di armatura sono definite come *system families* e possono essere di diversi **tipi**, ognuno dei parametri base. I parametri predefiniti sono: materiale, dimensioni di diametro, raggio di curvatura, diametro e curvatura delle braccia, lunghezza delle braccia.

Oltre al tipo si definisce le **forma** dell'armatura (*Rebar Shape Family*), queste determinano la geometria della barra, comprese le pieghe e i ganci. Le forme standard includono barre dritte, staffe rettangolari, staffe a U, spirali, barre piegate con ganci a 90° e 135°. Per ognuna sono definite: stile, tipologia, proprietà e numero delle braccia, diametro della barra e delle pieghe, lunghezze e raggi delle varie parti.

Il **diametro** della barra è un parametro fondamentale, definito di default nella *Rebar Bar Type*, e influisce sulla rappresentazione grafica, sulla quantità di acciaio e sulle proprietà meccaniche. Il diametro può essere modificato duplicando e personalizzando i tipi di barra (Bugge 2019).

Una volta impostata il tipo, la forma e il diametro della barra possono essere definite le modalità di inserimento nell'elemento. Il **posizionamento** dell'armature si esegue rispetto alle facce. Come mostrato a Figura 10 si può posizione in base al piano di lavoro corrente, ad esempio in sezione, oppure in base al piano di copriferro più vicino o più lontano al piano di lavoro. Selezionata il piano si può scegliere se inserirla parallela al piano, parallela al copriferro o perpendicolare la copriferro (Autodesk Inc. 2019).

Posizionata la prima armatura si sceglie il tipo di **ripetizione**, in generale se sono staffe si deve impostare la spaziatura, se sono armature longitudinali si imposta il numero lungo la faccia. Come layout si può scegliere tra barra singola, numero predefinito, spaziatura massima, numero con spaziatura e copriferro minimo. Definendo il *numero predefinito* la spaziatura di adatta all'interferro, viceversa con *copriferro minimo* si sceglie la spaziatura e viene adattato il numero di conseguenza. Con *spaziatura massima* e *numero con spaziatura* l'armatura può anche andare a sporgere dall'elemento (Computer and Design Services Limited 2023).



Figura 10: Posizionamento armature.

Per le travi e pilastri le armature vengono applicate rispetto alle facce perimetrali, le staffe vengono applicate con spaziatura e le armature longitudinali con numero fisso. Per le solette si utilizzano le **Rebar Area** che hanno le stesse proprietà delle armature longitudinali ma sono ripetute con passo costante e si estendono fino al perimetro più esterno dell'elemento.

Nel caso di elementi strutturali di geometria variabile si utilizzano delle armature che seguono l'andamento della superficie curva. Le **Free Form Rebar** sono armature che possono essere distribuite su superfici curva, come travi curve o elementi con geometrie complesse, utilizzando metodi di posizionamento adattivo. La distribuzione può avvenire in due modi in base al tipo di armatura che si vuole ottenere: distribuzione allineata o distribuzione su superficie (Figura 11).

Con la *distribuzione allineata* si definisce una curva guida e si posizionano barre con spaziatura parametrica lungo la curva. La curva può essere disegnata, con reference o model line, oppure si può utilizzare una forma standard applicata ad una faccia. Ad esempio, se si vuole mettere una staffatura si posiziona la forma sulla prima faccia, poi si sceglie di allinearla seguendo un bordo della superficie complessa.

Con la *distribuzione su superficie* si vanno a posizionare le barre su superfici complesse; quindi, non saranno barre di forma standard ma delle barre singolari. Sono realizzate usando punti adattivi o metodi di proiezione per mantenere il copriferro costante. Per applicarle si deve individuare la faccia di inizio, la faccia di fine e la faccia di riferimento della serie. I punti di controllo possono essere modificati per adattare la forma (Computer and Design Services Limited 2023).

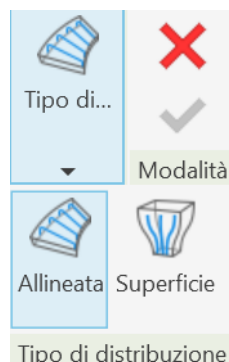


Figura 11: Free Form Rebar.

1.2.3 MEP Model

L'ambiente MEP di Revit offre strumenti dedicati per la modellazione, il calcolo e la documentazione degli impianti meccanici, elettrici e idraulici. È possibile integrare queste discipline con la parte architettonica e strutturale del progetto (BetterPors 2023).

La parte **meccanica** riguarda la progettazione di sistemi HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) e altre reti meccaniche. Ogni *MechanicalSystem* deriva dalla classe *MEPSystem* e può essere composto da condotti, terminali, apparecchiature e accessori. I parametri principali

includono portata d'aria, pressione statica, velocità, perdite di carico e proprietà di flusso. È possibile suddividere reti complesse in sezioni, ciascuna con le proprie proprietà di lunghezza, perdita di pressione e coefficienti di perdita. Tutte le proprietà sono aggiornate automaticamente in caso di modifiche, garantendo coerenza tra modello e documentazione (Autodesk Inc. 2025).

La parte **elettrica** di Revit permette la modellazione di reti elettriche, inclusi circuiti, quadri, apparecchi di illuminazione, prese, interruttori e sistemi di distribuzione. Ogni *ElectricalSystem* eredita dalla classe *MEPSystem* e gestisce parametri come tensione, corrente, carico collegato, carico richiesto, fase, numero di circuiti e collegamento ai pannelli.

La parte **idraulica** consente la modellazione completa di reti idrauliche, inclusi tubazioni, raccordi e apparecchiature (sanitarie, HVAC, antincendio) (Autodesk 2009). Revit permette la creazione di sistemi idraulici parametrici in 3D, con posizionamento preciso di tubi, raccordi e attrezzature. Sono presenti strumenti che consentono la modellazione di tubazioni inclinate (sloped pipes), impostare pendenze e calcolare automaticamente le quote di partenza e arrivo, semplificando la progettazione secondo le normative di settore. Si possono gestire materiali, diametri e tipologie di raccordi, garantendo coerenza e rapidità nella modellazione.

Gli elementi che si possono utilizzare si dividono principalmente in pipes, fittings e equipment. La modellazione delle *Pipes* avviene selezionando il tipo di sistema (ad esempio acqua fredda sanitaria, acque reflue, gas, ecc.) e il diametro desiderato, che può essere scelto da un elenco di tipi di tubazioni predefiniti o personalizzati. Durante la creazione, Revit assegna automaticamente il tipo di sistema e il materiale, mentre l'utente deve definire l'offset verticale (quota) di partenza e la direzione di posa. Le proprietà principali sono dunque diametro, materiale, quote, pendenza e lunghezza.

I *Fittings* sono i raccordi (gomiti, T, riduzioni, ecc.), questi si adattano automaticamente al tipo e diametro dei tubi collegati. Le proprietà includono tipo di raccordo, angolo, materiale e dimensioni. Le lookup tables determinano il dimensionamento e la compatibilità tra elementi.

L'*Equipment* sono le apparecchiature idrauliche come pompe, serbatoi, sanitari, ecc. e sono famiglie parametriche che includono connettori idraulici, parametri di portata, pressione, quota di installazione e tipo di collegamento (Autodesk Inc. 2025c).

In alcuni casi le tubature seguono percorso complessi che non è possibile effettuare con le tipologie comuni. Per questo si possono utilizzare le **FLEX PIPES**, tubazioni flessibili progettati per rappresentare tubazioni flessibili utilizzate in impianti idraulici e HVAC. Infatti, sono particolarmente utili per modellare percorsi di tubazioni non rigide, che possono curvarsi o adattarsi a geometrie complesse senza dover inserire numerosi raccordi rigidi.

Alle *Flex Pipes* è possibile assegnare solo materiali flessibili specifici, definiti nella colonna *Flexible pipes* del progetto. Non è possibile assegnare materiali rigidi o standard a

questi elementi. Ogni flex pipe è associata a un *FlexPipeType* che ne definisce diametro, materiale e altre caratteristiche tecniche. La tubazione flessibile segue una curva continua che può essere modificata dinamicamente spostando i punti di controllo, senza necessità di inserire raccordi o segmenti multipli.

Le flex pipes si possono collegare ai connettori degli apparecchi o delle tubazioni rigide, garantendo continuità e corretto flusso nel sistema idraulico o HVAC. Come per le tubazioni normali si possono includere parametri di portata, pressione, temperatura e altre proprietà fluidodinamiche (Autodesk Inc. 2025a).

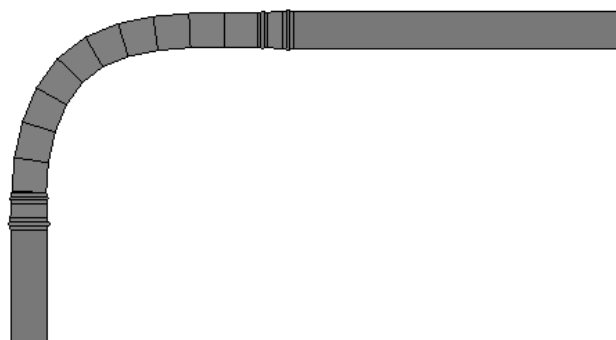


Figura 12: Esempio di Flex Pipe.

2 PARAMETRIZZAZIONE DEI MODELLI BIM

I processi di progetto coinvolgono una pluralità di attori, ognuno dedicato ad uno specifico aspetto come la parte strutturale, quella architettonica e gli impianti. È fondamentale quindi una condivisione dei contenuti informativi in tempo reale o quasi-reale.

Nel 1963 Ivan Sutherland introduce Sketchpad, il primo sistema CAD, aprendo la strada alla progettazione digitale grafica. Nel 1974 Charles Eastman teorizza il Building Description System (BDS), un modello dati digitale che definisce geometria, relazioni e caratteristiche degli oggetti edilizi, gettando le basi del BIM moderno. Negli anni 2000 c'è la diffusione dei software BIM parametrici (es. Revit, Archicad), che integrano dati non geometrici (materiali, costi) direttamente negli oggetti 3D (Stefano Antonelli 2019).

Dal 2021 ha avuto inizio l'evoluzione verso l'**automazione avanzata** con strumenti come *Generative Design* in Revit per generare soluzioni ottimizzate, *Dynamo* e *Grasshopper* per scripting visuale, collegati a modelli BIM per controllare parametri complessi e integrazione con *IA* (es. Spacemaker) per analisi ambientali e simulazioni predittive.

L'automazione del BIM può essere utilizzata per ottimizzare i progetti, gestire la pianificazione e creare una documentazione aggiornata e di rapido accesso. Ad esempio, con *Spacemaker* è possibile avere un'**ottimizzazione del design** attraverso simulazioni avanzate che tengono conto di parametri ambientali, regolamentazioni e requisiti tecnici. I criteri includono l'illuminazione naturale, i livelli di rumore e le condizioni climatiche. I processi automatizzati

mirano a ridurre l'errore umano dovuto alla complessità di gestire un'elevata mole di dati.

Applicazioni come *SWAPP* permettono la generazione automatizzata di **documenti e tavole di progetto**. Dando così la possibilità ai progettisti di concentrarsi su aspetti importanti del progetto, riducendo il lavoro su attività ripetitive come la stesura manuale di tavole tecniche e report (Orbyta 2023).

È possibile **gestire il ciclo di vita** del progetto. Si possono estrarre le quantità, le superfici e i volumi e fare dei computi metrici automatici in base alle informazioni sui costi. Le stime possono essere facilmente suddivise per zona, piano, tipologia di materiale o lavorazione, utilizzando come filtro le informazioni presenti nel modello. Agli oggetti è possibile legare il tempo con le fasi di lavoro; dunque, con l'interoperabilità è possibile collegare le WBS ed avere una simulazione del cantiere nel tempo. In questo modo è possibile anche utilizzare i modelli BIM per manutenzione predittiva, con dati su posizione impianti e interventi storici (Anafyo Sagl 2025).

L'automazione dei modelli è possibile attraverso alcuni software BIM, tra questi sono presenti Autodesk Revit, Graphisoft Archicad e BricsCAD BIM. Come primo punto, **Autodesk Revit** offre strumenti nativi per la parametrizzazione, come le famiglie parametriche e l'utilizzo di formule condizionali. Inoltre, è integrato con **Dynamo**, un ambiente di scripting visuale che consente di automatizzare operazioni complesse, ad esempio la generazione automatica di layout impiantistici. In secondo luogo, Graphisoft Archicad è specializzato nella modellazione parametrica orientata all'architettura e include un plug-in MEP integrato per la progettazione degli impianti. BricsCAD BIM si distingue per l'uso dell'intelligenza artificiale nella conversione di masse 3D in elementi costruttivi come muri e solai, con una classificazione automatica secondo lo standard IFC (Adhox S.r.l. 2025).

Il *work flow* dei programmi di automazione parte dalla definizione dei parametri (geometria, materiali, costi), si possono anche collegare dei database esterni utili; poi si eseguono script o algoritmi generativi che portano all'estrazione automatica di output (disegni, analisi, computi). Tra gli strumenti di automazione, in questo studio si è scelto di concentrarsi sul plug-in Dynamo per Revit. Di seguito è riportata una panoramica del programma e del suo utilizzo.

2.1 Dynamo per revit: automazione e modellazione avanzata

Dynamo è una piattaforma che consente ai progettisti di esplorare la programmazione visuale, risolvere problemi e creare i propri strumenti nell'utilizzo del BIM. È un'applicazione che può essere eseguita in modalità "Sandbox" autonoma o come plug-in per altri software come Revit, FormIt o Civil 3D.

Nella piattaforma è possibile realizzare algoritmi per effettuare un'ampia gamma di operazioni. Vengono definite relazioni tra elementi che portano all'esecuzione di una sequenza

di azioni che conducono alla soluzione finale.

Il processo di programmazione visuale è possibile attraverso l'interconnessione di elementi grafici denominati **nodi**. Ogni nodo rappresenta una specifica operazione o funzione e dispone di porte di input e output, situate rispettivamente sul lato sinistro e destro del nodo. I dati fluiscono da un nodo all'altro tramite *fili*, che collegano l'output di un nodo all'input di un altro, definendo così la direzionalità e il flusso logico del programma. È possibile modificare o rimuovere i fili per adattare il flusso del programma, garantendo così flessibilità nella progettazione del workflow.

I dati di output vengono restituiti eseguendo in ogni nodo una specifica operazione, è importante dare in input i dati del giusto tipo altrimenti genera errore. I dati che attraversano i nodi possono essere di vario tipo, inclusi numeri, stringhe, geometrie o liste.

Dynamo offre la possibilità di creare **nodi personalizzati**, che consentono di incapsulare una serie di operazioni all'interno di un singolo nodo. Questi nodi personalizzati sono utili per semplificare il layout del grafico, promuovere il riutilizzo del codice e facilitare la condivisione di funzionalità complesse. La creazione di un nodo personalizzato avviene attraverso l'interfaccia di Dynamo, dove è possibile definire le porte di input e output e specificare le operazioni interne.

Una volta creati, i nodi personalizzati possono essere organizzati e condivisi tramite **pacchetti**. Un pacchetto è una raccolta di nodi personalizzati che può essere pubblicata e distribuita attraverso il *Dynamo Package Manager*, permettendo alla comunità di utenti di accedere e utilizzare strumenti sviluppati da altri. Questo sistema di condivisione favorisce la collaborazione e l'espansione delle funzionalità disponibili in Dynamo.

L'interfaccia del programma si divide principalmente in area di lavoro, barra di esecuzione e libreria. L'**area di lavoro** rappresenta il fulcro dell'ambiente di programmazione visuale, fungendo da spazio operativo in cui gli utenti costruiscono, modificano e visualizzano i propri script. In questa sezione, i nodi vengono posizionati e collegati per definire il flusso logico del programma. Oltre alla composizione del grafico, l'area di lavoro offre un'anteprima tridimensionale (3D) delle geometrie generate, permettendo una verifica immediata dei risultati.

La **barra di esecuzione** costituisce uno degli elementi fondamentali dell'interfaccia di Dynamo, in quanto consente all'utente di controllare quando e come il programma viene eseguito. Essa si trova nella parte inferiore della finestra del software e offre diverse modalità di esecuzione, adattabili in base alla complessità del progetto e alle esigenze operative dell'utente. In *modalità automatica*, lo script viene eseguito ogni volta che si apporta una modifica al grafico; questa configurazione è particolarmente utile per modelli semplici o quando si desidera osservare in tempo reale gli effetti delle modifiche apportate. Per modelli più complessi può essere utile la *modalità manuale* che prevede l'attivazione esplicita da parte dell'utente attraverso il pulsante "Esegui".

Durante l'interazione con la barra di esecuzione, Dynamo fornisce un sistema di feedback visivo che indica lo stato di ciascun nodo. I *nodi attivi* vengono visualizzati con uno sfondo grigio scuro, questo indica che sarà visualizzata l'anteprima della geometria creata. I *nodi inattivi* sono evidenziati in grigio chiaro e indicano che l'anteprima dell'oggetto in output viene nascosto, ma sono comunque coinvolti nel processo in esecuzione. Si può scegliere di andare a escludere temporaneamente porzioni di script, i *nodi congelati* bloccano il processo che prosegue da questo punto e possono essere riattivati quando necessario.

Quando si verificano *errori*, i nodi appaiono in rosso, segnalando la necessità di un intervento correttivo da parte dell'utente. Infine, i nodi contrassegnati in giallo indicano la presenza di *avvisi*, spesso legati a problematiche meno gravi, come ad esempio errori nei tipi di dati o connessioni mancanti.



Figura 13: Stato di esecuzione dei nodi.

La **libreria** contiene tutti i nodi predefiniti ed eventuali nodi di pacchetti caricati in aggiunta. Questa è strutturata in modo gerarchico, facilitando la navigazione e la selezione dei nodi necessari alla costruzione di script complessi. I nodi, infatti, sono raggruppati per categorie e sottocategorie. Ad esempio, la libreria "Geometry" comprende categorie quali "Point", "Curve", "Surface", e ciascuna di queste può essere ulteriormente suddivisa in sottocategorie come "Create", "Action" e "Query". I nodi classificati come **Create** sono deputati alla generazione di nuovi oggetti o entità geometriche, quelli inseriti in **Action** eseguono trasformazioni o operazioni sulle entità esistenti, mentre i nodi contenuti in **Query** servono a estrarre o restituire informazioni su un determinato oggetto o insieme di oggetti.

La struttura gerarchica della libreria è riflessa anche nella nomenclatura dei nodi, che segue una sintassi coerente del tipo *Libreria.Categoria.Funzione*. Per esempio, il nodo che consente di generare un punto a partire da coordinate cartesiane è denominato *Geometry.Point.ByCoordinates*. Tale convenzione facilita la ricerca tematica all'interno del pannello libreria.

Le **categorie** presenti nella libreria predefinita sono le seguenti:

- *Dictionary*: contiene nodi per creare, modificare e interrogare dizionari (strutture dati composte da coppie chiave-valore), utili per la gestione di dati associativi complessi;
- *Display*: include nodi per la rappresentazione visiva dei dati e delle geometrie all'interno dell'area di lavoro o per la generazione di output visivi come grafici, preview

o colori;

- *Geometry*: racchiude nodi per la creazione, trasformazione e interrogazione di geometrie 2D e 3D, come punti, curve, superfici e solidi. È una delle categorie più ricche e fondamentali;
- *ImportExport*: comprende nodi per importare dati da fonti esterne o esportare i risultati verso file o altri ambienti, come Excel, CSV, o formati CAD;
- *Input*: contiene nodi per l'acquisizione di dati manuali o interattivi, come valori numerici, booleani, selezioni da Revit o da file;
- *List*: offre un'ampia gamma di nodi per la manipolazione di liste: filtraggio, ordinamento, mapping, combinazione e analisi di strutture dati iterate;
- *Math*: include operazioni matematiche di base e avanzate: aritmetica, trigonometria, funzioni logiche e statistiche;
- *Revit*: raccoglie nodi per interagire con il modello Revit, tra cui selezione, creazione, modifica e analisi di elementi BIM;
- *Script*: contiene strumenti per scrivere codice personalizzato in DesignScript o Python, consentendo l'estensione delle funzionalità di Dynamo;
- *String*: fornisce nodi per la manipolazione di stringhe di testo: concatenazione, sostituzione, suddivisione, formattazione, ricerca;
- *Units*: comprende nodi per la gestione delle unità di misura, conversione tra sistemi (imperiale/decimale), e controllo delle unità all'interno dei dati.

La categoria **GEOMETRY** rappresenta il nucleo dell'ambiente di programmazione visuale, fornendo gli strumenti fondamentali per la creazione e manipolazione di modelli geometrici complessi. Questa categoria è suddivisa in diverse sottocategorie, ciascuna dedicata a specifici tipi di entità geometriche e operazioni associate (Figura 14).

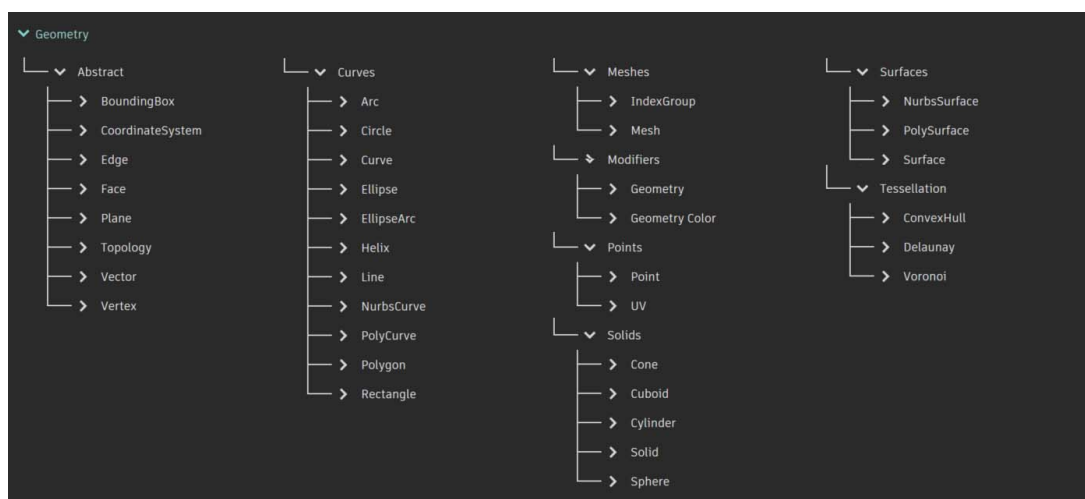


Figura 14: Categoria Geometry nella libreria Dynamo.

È possibile definire e manipolare **vettori**, **piani** e **sistemi di coordinate**, elementi essenziali per stabilire orientamenti e posizioni nello spazio tridimensionale. I vettori

rappresentano direzioni e magnitudini, utilizzati per indicare spostamenti o orientamenti. I piani definiscono superfici bidimensionali infinite, utilizzate come riferimenti per la costruzione di altre geometrie. I sistemi di coordinate stabiliscono origini e assi di riferimento, fondamentali per posizionare e orientare gli oggetti nello spazio. Questi strumenti sono cruciali per creare geometrie precise e controllate, fornendo il contesto spaziale necessario per operazioni geometriche avanzate.

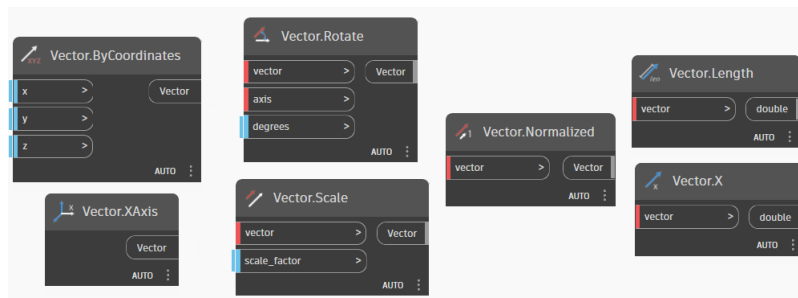


Figura 15: Esempi di nodi per vettori e sistemi di coordinate.

I **punti** sono le entità geometriche più semplici, definite da coordinate che ne determinano la posizione nello spazio. In Dynamo, i punti possono essere creati in due o tre dimensioni, a seconda del sistema di coordinate utilizzato. Essi fungono da elementi fondamentali per la costruzione di geometrie più complesse, come curve e superfici, e possono essere utilizzati per definire posizioni specifiche su queste ultime. Di seguito sono riportati alcuni nodi tipici.

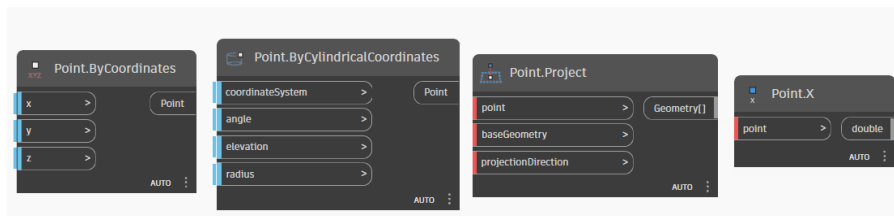


Figura 16: Esempi di nodi per i punti.

Le **curve** rappresentano entità geometriche unidimensionali che possono essere definite da una serie di punti o da funzioni matematiche. Possono essere aperte o chiuse e includono linee, polilinee, archi, cerchi, ellissi, curve nurbs e polycurve (Figura 17). Le curve sono fondamentali per la definizione di percorsi, contorni e profili all'interno di un modello geometrico.

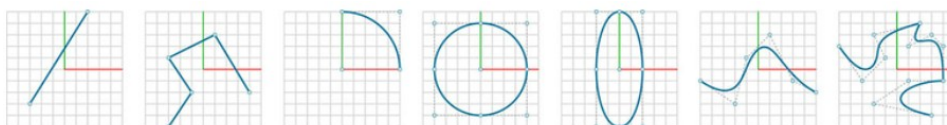


Figura 17: Tipi di curve.

Le *linee* possono essere create in base agli estremi, alla direzione e può essere interrogata sui parametri. Le curve come *archi*, *cerchi* ed *ellissi* possono essere create in base a diverse condizioni come punto centrale, gli estremi, punti appartenenti, angolo di apertura, tangenza e altro. È possibile ricavare tutti i parametri come centro, raggio, lunghezza ecc.

Nel caso di *curve* e *polycurve* la costruzione può essere data da punti di controllo, punti appartenenti, intersezioni, proiezioni, tangenze, unioni ecc. Si possono fare molte operazioni con queste: dividerle per parti uguali o per numero, accorciarle, allungarle, trovare punti a parametri precisi, trovare i piani perpendicolari, estrarle e creare offset. Si possono poi interrogare su lunghezze, punti di controllo e altri parametri intrinseci.

A Figura 18 sono riportati alcuni nodi comunemente utilizzati per le curve.

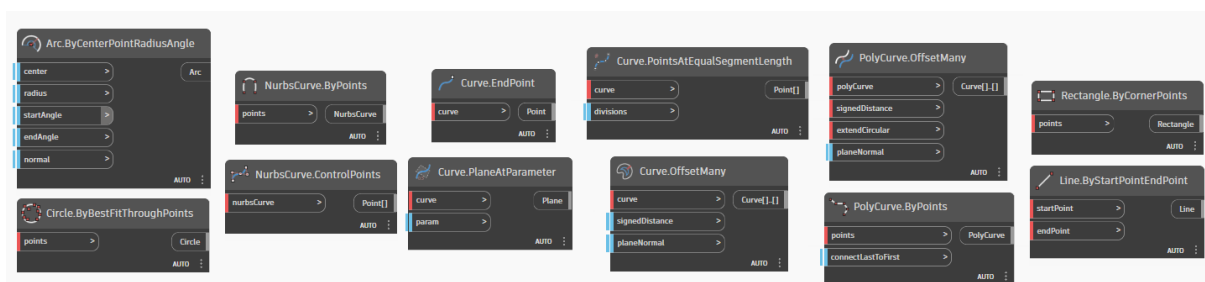


Figura 18: Esempi di nodi per le curve.

Le **superfici** sono entità bidimensionali definite da funzioni matematiche e due parametri, generalmente indicati come U e V. In Dynamo, le superfici possono essere create a partire da curve o punti, e sono utilizzate per modellare elementi come facciate, tetti e altre strutture architettoniche complesse. Le superfici presenti in Dynamo possono essere superfici semplici, superfici nurbs o polisuperfici.

Le *Surfaces* possono essere create per punti perimetrali, facendo loft o sweep di curve o da unioni; è possibile trovare vari dati come normale o tangente in un punto, perimetro, area, punti in determinati parametri, offset. Le *Nurbs Surfaces* possono essere create per punti appartenenti, per punti di controllo, in base a punti e tangenti. Le *Poly Surfaces* sono costruite a partire da loft, sweep o da solidi.

A Figura 19 sono riportati alcuni nodi più utilizzati per le superfici.

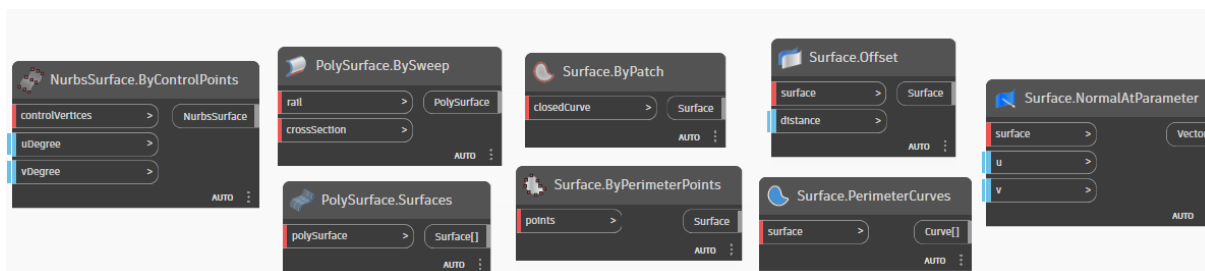


Figura 19: Esempi di nodi per le superfici.

I **solidi** rappresentano entità tridimensionali con volume definito. Possono essere creati mediante l'estrusione di superfici, la rivoluzione di curve o l'unione di più superfici chiuse. I solidi sono composti da facce, spigoli e vertici, e possono essere analizzati e manipolati attraverso nodi specifici che ne esplorano la topologia. Essi sono essenziali per la modellazione di elementi costruttivi come muri, colonne e altri componenti strutturali.

I solidi comuni come *cono*, *cubo*, *cilindro* e *sfera* possono essere costruiti in base a spigoli, vertici, raggi o lati; si possono poi estrapolare tutti i parametri specifici del solido. Oltre a quelli comuni si possono creare i *solidi* da operazioni come loft, rivoluzioni, sweep e unione. A Figura 20 sono riportati alcuni nodi per i solidi citati.

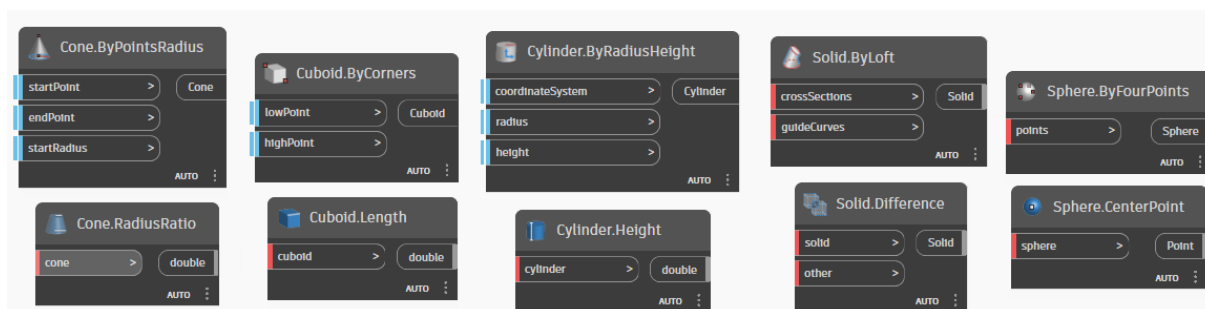


Figura 20: Esempi di nodi per i solidi.

La categoria **IMPORT-EXPORT** ha nodi dedicati alla gestione dei dati che consentono di importare ed esportare informazioni in vari formati. Questi nodi permettono, ad esempio, di leggere dati da **file CSV o Excel**, trasformandoli in liste o tabelle utilizzabili all'interno di Dynamo. Analogamente, è possibile esportare dati generati in Dynamo verso file esterni, facilitando la condivisione e l'analisi dei risultati. Per l'importazione e l'esportazione si utilizzano tutta una serie di nodi che consentono di navigare tra directory, verificare l'esistenza di file o cartelle, creare nuove directory e gestire percorsi di file.

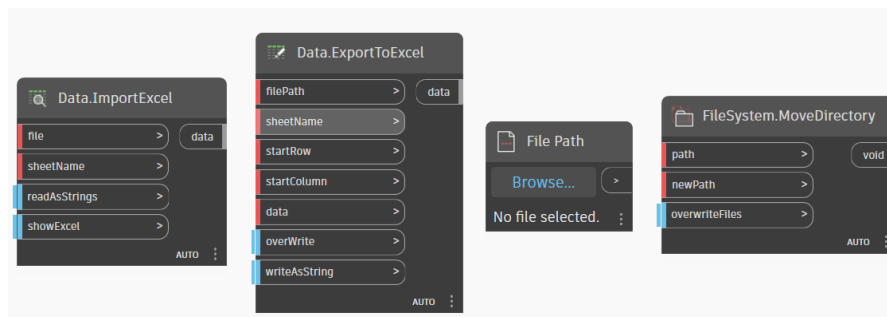


Figura 21: Esempi di nodi per l'importazione ed esportazione di dati.

La categoria **LIST** rappresenta un elemento fondamentale per la manipolazione e l'organizzazione dei dati all'interno dell'ambiente di programmazione visiva. Gli elenchi (o liste) costituiscono strutture dati versatili che consentono di gestire collezioni ordinate di elementi,

facilitando operazioni iterative e la gestione di dati complessi.

Le liste in Dynamo sono raccolte ordinate di elementi, che possono essere di qualsiasi tipo, come numeri, stringhe o geometrie. Queste possono essere create e riordinate attraverso una serie di nodi dedicati. Per le liste ci sono sottocategorie di nodi per generare, ispezionare, combinare, modificare e organizzare liste.

Le liste possono essere **generate** da una serie di input, da range di numeri, cicli o ripetizioni di elementi e unioni di list. I nodi di **ispezione** servono per trovare il numero di elementi, quanti sono veri, quanti falsi, per visualizzare elementi ad un indice specifico, trovare massimo o minimo e altre condizioni. Le **modifiche** riguardano l'aggiunta di elementi, la divisione della lista, l'eliminazione di voci, filtro o scan della lista. La lista può essere **organizzata** in modo casuale, si può trasporre, invertire, riordinare ecc. Alcuni nodi più utilizzati sono riportati alla Figura 22.

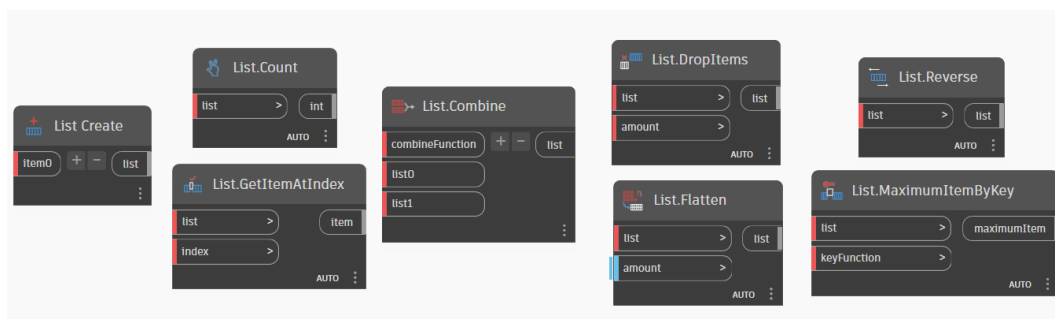


Figura 22: Esempi di nodi per le liste.

Dynamo supporta anche la creazione di **elenchi nidificati**, ovvero elenchi che contengono altri elenchi come elementi. Questa struttura gerarchica consente di rappresentare dati multidimensionali, come matrici o tabelle, e di organizzare informazioni complesse in modo strutturato. La gestione di elenchi di elenchi richiede una comprensione approfondita delle operazioni di accesso e manipolazione, poiché le operazioni devono considerare i diversi livelli di profondità della struttura.

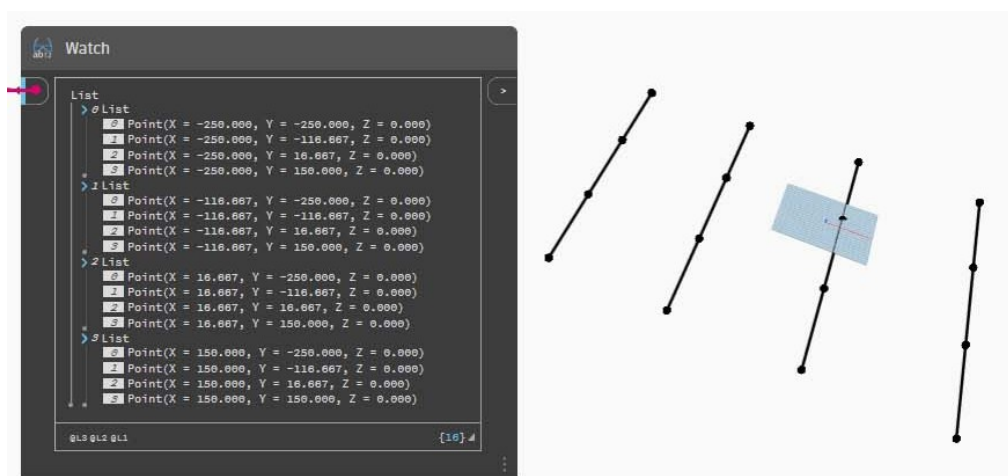


Figura 23: Esempio di lista nidificata (Dynamo Development Team 2024).

La categoria **REVIT** contiene diversi gruppi di nodi progettati per interfacciarsi direttamente con il software Autodesk Revit. Questi nodi sono progettati per interagire con l'API di Revit, consentendo operazioni quali la selezione, la modifica e la creazione di elementi direttamente nel modello BIM.

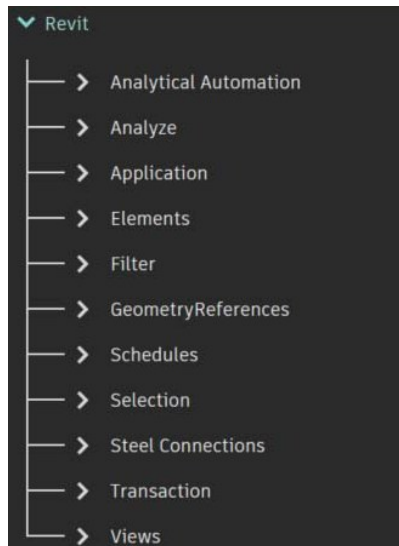


Figura 24: Categoria REVIT libreria nodi Dynamo.

La **selezione** degli elementi può avvenire in diverse modalità. La selezione diretta tramite clic consente di scegliere un elemento completo del modello o parti specifiche della sua topologia, come una faccia o un bordo. Questa selezione rimane dinamicamente collegata all'oggetto di Revit, garantendo che eventuali aggiornamenti nel file di Revit si riflettano automaticamente nel grafico di Dynamo. Inoltre, è possibile utilizzare menu a discesa per creare un elenco di tutti gli elementi accessibili in un progetto di Revit, permettendo di fare riferimento a elementi non necessariamente visibili in una vista. Un'altra opzione consiste nella selezione di elementi di Revit in base a livelli specifici nella gerarchia di Revit, offrendo un'opzione potente per personalizzare grandi insiemi di dati in preparazione alla documentazione o all'istanziatura generativa.

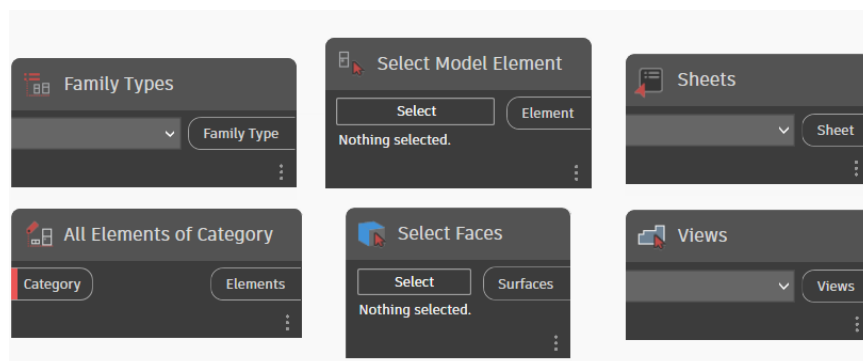


Figura 25: Esempi nodi di selezione categoria Revit.

La **modifica** degli elementi direttamente da Dynamo è molto utile per cambiare i parametri da un elenco di dati. Ad esempio, un algoritmo generativo o i risultati di una simulazione possono essere utilizzati per guidare i parametri di un array di elementi. In questo modo, un insieme di istanze della stessa famiglia può avere proprietà personalizzate nel progetto di Revit. I parametri di tipo e di istanza possono essere modificati da Dynamo, ma è fondamentale utilizzare il tipo di dato corretto (stringa, numero, dimensione, ecc.) quando si assegnano parametri da Dynamo. Inoltre, Dynamo può essere utilizzato in combinazione con vincoli parametrici definiti nelle proprietà di una famiglia di Revit.

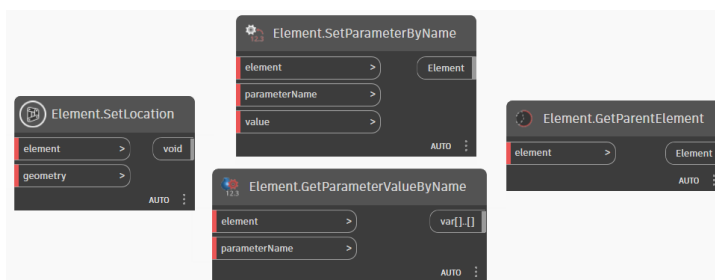


Figura 26: Esempi nodi di modifica categoria Revit.

Dynamo consente la **creazione** di una serie di elementi di Revit con controllo parametrico completo. I nodi di Revit in Dynamo offrono la possibilità di importare elementi da geometrie generiche in tipi di categoria specifici, come muri e pavimenti. Un esempio significativo è l'utilizzo di *componenti adattivi*, una categoria di famiglia flessibile che si presta bene alle applicazioni generative. Durante la creazione dell'istanza, è possibile generare un elemento geometrico complesso controllato dalla posizione fondamentale dei punti adattivi. Questo approccio consente di unire la concettualizzazione, la documentazione e la fabbricazione in un workflow senza problemi, creando un processo più intelligente ed efficiente per l'interoperabilità.

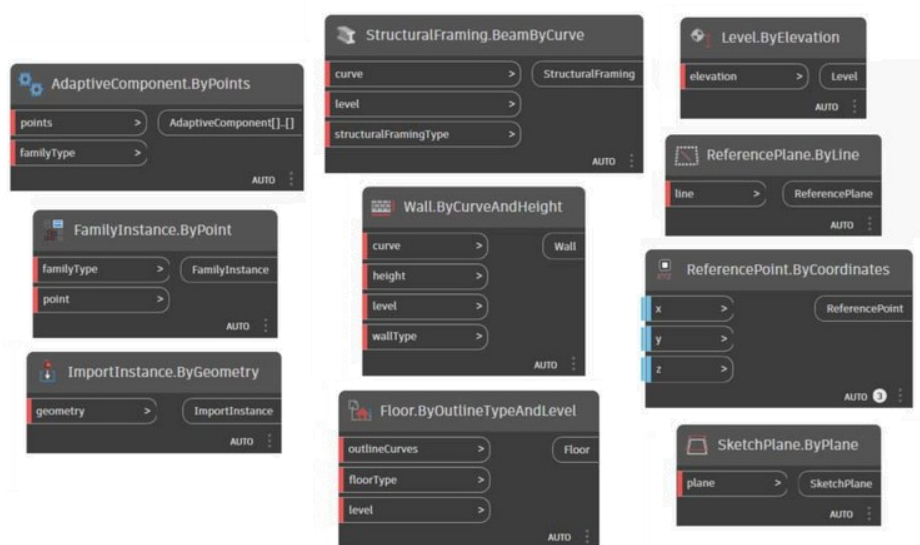


Figura 27: Esempi nodi di creazione della categoria Revit.

La categoria **SCRIPT** sono presenti due strumenti fondamentali che consentono l'estensione e la personalizzazione dei flussi di lavoro attraverso la programmazione testuale: il Code Block e il nodo Python. Entrambi offrono modalità diverse di interagire con i dati e con l'ambiente di Dynamo, fornendo agli utenti un livello più avanzato di controllo rispetto alla sola programmazione visiva.

I **code block** costituiscono l'interfaccia principale per l'inserimento di script testuali in Dynamo. Questi blocchi permettono agli utenti di definire variabili, eseguire operazioni matematiche, creare strutture dati complesse e richiamare funzioni, il tutto all'interno di un singolo nodo. *DesignScript*, il linguaggio utilizzato nei blocchi di codice, è progettato per essere leggibile e conciso, offrendo un riscontro immediato e adattandosi sia a operazioni semplici che a interazioni complesse di grandi dimensioni. Questa integrazione tra scripting testuale e programmazione visiva consente una transizione fluida tra i due paradigmi, permettendo agli utenti di convertire nodi visivi in codice e viceversa, facilitando l'apprendimento e l'efficienza nella creazione di script.

Con il code block gli utenti possono definire variabili, creare elenchi, eseguire operazioni matematiche e logiche, e definire funzioni personalizzate. Lo scripting è particolarmente utile per implementare loop, ricorsione e per accedere a librerie esterne. DesignScript, in particolare, è adatto per la creazione di funzioni personalizzate e per la compressione di operazioni complesse in blocchi di codice concisi.

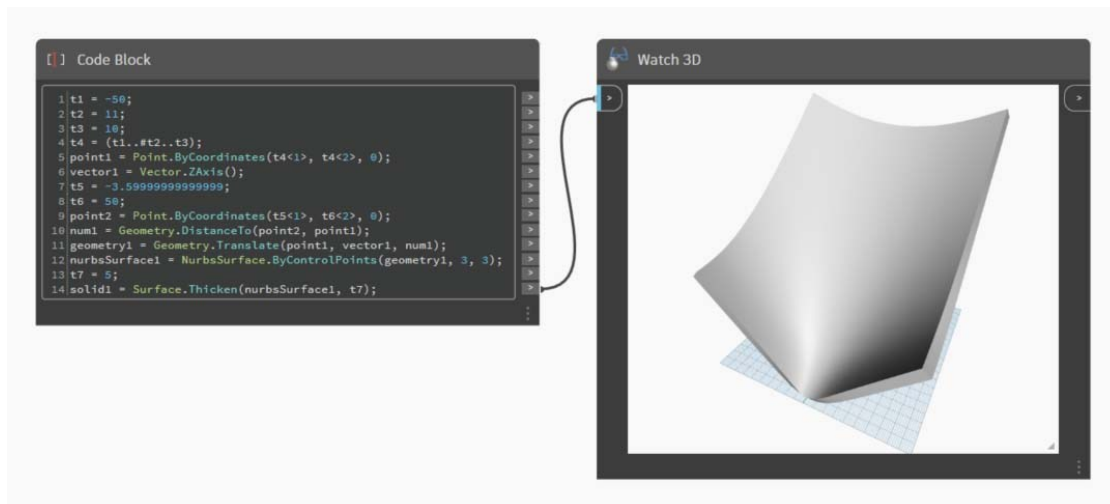


Figura 28: Esempio di code block per la creazione di una superficie 3D (Dynamo Development Team 2024).

I **nodi python** offrono la possibilità di scrivere script personalizzati utilizzando il linguaggio Python, sono particolarmente utili quando le operazioni richieste superano le capacità dei nodi standard ma soprattutto dei code block. Per utilizzare un nodo Python, è necessario importare le librerie appropriate, come *ProtoGeometry* per le operazioni geometriche e *RevitNodes* per interagire con gli elementi di Revit.

Per facilitare l'utilizzo di Python in Dynamo, è possibile configurare un **modello di script Python** predefinito. Questo modello include le importazioni standard e le configurazioni necessarie per interagire con Revit, riducendo il tempo necessario per impostare ogni nuovo script. La configurazione del modello avviene modificando il file `DynamoSettings.xml` e specificando il percorso del file di modello Python.

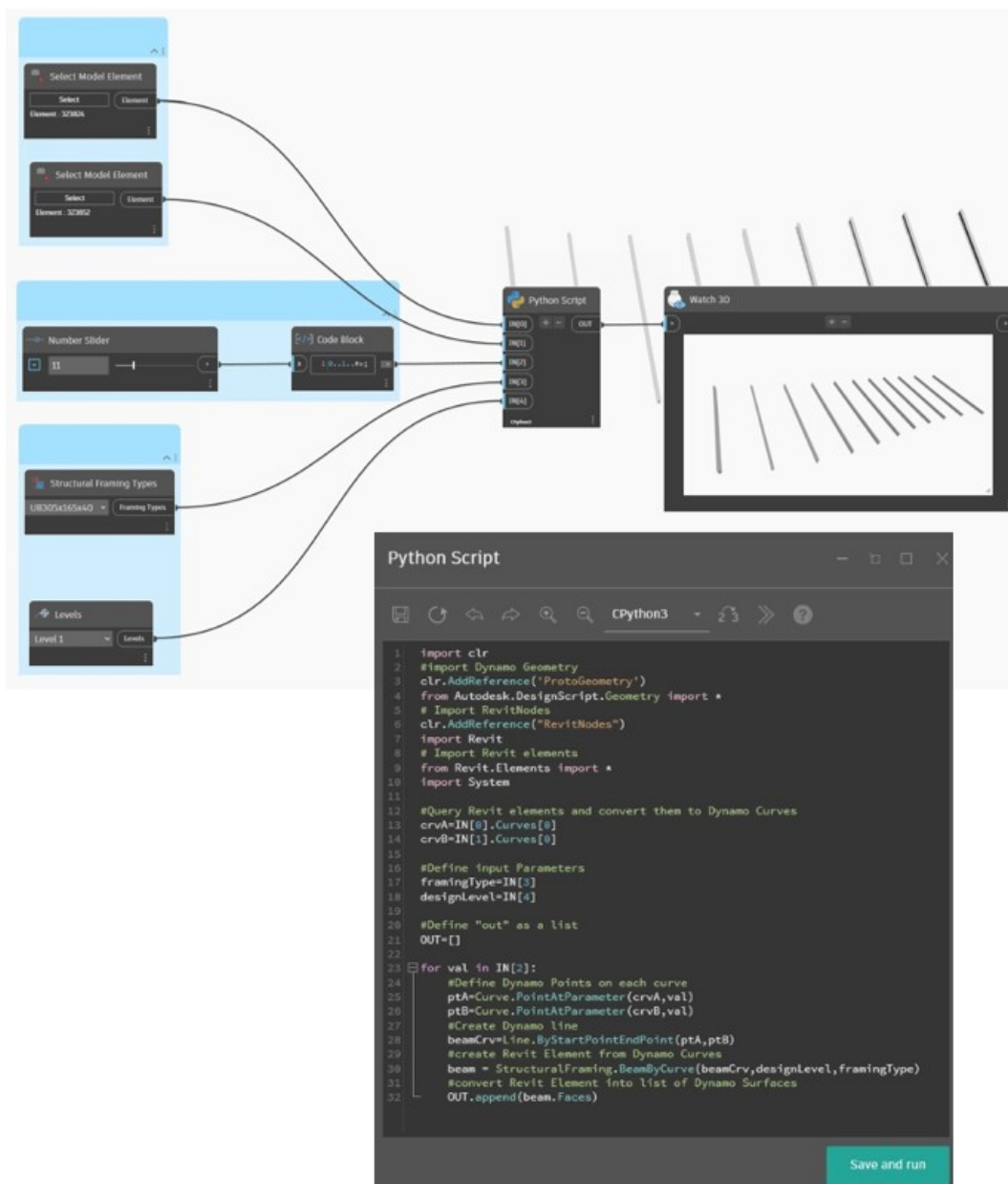


Figura 29: Esempio di utilizzo nodo Python (Dynamo Development Team 2024).

Tutti i contenuti esposti riguardanti il funzionamento di Dynamo sono stati ricavati dalla guida *Dynamo Primer* (Dynamo Development Team 2024).

3 INTRODUZIONE ALL'ANALISI STRUTTURALE FEM

La modellazione FEM (Finite Element Method, ovvero Metodo degli Elementi Finiti) è una tecnica numerica fondamentale per l'analisi e la simulazione di problemi complessi in ambito ingegneristico. Questo approccio consente di suddividere una struttura o un componente in una rete di elementi più semplici (mesh), sui quali vengono risolte le equazioni fisiche che descrivono il comportamento del sistema. La modellazione FEM trova applicazione in numerosi settori, tra cui l'analisi strutturale, termica, fluidodinamica e l'elettromagnetismo, permettendo di prevedere con precisione la risposta di materiali e strutture a diversi tipi di sollecitazioni (SmartCAE 2025).

Nel panorama industriale e accademico esistono diversi software dedicati alla modellazione FEM, ciascuno con caratteristiche specifiche e ambiti di eccellenza come Ansys, Abaqus, HyperWorks. Tra i software specializzati per l'ingegneria civile, **Midas Civil** si distingue come una soluzione avanzata e integrata per l'analisi e la progettazione di infrastrutture, in particolare ponti.

Dotato di un motore FEM general purpose, Midas Civil offre strumenti specifici per la modellazione, l'analisi strutturale e la verifica normativa di ponti in calcestruzzo, acciaio e strutture composite. Il software include funzionalità avanzate per la gestione delle fasi costruttive, l'analisi della precompressione, la simulazione di carichi mobili e l'ottimizzazione delle forze nei cavi. Grazie a un'interfaccia intuitiva e a wizard dedicati, Midas Civil consente di modellare rapidamente strutture anche molto complesse, risultando uno degli strumenti più apprezzati da progettisti e società di ingegneria specializzate in opere infrastrutturali (CSPFea, 2025).

3.1 Midas Civil: software per l'analisi strutturale avanzata

Midas Civil è un software avanzato per l'analisi strutturale e la progettazione di ponti e infrastrutture civili, sviluppato per rispondere alle esigenze dell'ingegneria moderna. Si tratta di un sistema FEM (Finite Element Method) di nuova generazione, specificamente concepito per offrire prestazioni elevate nella modellazione di strutture complesse. La sua architettura è pensata per integrare potenza analitica, facilità d'uso e conformità normativa, rendendolo uno strumento affidabile e completo per ingegneri strutturisti e progettisti di infrastrutture.

Il programma dispone di un'interfaccia intuitiva e user-oriented. Infatti, l'ambiente grafico è progettato per essere simile a quello dei software CAD, facilitando la modellazione grazie a un'interazione diretta con il modello geometrico. Gli utenti possono creare strutture complesse come se le stessero disegnando, con strumenti visuali semplici e potenti.

Midas Civil offre numerosi wizard e strumenti guidati per la creazione rapida di ponti 3D, comprese tipologie complesse come ponti a travata, ad arco o strallati. La generazione automatica delle mesh finite consente un'analisi accurata riducendo tempi e possibilità di

errore. Il programma permette la simulazione dettagliata delle fasi costruttive, inclusa la gestione del creep e del ritiro del calcestruzzo, nonché delle variazioni termiche e delle precompressioni. Questo consente un'analisi realistica del comportamento strutturale nel tempo. Inoltre, è compatibile con un ampio spettro di codici normativi, inclusi Eurocodici, AASHTO, JTG e altri. Questo lo rende adatto a progetti in diversi paesi, facilitando l'adattamento alle normative locali e migliorando l'efficienza nel controllo della conformità.

Midas Civil è ideale per l'analisi strutturale avanzata e la progettazione ingegneristica di: Ponti a cassone in calcestruzzo armato precompresso (CAP), compositi acciaio-calcestruzzo, sospesi e strallati, infrastrutture complesse e su larga scala (CSPFea 2025a). Inoltre, il software consente la modellazione e l'analisi di **superfici curve e geometrie complesse**, come quelle presenti in viadotti a sviluppo planimetrico curvo, impalcati a geometria variabile, archi inclinati o travi caudate.

Grazie agli strumenti CAD-like e alla flessibilità nella definizione delle coordinate geometriche, è possibile costruire con precisione elementi strutturali tridimensionali non convenzionali, mantenendo l'accuratezza nella generazione delle mesh e nell'applicazione dei carichi. Questo rende il software particolarmente adatto a ponti con sviluppo curvilineo, impalcati inclinati, o strutture a doppia curvatura, come nelle architetture più complesse e innovative.

Il programma utilizza un sistema avanzato di generazione automatica delle **mesh**, in grado di discretizzare superfici e volumi anche complessi mediante elementi *beam*, *plate* e *solid*. L'algoritmo di meshatura garantisce una distribuzione regolare degli elementi, rispettando le geometrie curve e minimizzando le distorsioni angolari, essenziali per mantenere l'accuratezza nei risultati.

Sono supportati una vasta gamma di **carichi statici e dinamici**, applicabili anche su superfici non piane e su elementi con orientamenti spaziali variabili. I carichi statici principali sono: carichi concentrati (nodali o su punti specifici della mesh), carichi distribuiti (uniformi o variabili lungo superfici curve), carichi da traffico secondo normative (es. Eurocodice, AASHTO) e carichi da temperatura, precompressione, variazioni reologiche.

Come carichi dinamici il software consente di definire: dynamic nodal loads, dynamic pressure / line loads, moving load, seismic loads / ground motion input, carichi periodici o armonici, user-defined dynamic functions.

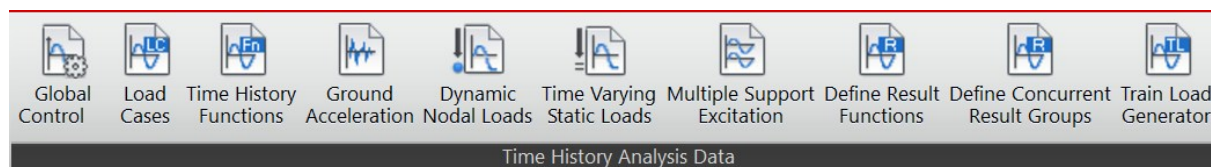


Figura 30: Dynamic Load di Midas Civil.

I *Dynamic Nodal Loads* sono forze concentrate applicate a nodi specifici della struttura, il cui valore varia nel tempo secondo una funzione definita. Rappresentano uno strumento fondamentale per simulare azioni impulsive, vibrazioni localizzate, effetti transitori o carichi mobili non uniformi. In MIDAS Civil, tali carichi possono essere definiti associando una funzione temporale (time function) all'intensità della forza, permettendo una rappresentazione realistica di eventi come urti localizzati, spinte transitorie o carichi dinamici veicolari.

Le forze possono essere applicate in una o più direzioni (X, Y, Z) e sono compatibili con modelli tridimensionali e superfici curve. La funzione temporale può essere definita in modo analitico (ad esempio, funzione sinusoidale, impulsiva, gradino) o numerico (tramite tabelle o dati sperimentali). Questo tipo di carico è tipicamente impiegato in analisi dinamiche nel dominio del tempo (time history analysis), dove è necessario osservare la risposta della struttura a stimoli transitori.

Le *Ground Acceleration* rappresentano l'input fondamentale per l'analisi della risposta sismica della struttura. In Midas, è possibile applicare accelerogrammi reali o sintetici direttamente alla base del modello o a porzioni di esso, per simulare gli effetti dinamici indotti dal moto del terreno durante un evento sismico.

Il software consente di assegnare questi input in una o più direzioni (longitudinale, trasversale, verticale) tramite curve tempo-accelerazione definite dall'utente o importate da database sismici. Tali carichi vengono utilizzati nell'ambito di diverse metodologie di analisi sismica.

The image displays two side-by-side dialog boxes from the MIDAS Civil software. The left dialog box is titled 'Dynamic Nodal Loads' and contains fields for 'Time History Load Case Name', 'Options' (Add, Replace, Delete), 'Function and Direction' (Function Name, Load Type, Direction: X, Y, Z), 'Arrival Time', and 'Scale Factor'. The right dialog box is titled 'Ground Acceleration' and contains fields for 'Time History Load Case Name', 'Function for Direction-X', 'Function for Direction-Y', 'Function for Direction-Z', and 'Angle of Horizontal Ground Acc.'.

Dynamic Nodal Loads

Time History Load Case Name

Options

☒ Add ☐ Replace ☐ Delete

Function and Direction

Function Name :

Load Type :

Direction : ☒ X ☐ Y ☐ Z

Arrival Time : 0 sec

Scale Factor : 1

Apply Close

Ground Acceleration

Time History Load Case Name

Function for Direction-X

Function Name : NONE

Scale Factor : 1

Arrival Time : 0 sec

Function for Direction-Y

Function Name : NONE

Scale Factor : 1

Arrival Time : 0 sec

Function for Direction-Z

Function Name : NONE

Scale Factor : 1

Arrival Time : 0 sec

Angle of Horizontal Ground Acc.

0 [deg]

Figura 31: Dynamic Nodal Load e Ground Acceleration in Midas Civil.

La corretta definizione delle condizioni al contorno è essenziale per la realizzazione di un modello strutturale realistico. Il software offre una vasta gamma di strumenti per la definizione dei **vincoli** e delle **connessioni**, con particolare attenzione alla versatilità e all'aderenza al comportamento reale delle strutture.

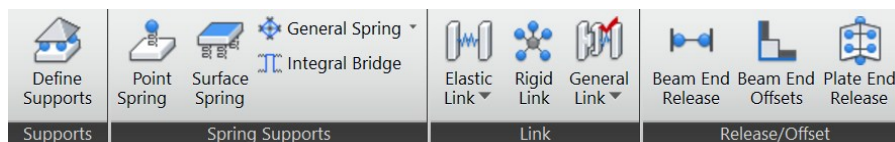


Figura 32: Tipologie di vincoli in Midas Civil.

I *Supports* generici comprendono gli appoggi fissi, mobili e incernierati, definiti in modo puntuale o su più gradi di libertà. Possono essere assegnati su qualsiasi nodo, anche appartenente a superfici curve o geometrie complesse, e sono fondamentali per simulare le condizioni di vincolo reali dei supporti strutturali.

Tra gli *Spring Supports* è presente il *Point Spring* che è un vincolo elastico concentrato applicato a un nodo, che simula l'interazione con un mezzo deformabile (come il terreno o dispositivi elastici). È caratterizzata da una rigidità assegnabile nelle direzioni traslazionali e rotazionali, e può essere lineare o non lineare. Questo tipo di vincolo è adatto per modellare appoggi elastici, isolatori, connessioni flessibili e fondazioni puntuali. Oltre a questo, è presente il *Surface Spring* che rappresenta una rigidità elastica distribuita su una superficie (ad esempio una plate o un elemento solido), utile per simulare il contatto continuo con un mezzo come il terreno. La rigidità viene assegnata per unità di area e può essere lineare o bilineare. È adatta alla modellazione di fondazioni superficiali o strutture interrato.

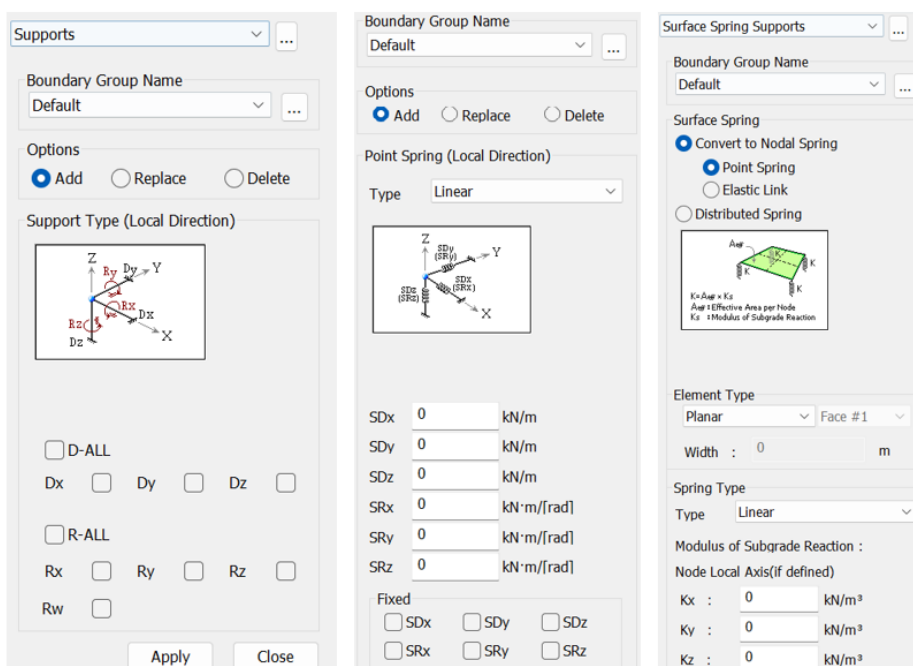


Figura 33: Supports e Spring Supports in Midas Civil.

Si possono utilizzare anche i *Link*. L'*Elastic Link* è un elemento che connette due nodi distinti, modellando una relazione elastica lineare o non lineare tra essi. È progettato per simulare componenti strutturali con rigidezza definita (in forza e/o momento) ma massa trascurabile, come giunti, dispositivi meccanici o interazioni tra sottosistemi. Il *Rigid Link* è un vincolo cinematico che impone una relazione di spostamento rigida tra due o più nodi. Questo collegamento non ha rigidezza propria, ma trasferisce completamente gli spostamenti o le rotazioni da un nodo principale (Master) a uno o più nodi secondari (Slave), come se fossero parte di un corpo rigido.

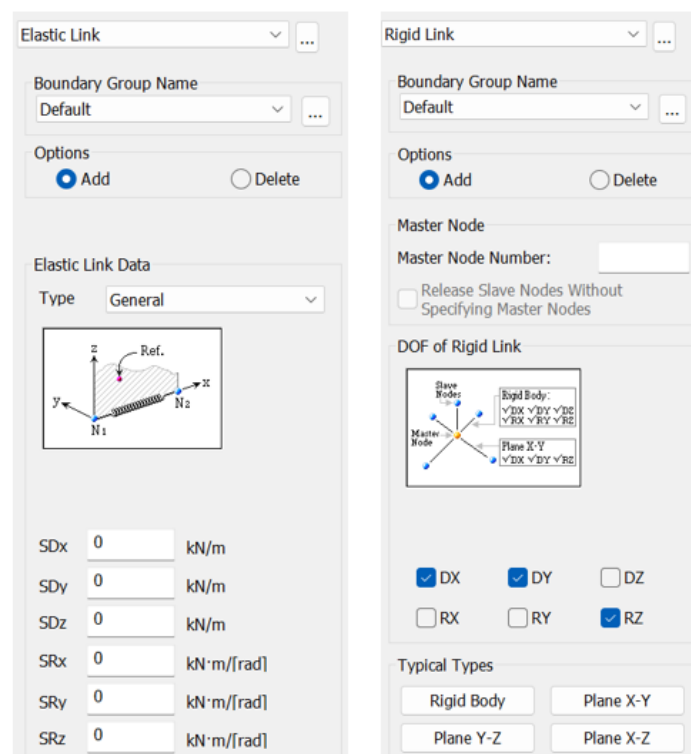


Figura 34: Elastic link e Rigid link in Midas Civil.

Midas Civil consente l'esecuzione di un'ampia gamma di analisi strutturali, sia statiche che dinamiche, con un'elevata flessibilità nella gestione della complessità strutturale e dei fenomeni fisici coinvolti.

Con le **analisi statiche**, è possibile effettuare *analisi lineari* assumendo un comportamento elastico dei materiali. Tali analisi comprendono l'applicazione di carichi permanenti, variabili, ambientali (come vento e neve) e combinazioni secondo normative. È inoltre disponibile un modulo per l'*analisi termica*, che consente di valutare le sollecitazioni e le deformazioni indotte da gradienti di temperatura all'interno della struttura. Quando le condizioni lo richiedono, è possibile attivare l'*analisi non lineare statica*, che include sia le non linearità geometriche (come gli effetti del secondo ordine e i grandi spostamenti) sia quelle costitutive (come plasticizzazione, fessurazione e comportamento post-elastico del

calcestruzzo). Una modalità specifica di analisi non lineare è l'*analisi pushover*, utilizzata per valutare la capacità sismica della struttura attraverso l'applicazione incrementale di carichi laterali fino al collasso. Midas Civil consente anche l'esecuzione di *analisi di buckling*, finalizzate alla determinazione dei carichi critici associati all'instabilità elastica.

Per quanto riguarda le **analisi dinamiche**, il software consente l'*analisi modale* tramite calcolo degli autovalori, utile per identificare frequenze naturali e modi di vibrazione, informazioni fondamentali per successive analisi sismiche. L'*analisi spettrale* viene condotta mediante spettri di risposta definiti da normativa o su base sperimentale, e consente di stimare in modo efficiente la risposta sismica della struttura, con supporto per metodi di combinazione modale come CQC e SRSS. Le *analisi time history* permettono invece di simulare la risposta strutturale a carichi variabili nel tempo, come terremoti o vibrazioni cicliche, utilizzando metodi di integrazione diretta o sovrapposizione modale. Il software supporta anche analisi sismiche avanzate, in cui è possibile modellare dispositivi di protezione come isolatori e smorzatori, nonché adottare modelli a fibre per elementi in calcestruzzo armato, al fine di rappresentare con accuratezza fenomeni non lineari complessi.

Tutti i contenuti esposti riguardanti il funzionamento di Midas Civil sono stati ricavati dalla guida *Midas Civil - On-line Manual - Civil structure design system* (MIDAS Information Technology Co. 2023).

1 LIMITI E CRITICITÀ NELLA MODELLAZIONE BIM E FEM

L'evoluzione del progetto architettonico e strutturale verso modelli sempre più complessi richiede l'adozione di strumenti e metodi in grado di garantire efficienza, flessibilità e rapidità operativa. Il tradizionale approccio manuale, sebbene ancora largamente utilizzato, presenta diverse criticità che compromettono la gestione efficace del modello, in particolare nei casi in cui la complessità sia determinata da ripetizioni di elementi, variazioni frequenti o mancanza di integrazione tra diverse discipline progettuali.

Un primo limite significativo è dato dalla **ripetitività** degli elementi. In molti progetti complessi, come infrastrutture o strutture prefabbricate, vi è una notevole presenza di componenti che si ripetono con variazioni minime. L'inserimento manuale comporta tempi elevati e una gestione dispendiosa dei parametri, poiché ogni occorrenza necessita di una personalizzazione puntuale. Un esempio emblematico è quello delle famiglie adattive in Revit, dove la molteplicità di istanze e la variabilità delle condizioni geometriche rendono il controllo manuale inefficiente, pur essendo possibile una parziale gestione tramite abachi (schedules). Tuttavia, tale metodo non è intuitivo e richiede comunque una fase di controllo e verifica manuale.

In secondo luogo, i **cambiamenti** in corso d'opera, dovuti all'avanzamento progettuale o a verifiche strutturali, richiedono aggiornamenti continui e tempestivi. Tali modifiche, se gestite manualmente, compromettono la coerenza del modello e rallentano il processo progettuale. Questo fenomeno è particolarmente evidente nella modellazione delle armature su superfici complesse, dove le modifiche alla forma dell'elemento strutturale rendono necessario l'aggiornamento manuale delle armature longitudinali e trasversali, con un notevole dispendio di tempo. Tali aggiornamenti, spesso legati alle iterazioni progettuali durante le fasi di verifica e calcolo, portano a un continuo rimaneggiamento del modello, con impatti negativi su tempi e costi.

Un ulteriore elemento critico riguarda la mancanza di **interoperabilità** tra modelli BIM e FEM. In assenza di un'integrazione nativa, le due dimensioni del progetto – architettonica e strutturale – evolvono parallelamente, costringendo il progettista a una duplicazione degli sforzi al momento dell'unificazione. L'assenza di un workflow condiviso ostacola la coerenza tra geometria, materiali e carichi, con ricadute sulla qualità e affidabilità dell'analisi strutturale. In tali casi, è frequente dover ricostruire manualmente il modello FEM sulla base di quello

architettonico, con il rischio di introdurre errori e incongruenze che potrebbero compromettere l'esito delle simulazioni.

Anche la modellazione impiantistica presenta limiti simili. L'inserimento manuale di tubazioni complesse (pipes e flexpipes) è soggetto a errori e richiede aggiornamenti continui in caso di variazioni geometriche. La difficoltà nell'agganciare le tubazioni in modo parametrico agli elementi architettonici rende il processo poco reattivo ai cambiamenti progettuali. In assenza di una gestione automatizzata, ogni variazione nella disposizione spaziale degli ambienti comporta un aggiornamento puntuale dell'impianto, con conseguente incremento dei tempi di lavorazione.

Queste difficoltà non solo impattano sulla qualità del progetto, ma riducono anche la capacità di sperimentazione e ottimizzazione. La rigidità di un modello manuale limita l'esplorazione di alternative progettuali, rendendo più difficile l'adozione di strategie basate sull'analisi comparativa o sulla simulazione di scenari. In un contesto in cui la sostenibilità e l'efficienza energetica sono sempre più centrali, la possibilità di testare rapidamente configurazioni differenti risulta cruciale.

2 STRATEGIE PER L'AUTOMAZIONE E LA PARAMETRIZZAZIONE DEI MODELLI

Al fine di superare le criticità precedentemente esposte, risulta strategico adottare soluzioni di modellazione parametrica tramite l'utilizzo di *script Dynamo*. Questo approccio consente di automatizzare la generazione, modifica e gestione degli elementi modellati, garantendo una maggiore flessibilità e un notevole risparmio di tempo. La logica della modellazione parametrica permette di codificare le regole generative del progetto, favorendo un controllo più preciso e coerente.

L'elemento centrale di tale approccio è la definizione di input univoci e parametri base in grado di governare la geometria del modello. In questo modo, è possibile descrivere ogni elemento attraverso un set minimo di variabili, da cui derivano tutte le configurazioni geometriche e dimensionali. Ad esempio, per una famiglia adattiva, è sufficiente definire il numero di punti di ancoraggio e le loro coordinate per determinare il posizionamento spaziale dell'elemento. In tal modo, l'aggiunta o la rimozione di punti comporta un aggiornamento automatico della geometria.

La parametrizzazione delle geometrie consente quindi una gestione flessibile delle varianti progettuali. Modificando solo i valori degli input, lo script Dynamo è in grado di rigenerare automaticamente il modello aggiornato. Tale meccanismo riduce drasticamente il tempo necessario per implementare modifiche, favorendo l'agilità del processo progettuale. In particolare, questo approccio si rivela estremamente utile in fasi iterative, come quelle della progettazione strutturale, dove è frequente la necessità di testare più soluzioni geometriche in tempi ristretti.

Una gestione ancora più efficiente è garantita dal collegamento a fogli Excel esterni, in

cui sono raccolti i valori degli input progettuali. In questo modo, il progettista può aggiornare i parametri direttamente dal foglio di calcolo, attivando l'automatismo dello script senza dover intervenire nel codice. Ciò consente di integrare le modifiche con rapidità e precisione, favorendo anche un approccio collaborativo tra i membri del team. Inoltre, tale metodo si presta a un utilizzo su larga scala, in cui più attori possono intervenire simultaneamente sul modello, ciascuno con un proprio ambito di responsabilità.

L'adozione di Dynamo permette anche di implementare controlli di coerenza automatizzati. Attraverso l'uso di condizioni logiche e filtri, è possibile verificare la congruenza dei dati inseriti, la correttezza delle dimensioni o il rispetto di vincoli progettuali specifici. Questa funzionalità riduce significativamente gli errori progettuali e migliora l'affidabilità complessiva del modello. Inoltre, è possibile realizzare visualizzazioni dinamiche che evidenziano criticità o incongruenze, facilitando l'intervento del progettista.

Infine, attraverso Dynamo è possibile collegare il modello BIM a quello FEM, creando una mesh coerente con la geometria dell'opera. Questo passaggio è fondamentale per garantire l'univocità del dato progettuale e per agevolare il passaggio alla fase di analisi strutturale senza discontinuità. La generazione automatica della mesh a partire da superfici medie calcolate dinamicamente consente di ridurre drasticamente le tempistiche normalmente richieste per la preparazione del modello di calcolo.

3 METODOLOGIA PER LA GENERAZIONE AUTOMATIZZATA DEI MODELLI BIM E FEM

Per validare le strategie sopra descritte è stato sviluppato un esempio basato sulla modellazione di una struttura con sezione ad U variabile, posizionata nello spazio lungo un tracciato tridimensionale. La struttura presenta una conformazione geometrica complessa, soggetta a variazioni lungo il percorso, e costituisce un banco di prova ideale per la sperimentazione delle potenzialità di Dynamo.

La modellazione è stata realizzata attraverso una famiglia adattiva, i cui parametri geometrici sono stati definiti in modo da renderli modificabili via script. Lo script Dynamo consente di posizionare la famiglia in base a un numero variabile di punti, definiti a partire da curve guida o coordinate impostate. Questo rende possibile adattare automaticamente la disposizione degli elementi alle modifiche del tracciato. La flessibilità del sistema permette, ad esempio, di aumentare la risoluzione del tracciato semplicemente incrementando il numero di punti di riferimento.

Le dimensioni della sezione sono state rese parametriche e collegate a un foglio Excel, da cui Dynamo legge i valori in tempo reale. In caso di variazioni progettuali, è sufficiente aggiornare i dati nel foglio per ottenere l'adeguamento immediato del modello. Questo si traduce in una riduzione drastica dei tempi di aggiornamento, evitando la necessità di intervenire manualmente su ogni singola istanza della sezione.

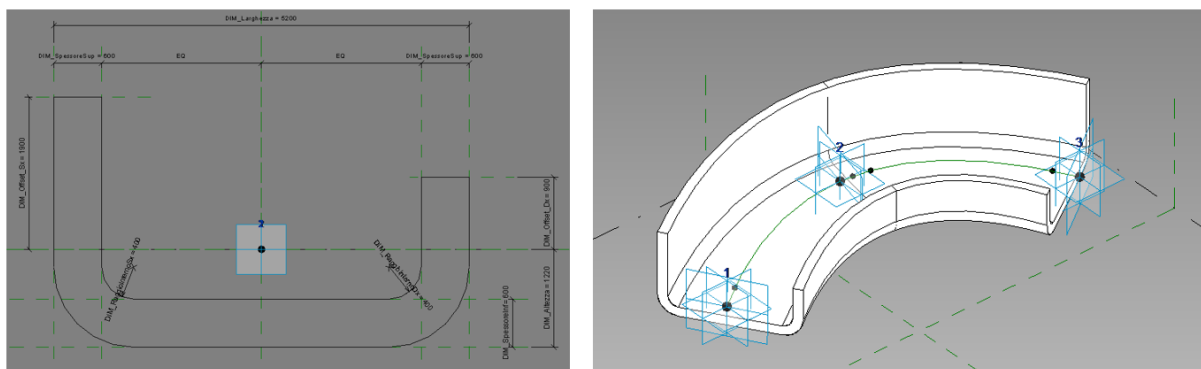


Figura 35: Sezione e famiglia adattiva, basata su 3 punti, con sezione ad U.

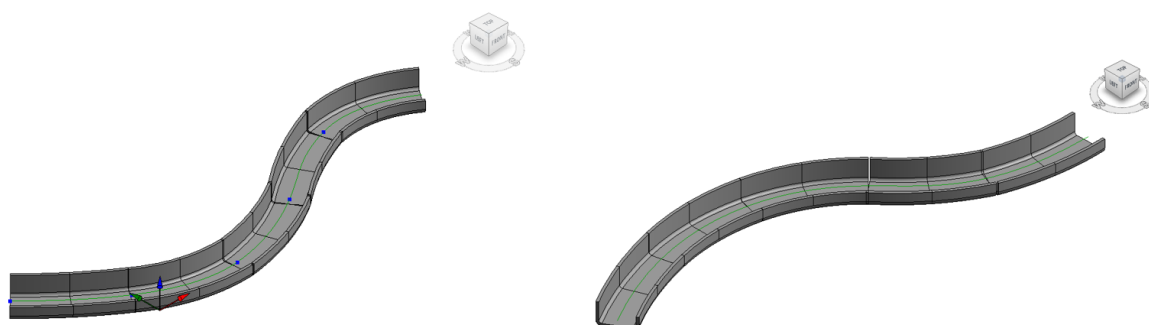


Figura 36: Prove di posizionamento dei conci.

Anche la modellazione delle armature è stata parametrizzata. Attraverso opportune leggi geometriche, le staffe e le armature longitudinali sono vincolate alla geometria dell'elemento strutturale. Ciò consente di garantire la coerenza automatica tra forma dell'elemento e caratteristiche dell'armatura, rendendo superfluo l'intervento manuale in caso di modifiche. Ad esempio, variazioni del passo delle staffe o della lunghezza delle barre longitudinali vengono aggiornate automaticamente in funzione delle nuove dimensioni dell'elemento.

Per quanto riguarda la modellazione impiantistica, lo script permette di calcolare dinamicamente il punto medio delle sezioni, da cui far passare le flexpipes. In questo modo, eventuali modifiche dello spessore o della posizione della sezione comportano automaticamente l'aggiornamento dei tracciati impiantistici. Tale approccio riduce la probabilità di interferenze tra impianti e struttura, favorendo una progettazione integrata e coordinata.

Infine, è stato implementato un modulo per la creazione della mesh FEM a partire dalla superficie media della struttura. Lo script calcola la superficie media tramite interpolazione tra le superfici piane costituenti, e ne genera una suddivisione controllata, utile ai fini dell'analisi strutturale. La mesh risultante è coerente con la geometria reale del modello BIM e consente un'analisi più accurata del comportamento strutturale.

Le esperienze maturate nella gestione dei modelli BIM tramite Dynamo evidenziano

chiaramente i vantaggi derivanti dalla parametrizzazione e automazione dei processi progettuali. Le criticità connesse alla ripetitività, alla difficoltà di aggiornamento e alla mancanza di interoperabilità possono essere superate attraverso l'uso di modelli adattivi e script dinamici.

Per verificare sul campo l'efficacia di tali metodologie, si è scelto di applicare quanto sperimentato al progetto di una Pista da Bob, un'opera caratterizzata da un'alta variabilità geometrica sia in pianta che in altezza. La pista, con il suo andamento sinuoso e le sue complesse esigenze strutturali, rappresenta un caso ideale per testare le potenzialità della modellazione parametrica. La realizzazione di script Dynamo specifici ha permesso di generare automaticamente la geometria, le armature, gli impianti e il modello FEM, dimostrando come l'integrazione tra BIM e automazione possa migliorare significativamente l'efficacia del processo progettuale.

L'adozione di tale approccio consente di affrontare in maniera più efficiente anche progetti futuri caratterizzati da forme non convenzionali, alta variabilità geometrica e interazione tra più discipline. La creazione di workflow dinamici, basati su script riutilizzabili e personalizzabili, apre la strada a una nuova concezione della progettazione architettonica e strutturale, in cui la tecnologia diventa un alleato nella gestione della complessità.

La direzione futura della progettazione parametrica BIM prevede l'integrazione con algoritmi di intelligenza artificiale per l'ottimizzazione automatica delle soluzioni progettuali. In prospettiva, Dynamo potrà fungere da interfaccia tra il modello BIM e sistemi di calcolo in grado di generare alternative progettuali ottimizzate in base a criteri prestazionali, economici o ambientali. Questo passaggio rappresenta un ulteriore salto di qualità nell'evoluzione della progettazione digitale.

Modellazione parametrica in ambiente BIM integrato con analisi FEM di superfici complesse: test sul progetto di una Pista da Bob
Cicioni Benedetta

TEST SUL PROGETTO DI UNA PISTA DA BOB

In questo capitolo si presenta il caso studio della Pista da Bob, al quale è stata applicata la modellazione parametrica presentata nei capitoli precedenti. La Pista, caratterizzata da una geometria complessa e un'estensione significativa, rappresenta un esempio ideale per testare l'automatizzazione del modello a partire da dati di input e script in ambiente Dynamo. Dopo un attento studio della documentazione di progetto, sono stati individuati i parametri geometrici principali per ricostruire la sezione della pista lungo una delle curve finali del tracciato. A partire dalle coordinate spaziali del percorso della pista e dalle dimensioni di alcune sezioni generiche, si è andati a ricostruire la sezione della pista lungo una delle ultime curve del tracciato. Successivamente, sono state integrate le armature e gli impianti interni coerenti con la geometria realizzata.

Il modello BIM è stato quindi convertito in un modello FEM utilizzando lo stesso metodo di programmazione della parte geometrica, per analizzare le sollecitazioni dovute al carico del Bob, al sisma e ad altri carichi permanenti e accidentali. Infine, si confrontano i risultati ottenuti da una modellazione semplificata, applicata in fase di progettazione, con quelli di una modellazione più dettagliata, evidenziando vantaggi e limiti di ciascun approccio.

L'obiettivo principale di questo capitolo è dimostrare l'efficacia della modellazione parametrica e la sua adoperabilità nell'ambito di una progettazione strutturale.

1 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO

Per le Olimpiadi Invernali e Paralimpiadi di Milano-Cortina il progetto della Pista da Bob, Skeleton e Slittino vede la sua esecuzione a Cortina. Il progetto è stato affidato a Simico che ha firmato l'accordo con l'impresa Pizzarotti. La progettazione specialistica del tracciato e dell'impianto di refrigerazione della pista sono state affidate al raggruppamento Temporaneo di Imprese (RTI): ITS Engineering S.r.l. - Coordinamento Progettazione Specialistica, Energytech Ingegneri S.r.l. - Progettazione Impianti, Ingenieurgesellschaft Pardeller S.r.l. - Progettazione Strutture, IBG + Partner - Progettazione Tracciato, Basler & Hofmann Deutschlan GmbH - Progettazione Strutture.

Cortina ospiterà le gare di Curling e Wheelchair Curling, le gare di Bob, Skeleton, Slittino, sci alpino femminile Olimpico e Paralimpico, e il Para snowboard. Il progetto prevede la riqualificazione della pista esistente "Eugenio Monti", la pista infatti è stata chiusa nel 2007 perché inadeguata ai più moderni requisiti definiti dalle Federazioni internazionali International Bobsleigh & Skeleton Federation (Ibsf) e Fédération Internationale de Luge de course (Fil).

Prima della chiusura la pista ha ospitato svariate competizioni di livello internazionale dagli anni '30 fino all'anno 2000, tra cui le Olimpiadi del 1956.

Il progetto è stato sviluppato in sinergia con le federazioni sportive internazionali (IBSF e FIL) per garantire la conformità agli standard tecnici delle discipline coinvolte, oltre che con enti territoriali e organizzazioni dedicate all'accessibilità, per assicurare un impianto inclusivo e sostenibile. Sono state adottate soluzioni progettuali che, pur semplificando alcune strutture per contenere i costi, mantengono intatte le funzionalità sportive e la sicurezza degli atleti. L'intervento comprende non solo la pista, ma anche nuovi edifici e infrastrutture, con l'obiettivo di valorizzare la tradizione ampezzana negli sport di scivolamento e proiettarla nel futuro. Le informazioni sopra citate sono state estrapolate dall'elaborato "Relazione descrittiva generale" del progetto esecutivo.

1.1 Storia dello sport

Il bob è uno sport invernale nato alla fine dell'Ottocento, quando ad Albany, New York, alcuni appassionati unirono pattini a slitte tradizionali per gareggiare su strade innevate. Diffusosi rapidamente in Svizzera e poi in tutta Europa, il bob divenne presto uno sport organizzato: nel 1897 nacque il primo club e nel 1902 fu costruita la prima pista dedicata. Il bob è presente ai Giochi Olimpici Invernali fin dalla prima edizione del 1924, inizialmente solo con la gara a quattro, cui si aggiunse quella a due nel 1932 e, più recentemente, le competizioni femminili e il monobob. In Italia il primo bob club fu fondato a Cortina d'Ampezzo, sempre qui si disputò la prima edizione del campionato italiano di bob a due maschile (Today.it 2024).

Lo sviluppo dello sport è dovuto alle federazioni internazionali che governano gli sport del bob, skeleton e slittino. La più importante è la **International Bobsleigh & Skeleton Federation** (IBSF), originariamente chiamata *Fédération Internationale de Bobsleigh et de Tobogganing* (FIBT), è stata fondata a Parigi il 23 novembre 1923 da delegati di Gran Bretagna, Francia e Svizzera e dai rappresentanti di Canada e Stati Uniti. Oggi, questa ha sede a Losanna e coordina e regola le competizioni internazionali di bob e skeleton, collaborando strettamente con il Comitato Olimpico Internazionale. La federazione organizza i campionati mondiali e le tappe di Coppa del Mondo e nel corso degli anni, ha introdotto innovazioni regolamentari e tecniche per garantire sicurezza e competitività. Inoltre, a IBSF si deve il merito di aver promosso l'inclusione di nuove discipline come il monobob e le gare femminili (IBSF 2025).

In Italia, fu fondata la **Federazione Italiana Sport Invernali** (FISI) nel 1920 a Torino dall'unione di tre club. La FISI assorbì nel 1933 il bob, lo skeleton e altre discipline del ghiaccio e ha avuto un ruolo centrale nella promozione e nell'organizzazione degli sport di scivolamento. Successivamente, le discipline del ghiaccio si sono organizzate anche nella **Federazione Italiana Sport del Ghiaccio** (FISG), mentre la nazionale italiana di slittino e di bob ha raccolto risultati di rilievo fin dagli anni '50, grazie anche a pionieri come Eugenio Monti e a una solida tradizione di club e impianti storici (FISI 2025).

Nello sport le competizioni principali sono il bob a due (pilota e frenatore), il bob a

quattro (pilota, frenatore e due interni), con gare sia maschili che femminili e anche il monobob femminile. La gara si svolge su una pista ghiacciata dove le squadre spingono una slitta per circa 40 metri per poi lanciarsi a bordo e percorrere il tracciato a velocità che possono superare i 130-140 km/h. Il pilota guida la slitta tramite due leve che controllano i pattini anteriori, mentre il frenatore interviene solo dopo il traguardo (Guida Olimpiadi 2011).

Le gare si articolano su più manche: per gli uomini sono previste quattro discese, per le donne due, e la classifica finale è determinata dalla somma dei tempi. L'ordine di partenza nelle varie manche segue criteri legati alla classifica mondiale e ai risultati delle manche precedenti. L'Italia vanta una lunga tradizione nel bob, con il primo club storico fondato proprio a Cortina d'Ampezzo, sede delle Olimpiadi Invernali del 1956 e futura sede dei Giochi di Milano Cortina 2026. L'Italia ha ottenuto risultati di rilievo nella storia del bob, grazie a campioni come **Eugenio Monti**, a cui è dedicata la pista originale di Cortina, e continua a investire nella crescita di questo sport sia a livello tecnico che organizzativo. Monti conquistò sei medaglie olimpiche (due ori, due argenti e due bronzi) tra il 1956 e il 1968, oltre a dieci titoli mondiali, di cui nove d'oro. Il suo nome è però legato anche a uno dei gesti di sportività più noti nella storia olimpica: durante i Giochi di Innsbruck 1964, prestò un bullone della propria slitta alla squadra britannica, permettendo loro di vincere l'oro davanti agli italiani. Per questo gesto gli fu assegnato il primo Trofeo Pierre de Coubertin per il fair play, simbolo dei valori olimpici. La storica pista di Cortina d'Ampezzo, costruita per i Giochi Olimpici Invernali del 1956, è stata teatro delle imprese di Monti e di molti altri campioni. Dopo la sua morte, nel 2004 la pista è stata intitolata a Eugenio Monti, diventando un simbolo della tradizione e dell'eccellenza italiana negli sport di scivolamento (Rotta 2010).

1.2 Architettura delle piste e caratteristiche del Bob

Le costruzioni che hanno preceduto le piste erano delle montagne di neve alte 12-14 metri, queste venivano costruite in coppia una di fianco all'altra ed era un modo per radunare i villaggi durante i periodi di festa. Spesso queste erano coronate da padiglioni o torri da cui far partire la discesa di 100-140m. Questo divertimento si è poi trasformato, nel tempo, nei moderni sport invernali. Le prime slitte erano fatte di guide metalliche, unite dalla tavola, e dotate di sterzo come mostrato alla Figura 37 (Komarova 2018).

Il **Bob sportivo moderno** è una slitta a due o quattro persone ed è costituita da un telaio articolato chiuso da un corpo aerodinamico realizzato in materiali compositi. Il profilo della slitta, la geometria dei pattini e la selezione dei materiali proviene da un attento studio per massimizzare velocità e allo stesso tempo assicurare stabilità e sicurezza. L'articolazione è studiata per effettuare le curve della pista in modo che i quattro pattini si aggrappino al ghiaccio, il pilota sterza e frena utilizzando delle barre collegate al meccanismo dei pattini.

Il telaio del Bob è diviso in asse anteriore e posteriore, queste due porzioni sono collegate tramite un perno di sezione circolare; poi il Bob poggia su quattro pattini ed in particolare una coppia è legata all'asse anteriore e una coppia all'asse posteriore. Il perno tra

le 2 porzioni permette la rotazione della parte anteriore rispetto a quella posteriore che rimane ferma (Figura 38). Il sistema di sterzo è collegato al telaio anteriore ed è composto in modo da avere due assi di rotazione: un asse verticale che permette una rotazione dei pattini nel piano parallelo al terreno e un asse longitudinale che permette la rotazione dei pattini rispetto all'asse del Bob per adattarsi al meglio alla sezione curva della pista. Dai regolamenti FIBT, 2014, le slitte devono avere un peso limite (incluso il peso dell'equipaggio): minimo 170 kg e massimo 340 kg per il 2-women bob, minimo 170 kg e massimo 390 kg per il 2-men bob, minimo 210 kg e massimo 630 kg per il 4-women/men bob. Anche le dimensioni devono rispettare i seguenti criteri (Figura 39): tra centro del pattino dentro e centro del sinistro $670 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$, dal centro dell'asse anteriore al centro dell'asse posteriore $1690 \text{ mm} \pm 30 \text{ mm}$ (2-women/men bob); $2130 \text{ mm} \pm 30 \text{ mm}$ (4-women/men bob).



Figura 37: Squadra svizzera di Bob da Davos, 1910 (Komarova 2018).

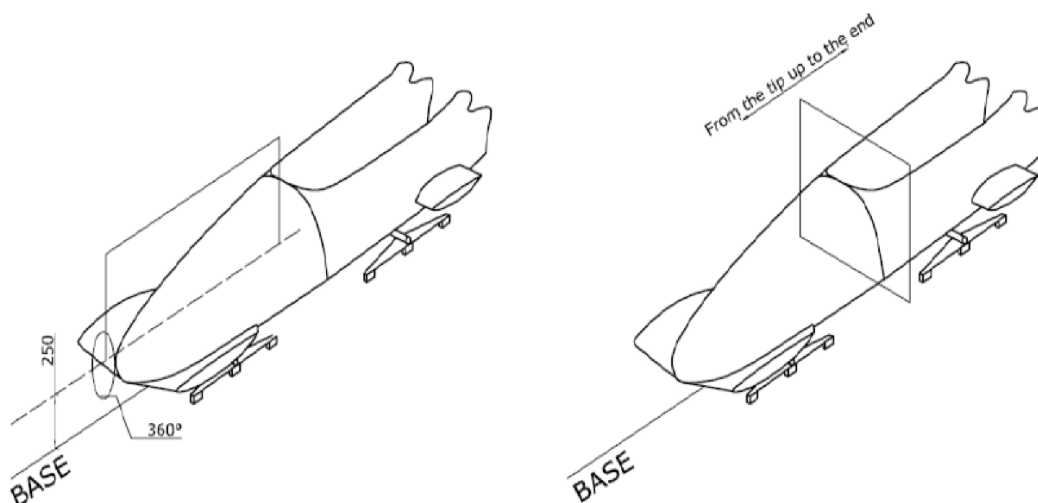


Figura 38: Schema assi di rotazione del Bob (FIBT 2014).

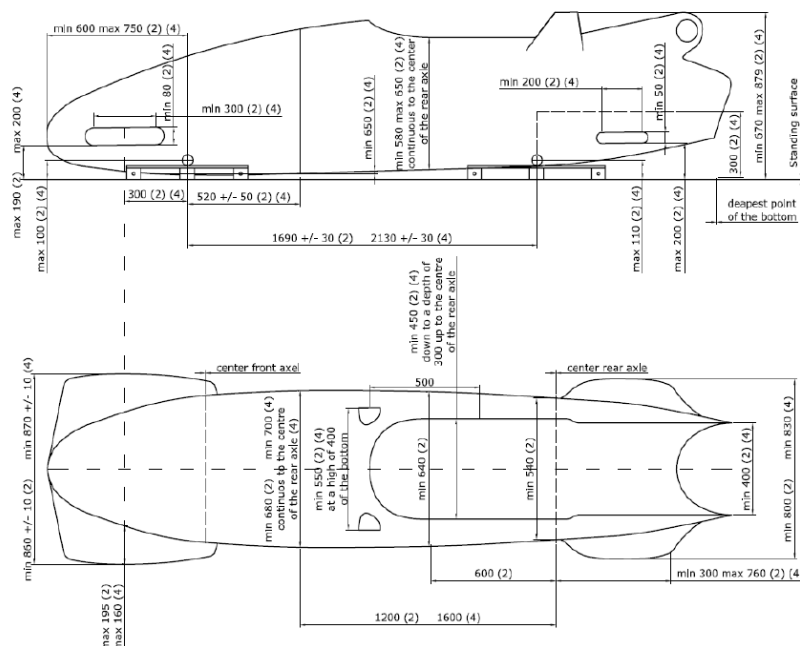


Figura 39: Dimensioni della slitta da regolamento (FIBT 2014).

La conformazione del Bob è dovuta principalmente alla necessità di adattarsi all'architettura delle piste. Le **Piste da Bob** hanno una lunghezza tra i 1200 e i 2000 m con un angolo di pendenza di circa 8-15%; le piste seguono tre aree principali, tra cui una prima area di accelerazione di lunghezza 350-400 m, l'area di massima performance, di 800-850 m in totale, con minimo 13 e massimo 20 curve e l'area finale di rallentamento di 350-400 m. Nell'area centrale, in cui si concentra la gara, ci possono essere diversi elementi sportivi (tipi di curve) di base e complementari:

Elementi di base

- Curva a sinistra o a destra, di 17°-19°;
- Elementi ad “S”, combinazioni di due curve;
- Tornanti, curve con un giro di 180°;
- Labirinto, combinazione di tre o più curve (sinistra-destra-sinistra o viceversa) con angoli tra 5° e 17° e con rettilineo di minimo 50 m.

Elementi complementari

- Curve doppie, due consecutive da un lato con un rettilineo minimo tra di esse;
- Anello, curva con cambio di direzione fino a 270° ;
- Giroscopio, curva con cambio di direzione fino a 360° ;
- Omega, combinazione di tre o più curve con un giro all'interno di 200° - 270° ;
- Strada a serpentina, combinazione di alcune curve con un cambio di direzione di ciascuna entro 170° - 180° ;
- Virgola, una singola rotazione con il cambio di direzione nell'intervallo di 3° - 15° .

Il progetto della pista tiene conto delle velocità e accelerazioni massime che può raggiungere la slitta. Per questo motivo, l'area di partenza è costituita da curve con piccoli angoli, così da garantire un'accelerazione graduale. Nell'area di massima prestazione, il bob può raggiungere un'accelerazione di $4,0g$ per massimo $t=3s$ ($1g=9,81m/s^2$). Nell'area finale, l'obiettivo della struttura è quello di garantire la sicurezza nella frenata, tramite curve semplici e una contropendenza obbligatoria che contribuisce al rallentamento.

Ogni curva è composta da un ingresso, una sezione radiale e un'uscita. L'ingresso e l'uscita della curva sono progettati per creare una transizione fluida tra tratti rettilinei e curvi; la loro lunghezza dipende dalla velocità stimata del Bob. Quest'ultima determina anche la lunghezza dei tratti rettilinei, che rappresentano circa il 40% della lunghezza totale del tracciato: la lunghezza minima di un rettilineo è di 9,5 m per velocità comprese tra 23,8 e 26,2 m/s, mentre è di almeno 15 m per velocità fino a 32 m/s (Komarova 2018).

Un altro aspetto importante è la scelta della geometria della sezione trasversale. Infatti, si utilizza una conformazione specifica per i tratti rettilinei e un'altra per quelli curvi.

La sezione in rettilineo è generalmente simmetrica e presenta una leggera concavità, simile a un canale. Le pareti laterali sono relativamente basse, ma sufficienti a contenere la slitta e a garantire che i pattini restino sempre a contatto con il ghiaccio. La larghezza della pista in questi tratti è solitamente compresa tra 1,30 e 1,50 metri, mentre l'altezza delle sponde può variare da 30 a 50 cm. Questa conformazione permette ai bob di mantenere alte velocità in piena sicurezza, minimizzando il rischio di ribaltamento.

Nelle curve, la sezione trasversale cambia radicalmente: la pista assume una forma parabolica o semicilindrica molto accentuata. Le pareti laterali diventano molto più alte e inclinate, arrivando anche a superare 2 metri nei punti più stretti delle curve più impegnative. Questa inclinazione (parabolica) è fondamentale per contrastare le forti accelerazioni laterali che i bob subiscono in curva. L'altezza e la curvatura delle sponde sono progettate in base al raggio della curva e alla velocità prevista, così da guidare la slitta lungo la traiettoria ottimale e prevenire uscite di pista o ribaltamenti (Andrea Tognina 2009).

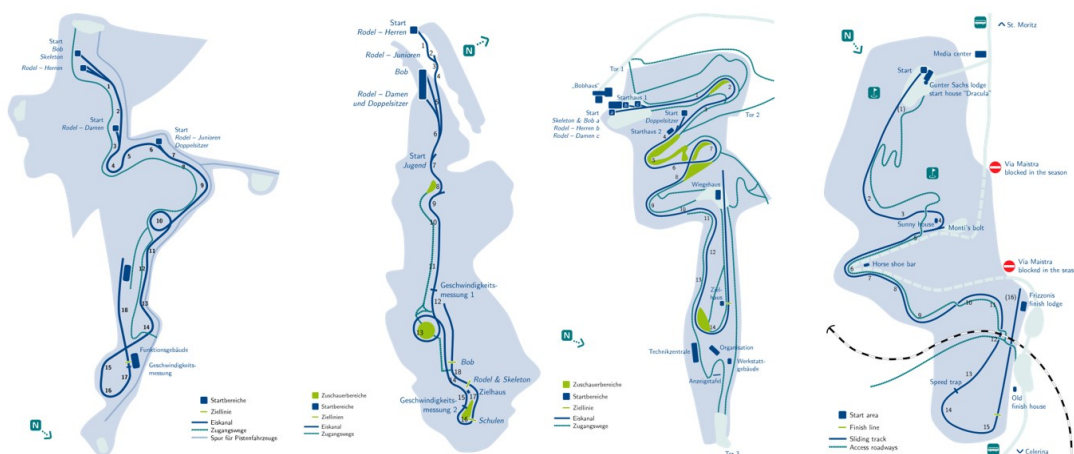


Figura 40: Pista di bob di Altenberg, di Koenigssee, di Winterberg e di St. Moritz.

1.3 Progetto per Milano-Cortina

La Pista “Eugenio Monti”, realizzata a Cortina per le Olimpiadi invernali del 1956, ormai è una struttura non più conforme alle norme attuali dello sport. Il progetto, dunque, prevede una rilettura della pista storica non più funzionante, facendo coesistere il vecchio tracciato con quello nuovo per ottenere una reciproca valorizzazione.

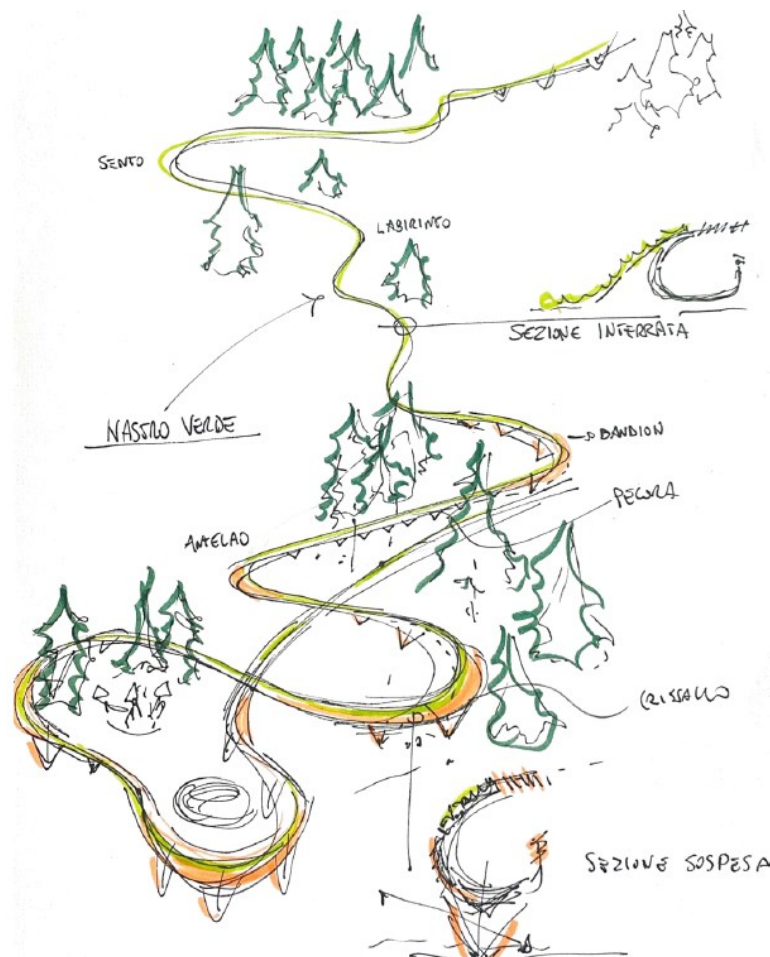


Figura 41: Schizzi Preliminari di progetto, dall'elaborato del progetto esecutivo "Relazione Tecnica sull'Architettura della Pista".

Affinché si possano svolgere le gare previste in questa edizione dei Giochi Olimpici 2026, la pista è stata studiata in modo da rispettare i requisiti di carattere tecnico, descritti al paragrafo Capitolo Terzo 1.2. Quanto più possibile, è stato mantenuto il tracciato e le curve della vecchia pista, in alcuni tratti si è aumentata la complessità delle curve per aumentare il grado di difficoltà per gli atleti. In questo modo è stata progettata una “pista selettiva” dal punto di vista tecnico, selezionando accuratamente le geometrie in modo da garantire la stessa esperienza di tracciato, ma portandola ad un livello di eccellenza tale da renderla, come in passato, una pista di rilievo mondiale. Infatti, nella parte finale è stato inserito un tratto in sovrapposizione che metterà alla prova le capacità e il valore dell'atleta.

Per la maggior parte del percorso il nuovo progetto si è rifatto a quello vecchio, variando in alcuni punti per affrontare le nuove esigenze. La differenza sostanziale si ha nella parte finale, ovvero dalla Curva Cristallo fino alla curva Antelao, in cui si è scelto di andare a creare una sovrapposizione creando l'elemento denominato *labirinto* e dove si trova il punto di massima velocità. Le informazioni sopra citate sono state estrapolate dall'elaborato del progetto esecutivo "Relazione Tecnica sull'Architettura della Pista".

Come riportato nell'elaborato "Relazione sulle tecnologie e modalità di realizzazione della pista", il tracciato è suddiviso in parti in rettilineo e parti in curva. Le parti in rettilineo sono 8 all'interno della lunghezza complessiva, per un totale di 277 m; inoltre, dopo la linea del traguardo è previsto un tratto rettilineo di 185 m di lunghezza per la frenata. Le parti in curva sono 16, sono tutte numerate in base alla progressiva e le più importanti hanno un nome assegnato, derivante dai nomi delle curve della pista storica.

Il progredire delle curve si può vedere alla Figura 42, il tracciato è costituito dai seguenti elementi: parte con una curva d'inizio a sinistra poi la Verzi a destra, prosegue con il tornante Curva Sento; dopo il Labirinto (destra-sinistra-destra) c'è il tornante Curva Belvedere seguito da una doppia curva, Bandion e Antelao; nell'ultima parte c'è l'anello Curva Cristallo seguita dal giroscopio Curva Chicane che termina passando sotto una porzione della pista precedente per poi terminare.

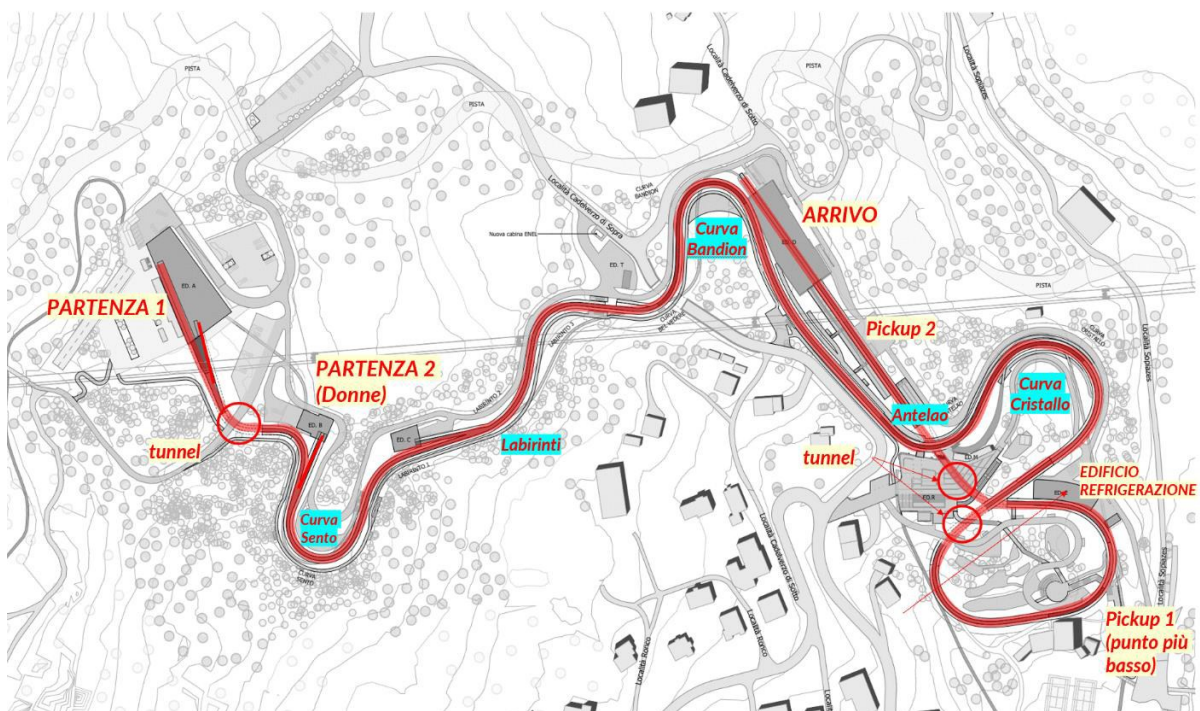


Figura 42: Layout della pista, dall'elaborato "Relazione sulle tecnologie e modalità di realizzazione della pista".

N° curva	Nome Curva
1	Inizio
2	Verzi
3	Sento
4	Labirinto 1
5	Labirinto 2
6	Labirinto 3
7	Belvedere
8	Bandion
9	9
10	Antelao
11	Cristallo
12-13	Chicane
14	14
15	15
16	16

Tabella 1: Elenco e denominazione delle curve.

Come accennato in precedenza, il tracciato segue il pendio naturale e si combina tra sezioni Ipogee, Semi-Ipogee e Appoggiate sul terreno o Sospese. Alla Figura 43, estrapolata dall'elaborato "Relazione Tecnica sull'Architettura della Pista", è mostrato uno schema di come sono distribuite.

La sezione **Ipogea** è nei tratti in cui la pista è completamente interrata, inserita in galleria in c.a. dalla sezione scatolare; all'interno della sezione sono realizzate le passerelle e la struttura di appoggio della pista. Questa sezione è realizzata laddove il tracciato si approfondisce di oltre 3,5m rispetto alla quota esistente; quindi, si decide di non apportare delle modifiche eccessive alla conformazione dei luoghi.

La sezione **Semi-Ipogea** è inserita in elementi in c.a., che fanno da sostegno al terreno, e coperta con una struttura metallica ad essi ancorata. Questa sezione è scelta quando il profilo altimetrico del tracciato risulta affiancato alla quota esistente del pendio, consentendo la ricomposizione del profilo naturale. Il fronte laterale della sezione appare aperto in corrispondenza dei tratti rettilinei e dei tratti interni delle curve, per consentire la visione agli spettatori.

La sezione **Appoggiata** è, appunto, appoggiata su elementi in c.a. che fanno da sostegno alla pista e alle passerelle, e coperta con una struttura metallica ad essi ancorata. L'utilizzo di questa sezione avviene laddove il profilo altimetrico del tracciato sportivo risulta allineato alla quota esistente del pendio, con una distanza rispetto al terreno di ca. 1,5 m. Anche qui il fronte laterale della sezione appare aperto in corrispondenza dei tratti rettilinei e dei tratti interni delle curve.

La sezione in **Elevazione** è appoggiata su elementi in c.a. che fanno da sostegno alla pista e alle passerelle, è coperta con una struttura metallica ad essi ancorata. La sezione in c.a. è costituita da conci prefabbricati con tipologia a ponte. Ogni 10 m la struttura sospesa è sorretta da pile in c.a. inclinate e disposte radialmente rispetto alla curva della pista. Questa sezione è realizzata laddove il tracciato supera di oltre 2,5m la quota esistente. I tratti in cui è utilizzata sono solo due, ovvero in corrispondenza della curva Cristallo e della curva 15 dove la distanza massima dal terreno è di circa 4,5 m.

In totale le quattro sezioni costituiscono le seguenti porzioni di tracciato: 7.4% ipogea, 50.5% semi-ipogea, 25.6% appoggiata e 9,5% elevata, il restante 7% del tracciato è interno agli edifici. Il dato della sezione semi-ipogea va ad indicare che, come detto precedentemente, il progetto si adatta il più possibile al pendio esistente.



Figura 43: Schema planimetrico e grafico delle sezioni tipologiche.

La posizione del tracciato è definita attraverso la **Center Line (CL)**, **Foundation Line (FL)**, **Profile Line (PL)**. La CL rappresenta matematicamente il tracciato ed è quella su cui si basa tutta la progettazione del cosiddetto “corpo pista”. Dal punto di vista fisico rappresenta la traiettoria ideale della slitta o del bob. La FL è la linea di simmetria degli appoggi della pista ed è la linea che fisicamente permette di costruire la pista. La quota della FL è la stessa della CL, ovvero corrisponde al piano del ghiaccio nella parte piana del guscio. La PL è la linea che individua il punto in cui il profilo esterno della curva inizia ad alzarsi rispetto all’orizzontale. La quota della PL è la stessa della CL e della FL, ovvero corrisponde al piano del ghiaccio nella parte piana del guscio. È la linea che serve per realizzare il profilo trasversale delle curve.

Per individuare facilmente tutti gli elementi strutturali e architettonici lungo la CL o la FL si utilizzano le quote e le progressive. Le **distanze progressive** sono misurate in metri e fanno sempre riferimento alla CL e sono indicate con il simbolo “Sx”, le **quote** della CL (quindi anche della FL e PL) sono invece indicate con il simbolo “Hx”. Con il simbolo “Fx” vengono invece individuate le progressive delle fondazioni della pista (appoggi).

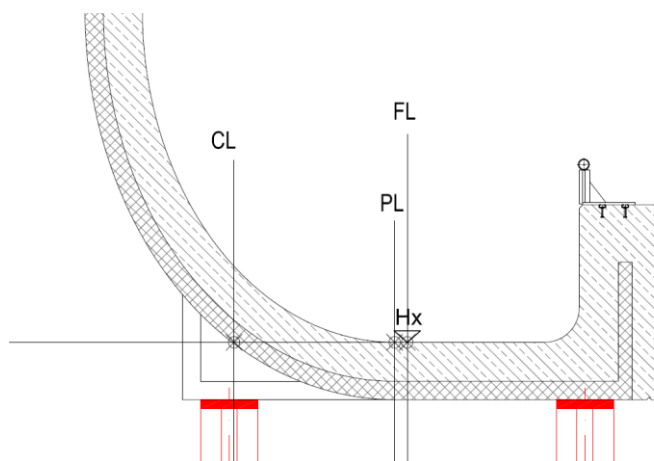


Figura 44: Individuazione di CL, FL e PL nella sezione, dall’elaborato “Relazione sulle tecnologie e modalità di realizzazione della pista”.

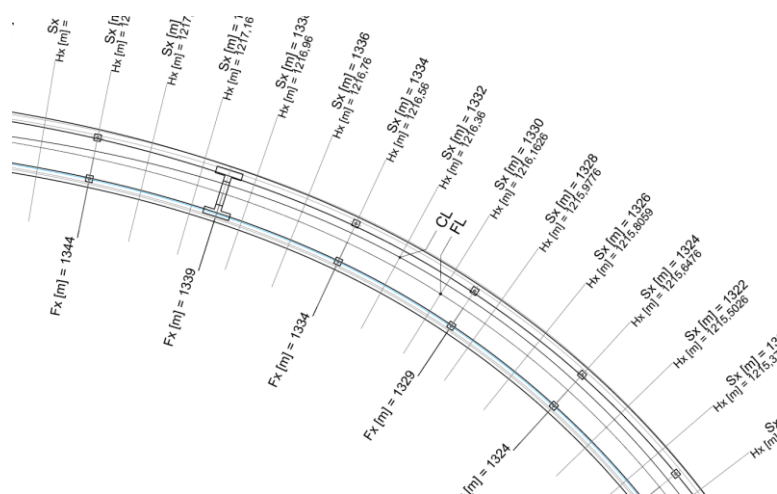


Figura 45: Rappresentazione planimetrica di un tratto di pista con indicazione della FL, della CL, delle Sx e delle Hx.

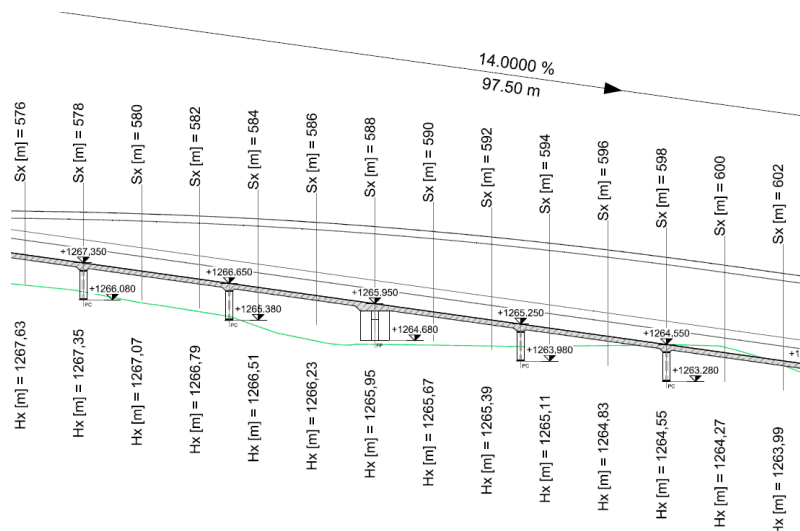


Figura 46: Rappresentazione in profilo di un tratto di pista con progressive e quote.

Le sezioni ipogee, sospese ecc. citate precedentemente si vanno tutte a distinguere al loro interno in tre parti: copertura, corpo pista e sottostruttura Figura 48.

Le **sottostrutture** sono di diverse tipologie a seconda del tipo di sezione del tracciato. La sezione ipogea come sottostruttura ha uno scatolare chiuso, la sezione appoggiata ha una fondazione aperta su cui è montata la copertura, la sezione sospesa è simile a quella appoggiata ma è sorretta da elementi verticali che possono essere setti, spalle o pile (Figura 47).

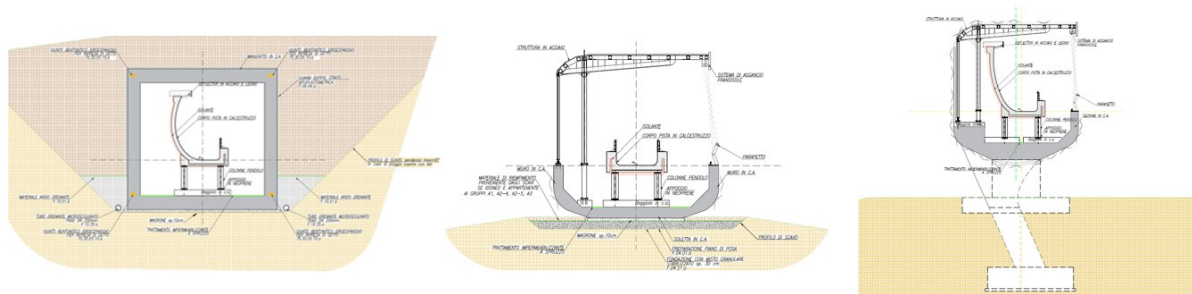


Figura 47: Tipologie di sottostrutture.

La **copertura** in tutto il suo sviluppo, ad eccezione dei tratti ipogei, è di tipo metallico leggero, che protegge la pista dall'esposizione agli agenti atmosferici. Questa in continuità con il guscio esterno di rivestimento, e ne costituisce la prosecuzione. È realizzata in pannelli grecati in alluminio con sistema di fissaggio a scatto, per evitare perforazioni e migliorare la tenuta all'acqua del sistema.

Il **corpo pista** è l'oggetto in cui viaggiano le slitte ed è costituito dal guscio in calcestruzzo, di forma variabile, su cui si formerà il ghiaccio e dai relativi sistemi di appoggio alla sottostruttura.

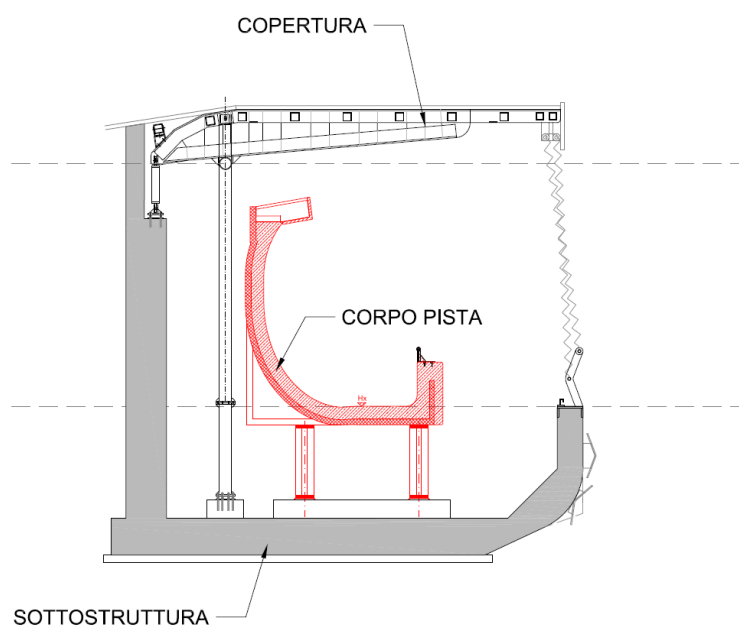


Figura 48: In rosso il corpo pista, in grigio la sottostruttura e in alto la copertura.

Il corpo pista è standardizzato in due sezioni tipologiche, quella in rettilineo e quella in curva.

La **sezione in rettilineo** è caratterizzata da una forma a U con uno spessore della parete (tipico) di 170 mm. Come proposto alla Figura 49 la larghezza totale è di 2.20 m e l'altezza di 0.75 m, è composta da una soletta centrale larga 1.50 m, con spigolo inferiore di 90° e quello superiore arcuato, di raggio $R=150$ mm. Ai due lati della soletta centrale è presente una parete a protezione con una fessura al centro, questa è larga 0.35 m e termina con un'ala di 0.12 m. All'interno della fessura, completamente della sezione, è presente uno strato di materiale isolante. Il guscio, ogni 5 m di progressiva, scarica su due appoggi a distanza tra loro di 1.55m.

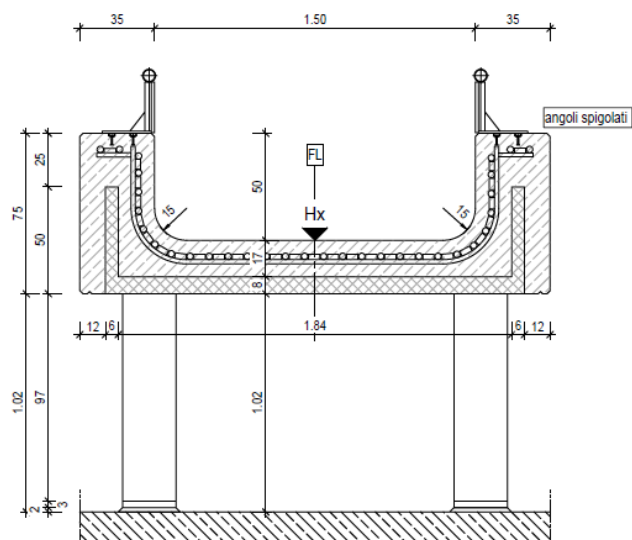


Figura 49: Sezione tipologica in rettilineo (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.SZ.028_D).

La **sezione in curva** è presente nella maggior parte del tracciato, sviluppandosi per una lunghezza totale di 1296 m. Come mostrato a Figura 50 la sezione è per metà analoga alla sezione in rettilineo, in cui la soletta orizzontale centrale è di larghezza variabile tra 0.8 e 1 m, questa ha uno spessore di 170 mm. Il lato della sezione su cui passerà il Bob è una struttura a guscio costituita da un quarto di ellisse (sotto) e da un segmento circolare (sopra). Il raggio e l'altezza della parte a guscio variano in base alla progressiva nel tratto di transizione tra porzione in rettilineo e in curva. La sezione termina con una trave di dimensioni standard, di larghezza 0.35 m, e un deflector in legno che impedisce la fuoriuscita del Bob.

Ogni tratto del tracciato è isolato grazie all'uso di **giunti di dilatazione** che devono consentire i movimenti dovuti a carichi esterni e sollecitazioni termiche, deflusso delle acque di scioglimento del ghiaccio della pista e delle eventuali condense e acque piovane. Variazioni di posizione di circa 20 mm possono verificarsi per lunghezze massime dei tratti di pista di circa 80 m. Ciò significa che con un punto fisso al centro di un tratto si verificano variazioni di lunghezza di circa 20 mm su ciascuna estremità.

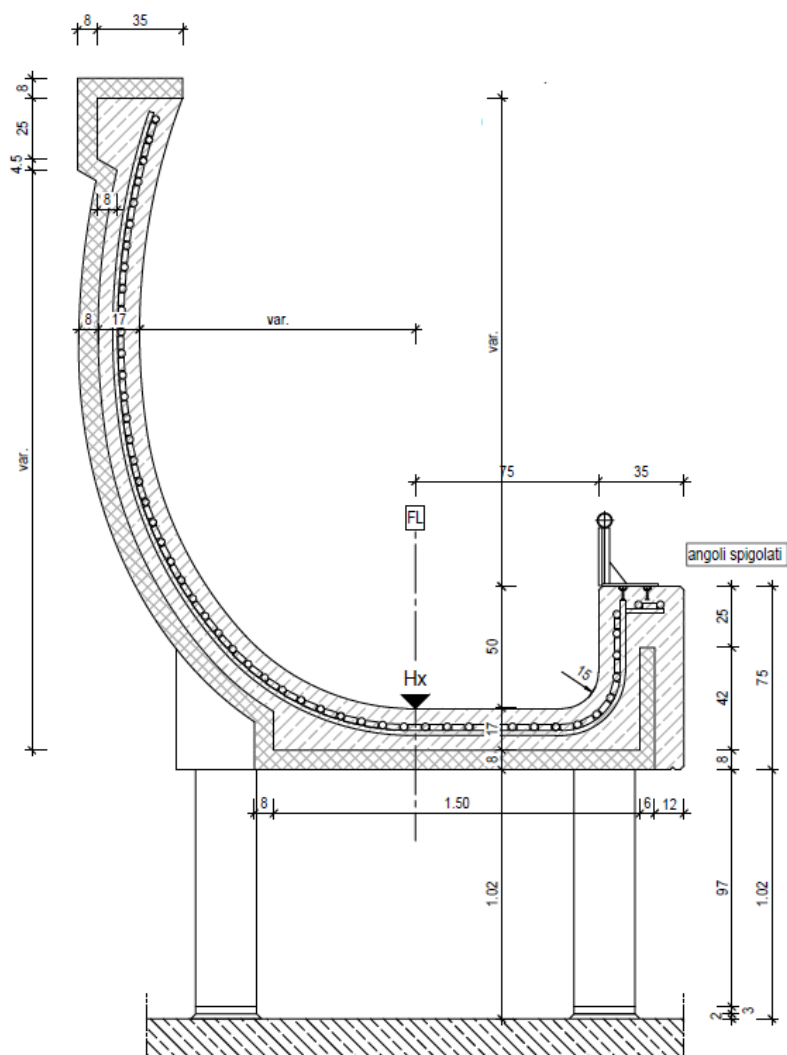


Figura 50: Sezione tipologica in curva (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.SZ.028_D).

Le parti in rettilineo e in curva sono sorretti da tre tipologie di appoggi (Figura 51):

- **Colonne pendolo:** consentono lo spostamento del tracciato in qualsiasi direzione orizzontale, hanno delle piastre di appoggio in neoprene di 30 mm di spessore. Sono attraversate in senso verticale da una barra in acciaio B450C ad aderenza migliorata che collega la fondazione alla pista, infilate in un tubo di alloggiamento in asse alla colonna. Hanno una sezione di 25x25 cm e sono in calcestruzzo C32/40.
- **Telai a pendolo:** struttura con due pilastri di sezione 25x25 cm e una trave trasversale incastrata, tutto in C32/40. L'armatura è equivalente a quella delle colonne a pendolo con una armatura specifica per la porzione di ancoraggio della trave.
- **Punti fissi:** sono dei piccoli setti di lunghezza 1.50 o 2.00 m, con altezza analoga a quella delle colonne o del telaio. Questi sono gettati in opera e sono necessari in alcuni punti per sostenere le sollecitazioni taglienti.

La struttura del corpo pista è realizzata in spritzbeton, tranne per il fondo della pista e le sezioni di partenza senza pareti in calcestruzzo che possono essere gettate in opera utilizzando la stessa miscela. Lo **spritzbeton** consente di costruire il guscio della curva senza casseforme nella parte interna ed esterna della sezione. Dunque, i valori geometrici delle sezioni vengono raggiunti con le dime fissate sugli elementi di fondazione.

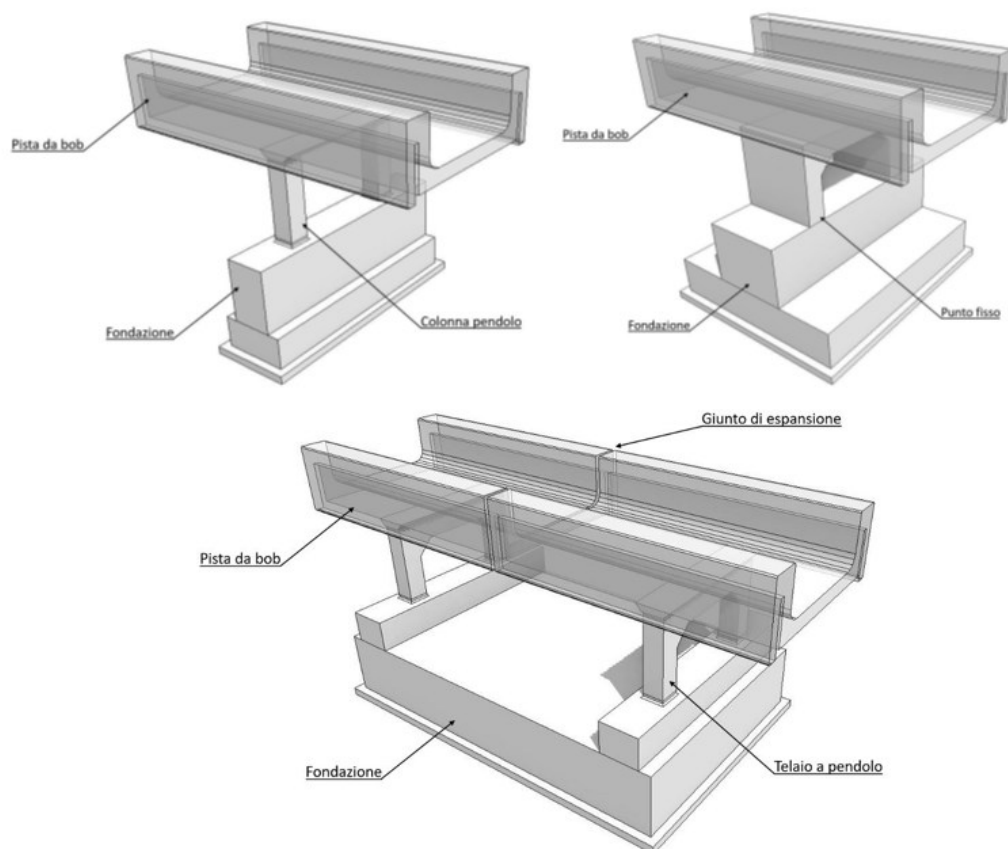


Figura 51: Tipologie di appoggi, dall'elaborato "Relazione sulle tecnologie e modalità di realizzazione della pista".

Le **dime** sono dei profilati in acciaio prefabbricati, che permettono un elevato grado di precisione, sono posizionate a 2-2.5 m di distanza. La continuità della profilatura è assicurata attraverso il collegamento dei tubi di refrigerazione alle dime, che sono preparate con alloggiamento apposito quest'ultimi. Poi le tubazioni sono circondate da acciaio di rinforzo, per stabilizzare la loro posizione in modo tale che non si verifichi alcun cambiamento di profilo quando il calcestruzzo viene applicato.

Dei tubi in plastica, che fungono da dima per lo spessore del calcestruzzo, vengono fissati all'armatura in acciaio e ai tubi di refrigerazione all'interno della curva. Questi elementi in plastica indicano la superficie finale del calcestruzzo, servono da guida durante la costruzione e vengono rimossi prima del lisciaggio. La distanza tra ogni tubo di plastica non supera i 500 mm e, nel caso dei tratti rettilinei, può essere aumentata fino a un massimo di 1000 mm.

La lavorazione avviene in tre fasi. In primo luogo, il calcestruzzo viene gettato del fondo tra due giunti di costruzione in direzione della lunghezza. Poi avviene la spruzzatura del calcestruzzo dall'interno della curva fino a circa il bordo anteriore dei tubi distanziatori in plastica, successivamente il calcestruzzo viene raschiato e appiattito per sfregamento, dopodiché si rimuovono i tubi di plastica. Infine, si esegue la spruzzatura del calcestruzzo sul retro della curva con uno spessore di circa 40 mm.

1.4 Curva Cristallo

Lo studio di questa tesi si è concentrato su una porzione della pista, in particolare è stata individuata la Curva Cristallo, che è una delle curve principali e l'unica che ha una porzione in elevazione.

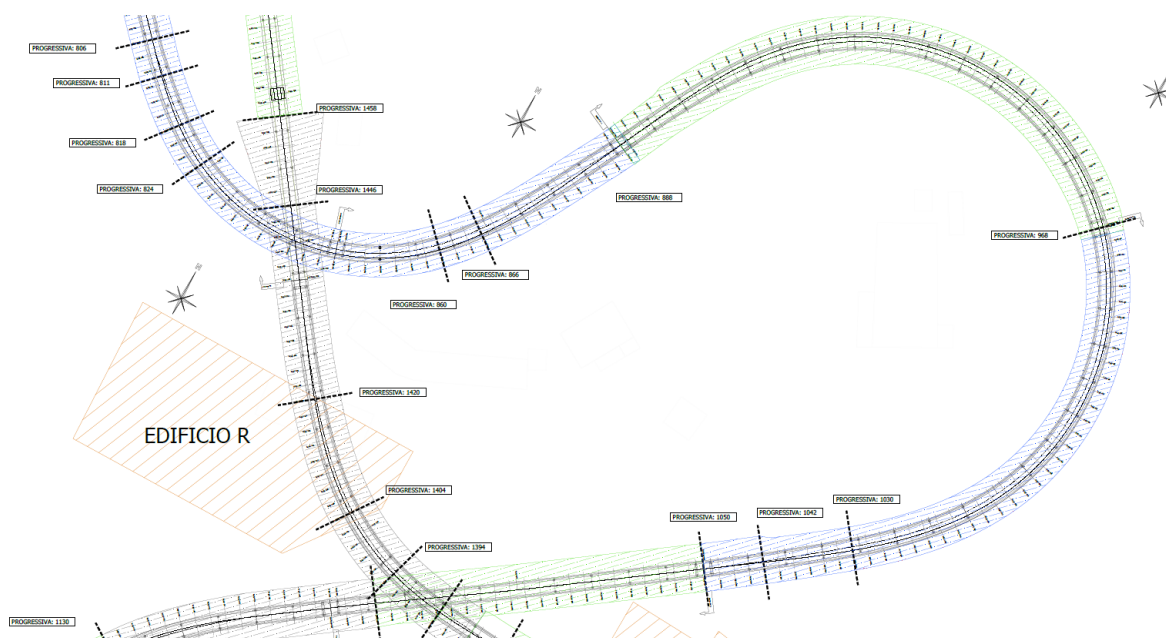


Figura 52: Planimetria della Curva Cristallo (CSC.S2.PE_PB.00_X.00_GN.PL.005_D).

La curva, identificata con C11, ha un'estensione che va dalla progressiva $Sx = 888 \text{ m}$ alla $Sx = 1050 \text{ m}$. Al suo interno si distingue in due porzioni: la prima parte (C11.1), che è appoggiata al terreno e arriva a $Sx = 968 \text{ m}$, e la seconda (C11.2) che invece è tutta sospesa tranne per gli ultimi metri in cui torna a essere appoggiata per connetterli al tratto successivo. In questo tratto sono presenti 2 giunti di dilatazione, il primo si trova all'interruzione tra C11.1 e C11.2 e il secondo si trova a $Sx = 1050 \text{ m}$. Di seguito si vanno ad analizzare la porzione del corpo pista e quella della sottostruttura.

1.4.1 Corpo Pista

Il corpo pista della Curva Cristallo ha sia porzioni in rettilineo che porzioni in curva, il rettilineo si ha solo all'inizio e alla fine per il passaggio tra la curva successiva e quella precedente. Come si può vedere alla Figura 53 e Figura 54, parte con una sezione in rettilineo, poi passa alla sezione a guscio gradualmente, per poi avere una nuova transizione fino a tornare alla sezione in rettilineo.

Dagli elaborati grafici che vanno da CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.SZ_001_D a CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.SZ_012_D è mostrata la variazione delle **SEZIONI** (di cui sono state estratte delle parti a Figura 55). Da $Sx = 888 \text{ m}$ a $Sx = 983 \text{ m}$ c'è il primo tratto rettilineo, da qui parte la sezione curva con un aumento graduale dell'altezza dell'estremo sinistro da 822 cm a 2350 cm per circa 25 m di progressiva. Poi nella parte principale della curva la sezione rimane costante a guscio, fino a ridursi di nuovo per altri 25 m circa, fino a $Sx = 1039 \text{ m}$ in cui torna la sezione in rettilineo.

Gli **APPOGGI** sono disposti ogni 5 m , in totale la curva è sorretta da 34 appoggi. La maggior parte sono del tipo *colonna* tranne per quelli a $Fx = 889, 967, 969, 1049 \text{ m}$ che sono a *telaio* e quelli a $Fx = 920$ e 1009 m che sono *appoggi fissi*. Gli appoggi a colonna e a telaio hanno un'altezza di 1 m e una sezione sia dei pilastri che della trave di $25 \times 25 \text{ cm}$, gli appoggi fissi invece hanno una sezione di $25 \times 200 \text{ cm}$.

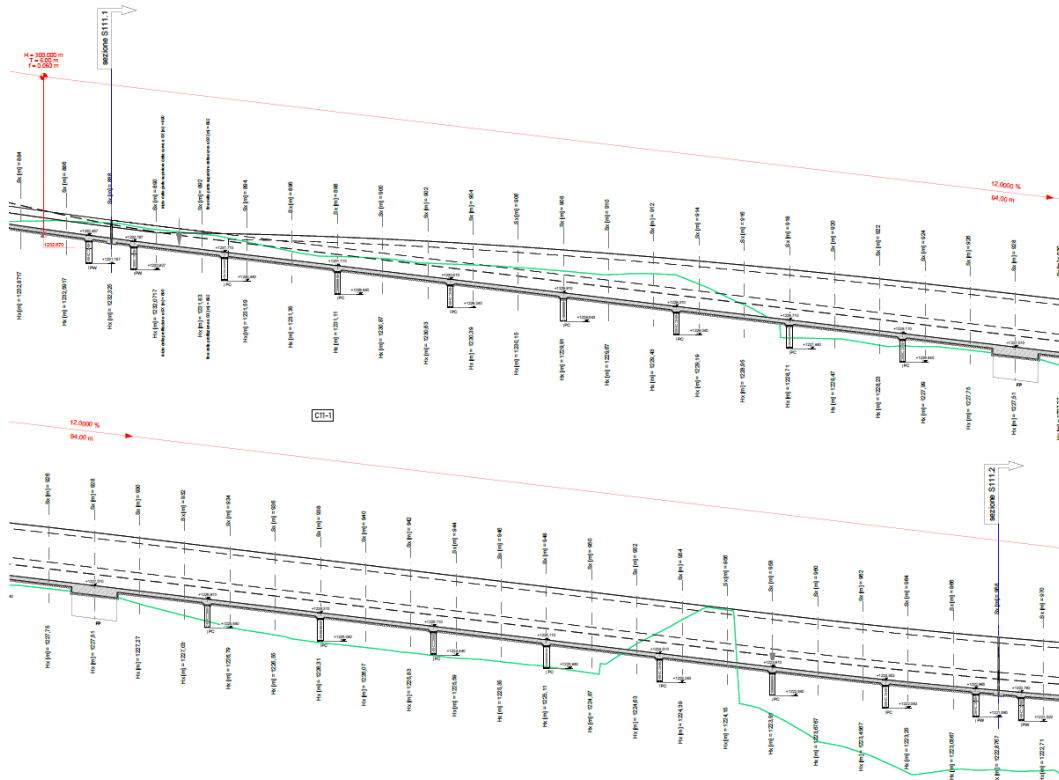


Figura 53: Profilo longitudinale - C11.1 (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.PR.001_D).

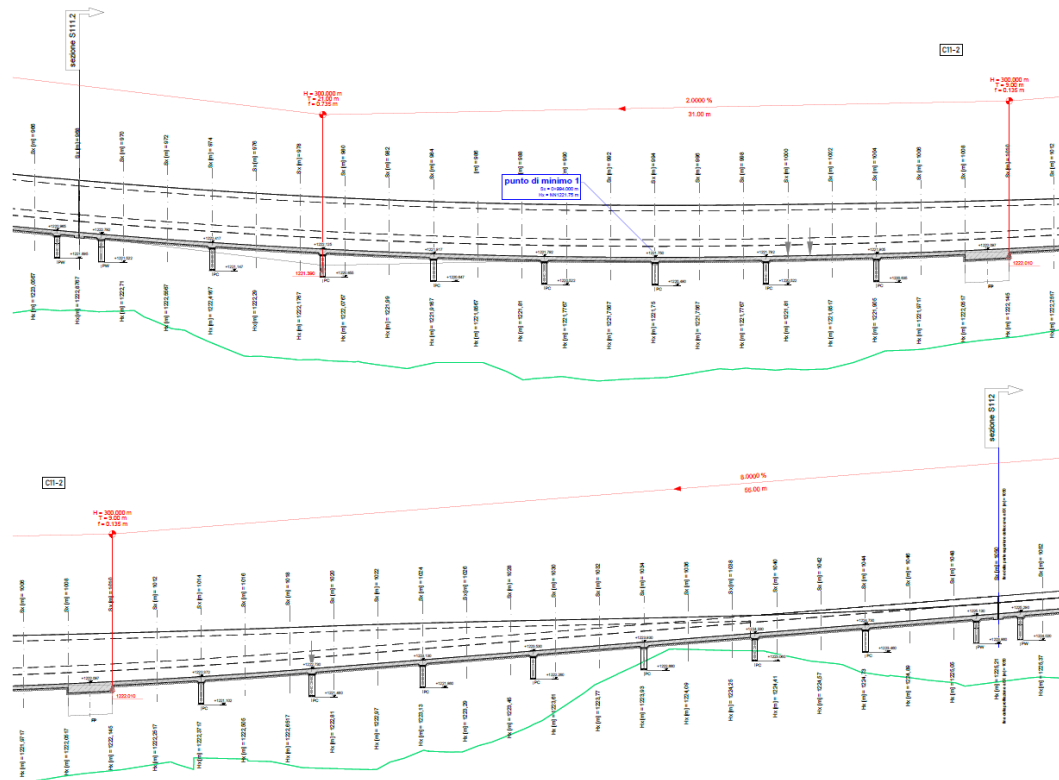


Figura 54: Profilo longitudinale - C11.2 (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.PR.002_D).

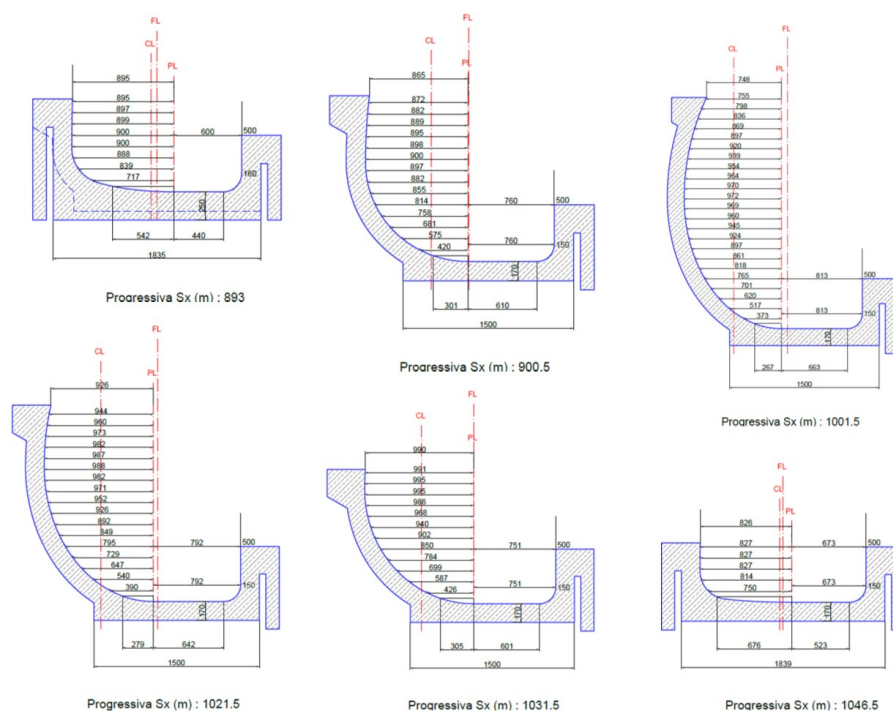


Figura 55: Variazione graduale della sezione del corpo pista della curva (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.SZ.001-012_D).

Le **ARMATURE** longitudinali e trasversali della sezione sono standardizzate per i tratti in rettilineo e per quelli in curva. In entrambi i casi l'armatura è costituita da reti metalliche superiori e inferiori, in particolare con quella superiore con un'inclinazione di 45° , e delle staffature che permettono il confinamento di ogni parte della sezione.

In questo studio si è voluto definire le forme delle armature in riferimento alla normativa (BS 8666 n.d.) posta in appendice.

A Figura 56 sono riportate le armature per il tratto in **rettilineo**, elencate in Tabella 2. Le armature longitudinali sono realizzate dalla Pos. 1, questa però si distingue in diverse zone: nella parte centrale inferiore e superiore è di $\Phi 10|12.5 \text{ cm}$, nelle pareti laterali nella parte interna è di $\Phi 10|10 \text{ cm}$ in entrambe le facce, nella trave superiore ci sono in totale $9\Phi 10$ sia a destra e che a sinistra e nell'ala terminale sono posti esternamente $\Phi 10|10 \text{ cm}$. Poi dalla Pos. 2 alla 9 ci sono le armature trasversali, in particolare sono tutte $10\Phi 8$ tranne per la 2 e la 6 che sono $20\Phi 8$ e la 9 che è $20\Phi 10$. La Pos. 2 e 9 vanno a costituire l'armatura inferiore e superiore della parte centrale della sezione; la 9 prosegue in verticale sulle pareti laterali con una piegatura di raggio $r = 22 \text{ cm}$. Le Pos. 2 e 9 sono le uniche armature trasversali con lunghezza variabile, dipende infatti dalla larghezza della sezione. Le altre vanno a costituire le staffe della sezione. Nella parte superiore e nell'ala esterna sono poste le Pos. 4, 5 e 6, mentre la Pos. 3 confina l'angolo inferiore a 90° della parte centrale. Queste ultime hanno dimensioni fisse lungo il tracciato poiché la geometria è costante.

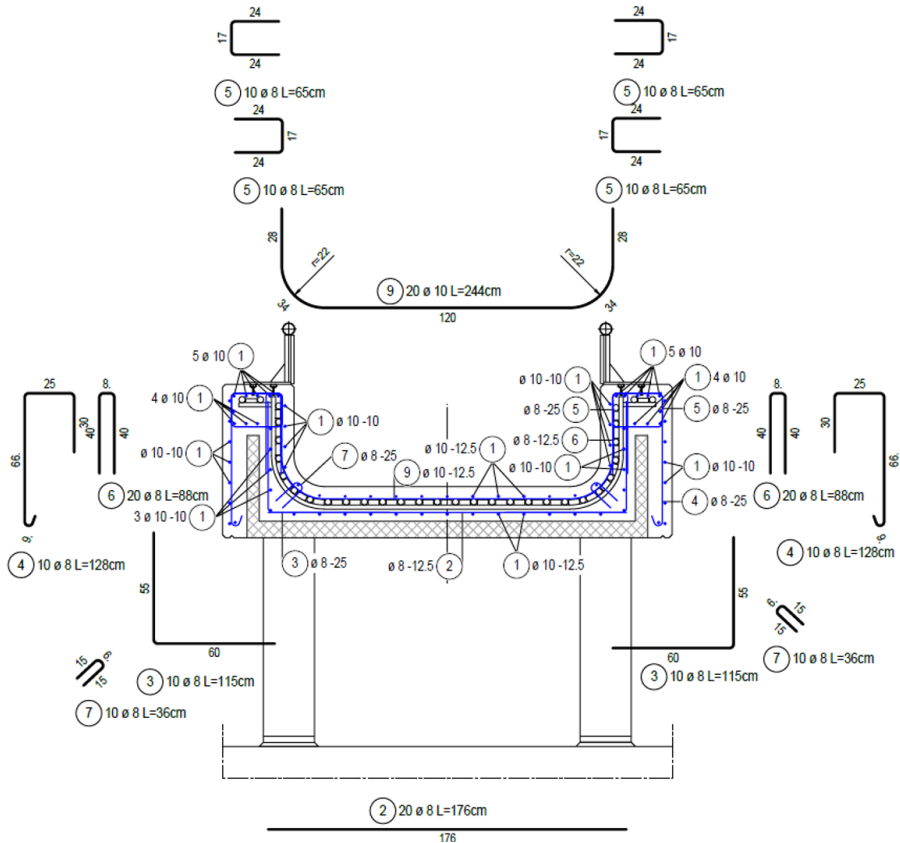


Figura 56: Posizione dell’armatura per i tratti in rettilineo Curva Cristallo (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.SZ.028_D).

Pos.	Diametro	Rebar shape	Parametri [cm]
1	Φ10 10 - Φ10 12.5	BS 00	a = variabile
2	20 Φ 8	BS 00	a = variabile
3	10 Φ 8	BS 11	a=55, b=60
4	10 Φ 8	BS 22	a=30, b=25, c=66, d=9
5	10 Φ 8	BS 21	a=24, b=17, c=24
6	20 Φ 8	BS 21	a=40, b=8, c=40
7	10 Φ 8	BS 13	a=15, b=6, c=15
9	20 Φ 10	BS 21	a=28, b=var, c=28

Tabella 2: Posizioni e forme armature tratti rettilinei Curva Cristallo.

A Figura 57 sono riportate le armature per il tratto in **curva**, elencate in Tabella 3. Le armature del tratto curvilineo riprendono per metà sezione le armature usate in rettilineo, avendo la stessa geometria nella parte bassa. Quindi a destra (parte bassa) la Pos. 1 è posta longitudinalmente con **Φ10|10 cm, Φ10|12.5 cm** e **9Φ10** come descritto in precedenza, poi ci sono le staffe delle Pos. 4, 5, 6 nella parte più esterna. Si vanno a distinguere la Pos. 8 che prende l’angolo all’estradosso e la Pos. 10 che prendo l’intradosso della parte centrale della sezione, quest’ultima varia in base alla larghezza della sezione stessa.

Il guscio invece ha le reti metalliche in Pos. 1, in particolare la rete è posizionata diagonalmente all’interno e verticalmente all’esterno. Lungo la parete sono poste le Pos. 7 per

creare delle unioni. La trave in cima ha le staffe in Pos. 16 e 11 che vanno a creare un confinamento, in particolare la 16 viene piegata verso l'interno in cantiere.

Pos.	Diametro	Rebar shape	Parametri [cm]
1	$\Phi 10 10 - \Phi 10 12.5$	BS 00	a = variabile
4	10 $\Phi 8$	BS 22	a=30, b=25, c=66, d=9
5	10 $\Phi 8$	BS 21	a=24, b=17, c=24
6	20 $\Phi 8$	BS 21	a=40, b=8, c=40
7	10 $\Phi 8$	BS 13	a=15, b=6, c=15
8	20 $\Phi 10$	BS 12	a=60, b=33, r=20
10	$\Phi 8 12.5$	BS 21	a=20, b=var, c=60
11	20 $\Phi 8$	BS 27	a=24, b=19, c=58
16	20 $\Phi 8$	BS 27	a=19, b=24, c=40

Tabella 3: Posizioni e forme armature tratti in curva della Curva Cristallo.

La Figura 56 e la Figura 57 sono le sezioni generiche comprese tra 2 appoggi. Infatti, l'incastro tra appoggi e guscio si va a realizzare con delle armature specifiche. Delle armature verticali e orizzontali vanno a creare un confinamento della sporgenza aggiuntiva della sezione e un incastro solito con i pilastri, travi e setti dei diversi tipi di appoggio. L'armatura è realizzata da reti di $\Phi 8 | 12.5 \text{ cm}$ e staffe che si vanno a posizionare come di seguito: Pos. 19, 20, 21 per l'appoggio a colonna, Pos. 23, 24, 21 per quello a telaio e Pos. 27, 28, 21 per l'appoggio fisso. Nei 3 casi la 21 è la staffa in sezione trasversale e le altre in sezione longitudinale.

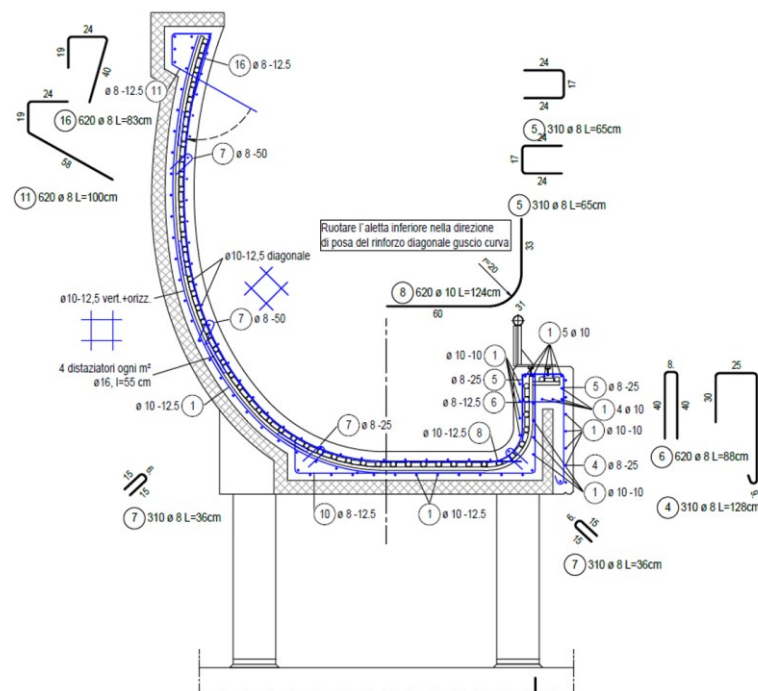


Figura 57: Posizione dell'armatura per i tratti in curva Curva Cristallo (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.SZ.028_D).

Oltre alle armature la sezione contiene gli **IMPIANTI** di raffreddamento che permettono la formazione del ghiaccio per lo scivolamento del Bob.

Come riportato nell'elaborato "Relazione tecnica impianto di refrigerazione". per la refrigerazione si utilizza una soluzione acqua con glicole etilenico al 50% che ha una densità pari a 1083.62 kg/m, una viscosità dinamica pari a $22.035.81 \cdot 10^{-6}$ kg/ms e un calore specifico pari a 0,8350 kcal/kg/°C. La distribuzione del fluido avviene attraverso una distribuzione principale lungo tutto il circuito e un circuito secondario per ogni sezione del tracciato.

Lungo la progressiva la sezione contiene un numero preciso di tubi secondari di diametro 33.4 mm, una tubazione in acciaio nero DN25 SCH40. Questi vanno a poi a terminare in dei collettori che dalla centrale dell'impianto permettono la distribuzione del fluido su tutta la pista. I collettori hanno un diametro esterno di 141.3 mm (Figura 59).

Il numero dei tubi dipende dall'estensione della sezione, infatti è variabile in base al tratto specifico. Nella curva Cristallo, che ha una variazione di sezione ripetuta il numero si va a modificare quattro volte: da $S_x=888$ a 894.5m ci sono 37 tubi, da $S_x=901$ a 966m ci sono 50 tubi, da $S_x=972.5$ a 1024.5m sono 52 e da $S_x=1031$ a 1044m sono 38. All'inizio e alla fine di ogni tratto è presente un collettore. I tubi secondari vengono disposti nelle intercapedini realizzati sulle dime, l'interasse varia da sezione a sezione per garantire una distribuzione omogenea.

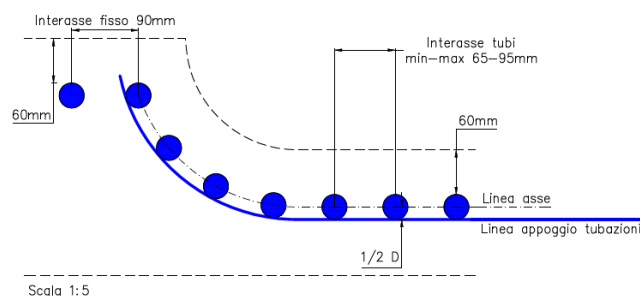


Figura 58: Dettaglio costruttivo delle tubazioni secondarie (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_IR.SZ.001_D).

Come mostrato alla Figura 58 le tubazioni vengono disposte ad una distanza dal bordo esterno di 60 mm dall'estradosso della sezione, nella parte terminare invece viene posto un ultimo tubo a distanza di 90 mm verso l'esterno (ambo i lati). A Figura 59 sono riportate alcune sezioni prese dagli elaborati che vanno dal CSC.S2.PE_PB.03_K.17_IR.SZ.001_D al CSC.S2.PE_PB.03_K.17_IR.SZ.012_D. Si può vedere come le tubazioni vengano disposte in modo omogeneo adattandosi alla sezione; variando solamente il numero dei tubi nei tratti precedentemente elencati.

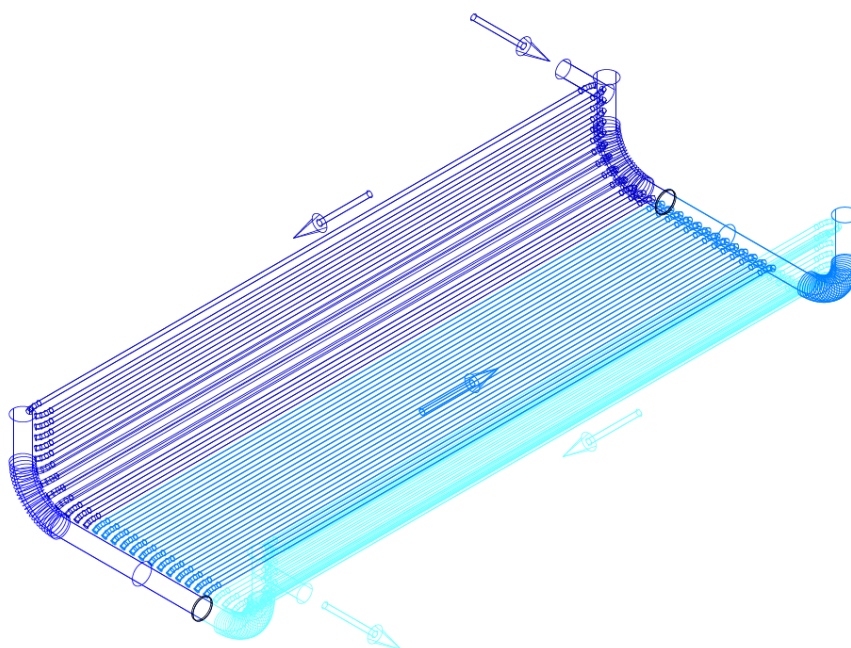


Figura 59: Tipologico impianto refrigerante sezione (CSC.S2.PE_PB.00_X.00_IR.DT.001_D).

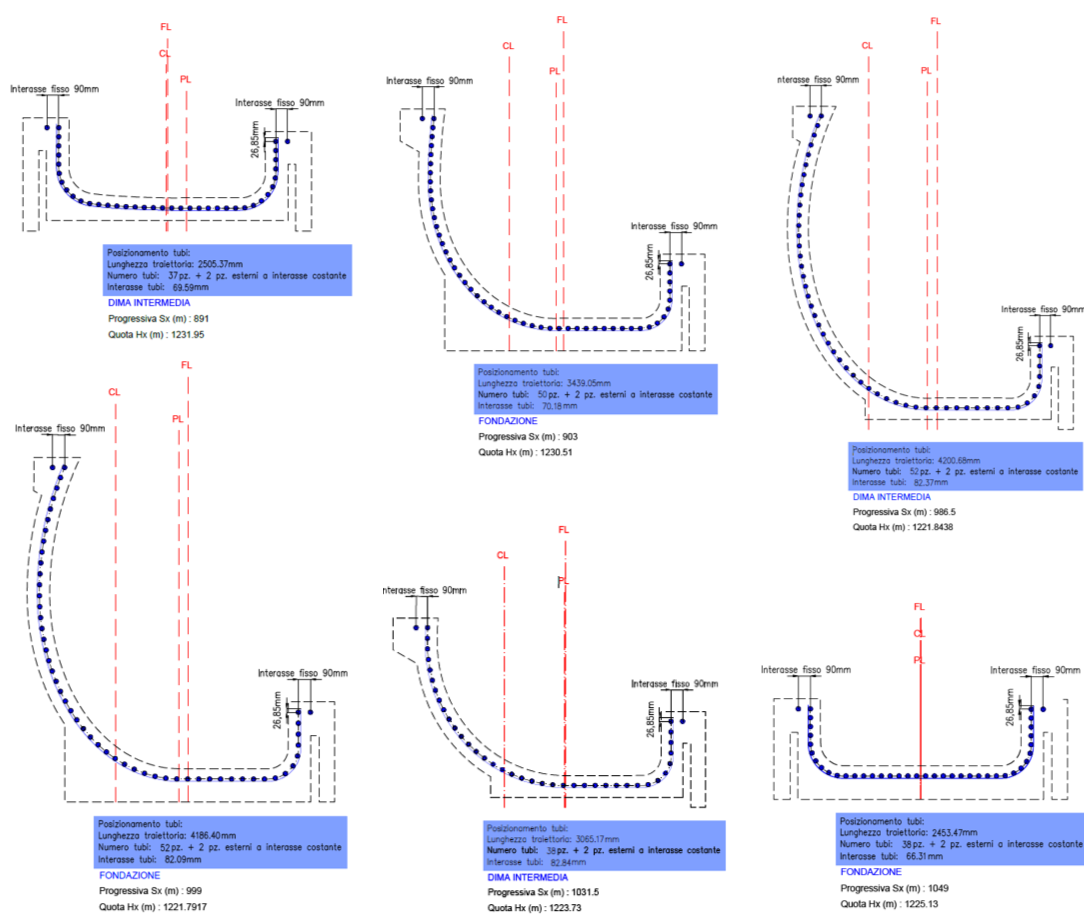


Figura 60: Variazione graduale con impianti refrigerazione (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_IR.SZ.001-012_D).

1.4.2 Sottostruttura

La sottostruttura della Curva Cristallo è suddivisa in C11.1 e C11.2, la differenza sostanziale è che la prima parte è una sottostruttura appoggiata al terreno mentre la seconda è sospesa.

La porzione **C11.1** parte da $S_x=888$ e arriva a 968m, è tutta appoggiata al terreno tranne in corrispondenza del secondo appoggio in cui al di sotto è presente uno scatolare di altezza circa 3m (Figura 62). La sottostruttura ha una sezione ad U costante su tutta la progressiva, le dimensioni in dettaglio sono riportate alla Figura 61. Ha una larghezza totale di 5.81m, un'altezza di 2.02m e uno spessore di 35-50cm.

La sezione viene realizzata creando uno scavo attorno con inclinazione di 45° , viene gettato un magrone in CA si spessore 10 cm, attraverso una casseratura si crea la sezione che è costituita da una soletta di 50cm e dei muri di spessore 35cm. È stato quindi riempito il vuoto con materiale di riempimento proveniente dallo scavo. L'unione tra i muri e la soletta è stata realizzata con una curva smussata per migliorare il comportamento strutturale in risposta alle azioni del terreno. L'esterno della sezione è protetto con una guaina a doppio strato bituplastometrica, mentre nella parte superiore della sezione è stato fatto un trattamento impermeabilizzante a spruzzo. Infine, i pilastri che sorreggono la curva hanno degli appoggi in neoprene nella parte a contatto con la fondazione.

Lo scatolare nella parte iniziale è costituito da un magrone di 10 cm, sul quale è gettata una soletta di 70 cm e le 4 pareti di spessore 50 cm e alte circa 2.75m. Ha una larghezza di 5.2m e una profondità di 5.5m.

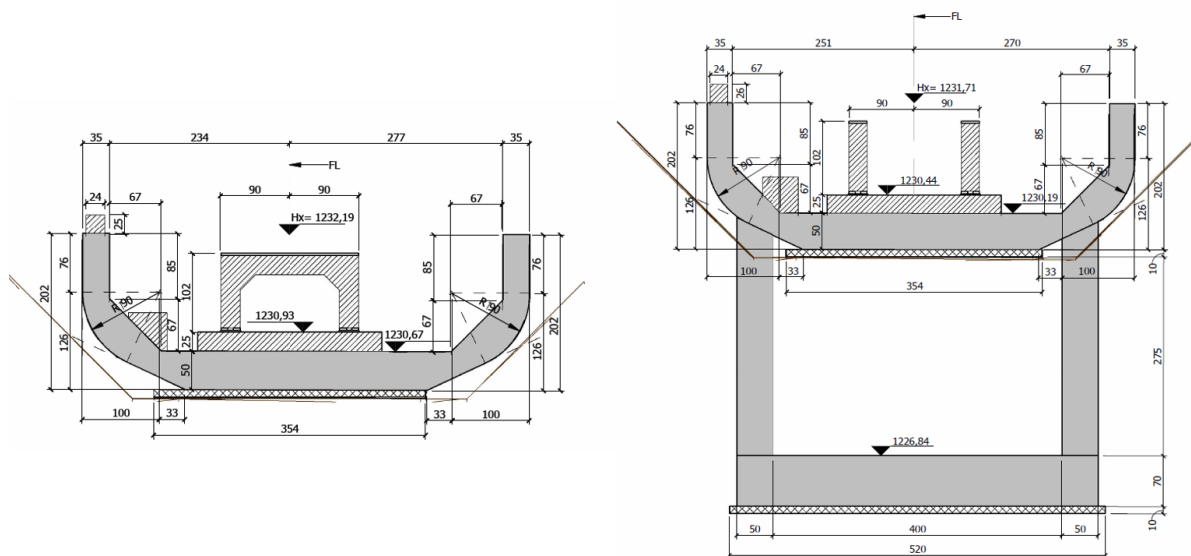


Figura 61: Sezioni sottostruttura C11.1 a $S_x=889$ m e $S_x=891$ m (CSC.S2.PE_PB.01_H.02_ST.SZ.002_E).



Figura 62: Viste 3D della sottostruttura C11.1 (CSC.S2.PE_PB.01_H.02_ST.PR.001_E).

La porzione **C11.2** è costituita da un impalcato di sezione costante, sorretto da delle spalle in CA, nella parte terminale prosegue di nuovo con una sezione appoggiata sorretta in alcuni punti da dei setti in CA (Figura 63).

La sezione dell'**impalcato**, mostrata a Figura 64, è costante lungo la progressiva. Ha una larghezza totale di 5.8m e un'altezza di 2.23m. Per metà è simile alla sezione della C11.1, si differenzia dal lato del guscio per sostenere sollecitazioni maggiori; infatti, raggiunge uno spessore inferiore di 78 cm e laterale di 1.45 m.

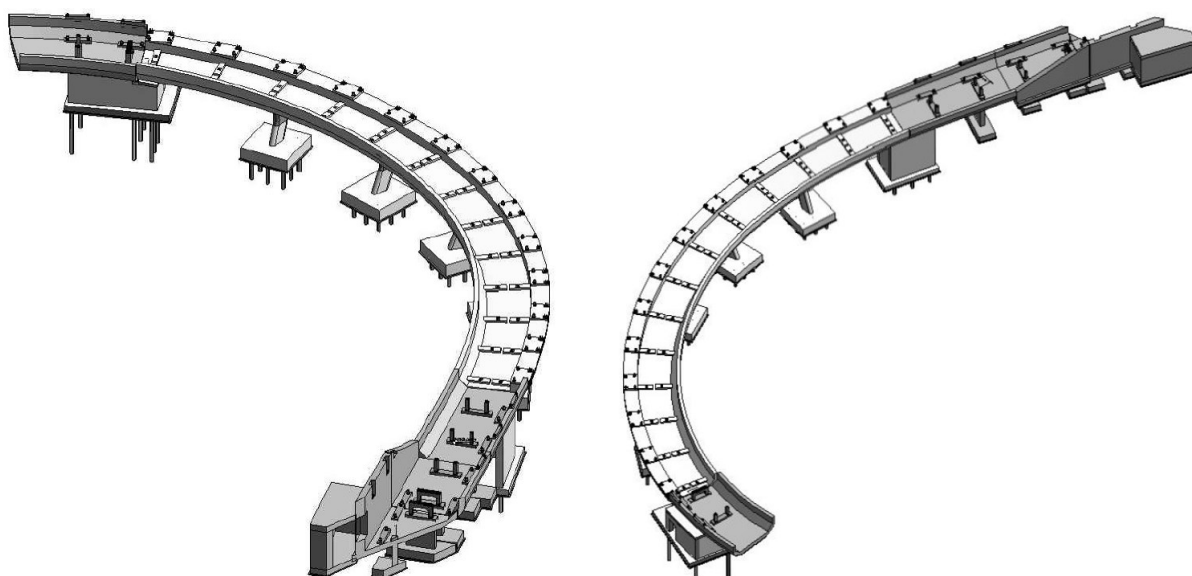


Figura 63: Vista 3D curva C11.2 (CSC.S2.PE_PB.01_I.04_ST.PR.001_E).

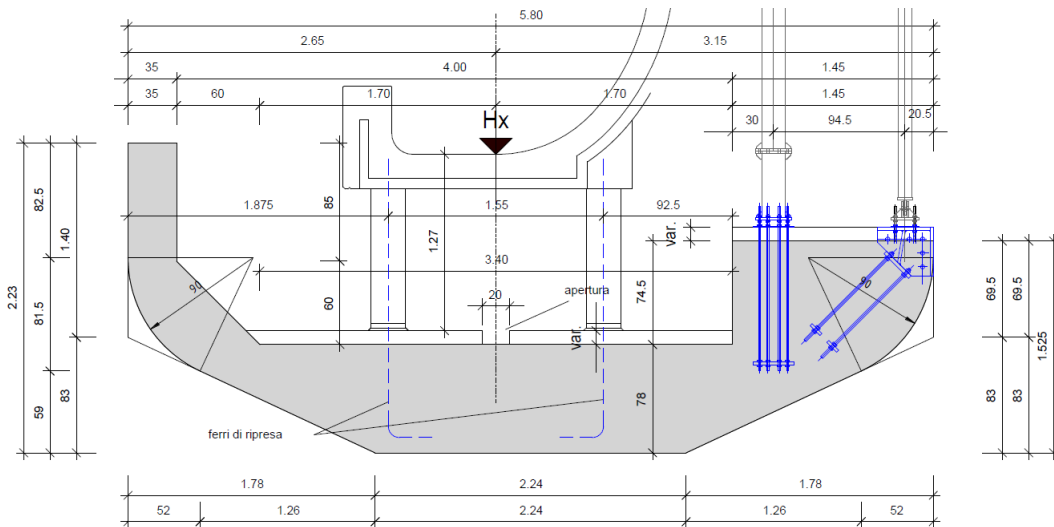


Figura 64: Sezione impalcato C11.2 (CSC.S2.PE_PB.01_I.04_ST.PL.003_D).

L'impalcato è poi sorretto da 5 **pile**, a distanza tra loro di circa 10m (Figura 67). Le pile hanno un'altezza variabile in base alla conformazione del terreno, l'altezza si aggira attorno ai 4.5 m. Queste hanno una conformazione complessa, con una sezione che si allarga da un lato e ha spigoli smussati, inoltre la pila stessa è inclinata rispetto alla verticale di circa 23°. Questa conformazione ha portato anche ad una progettazione specifica delle armature che devono andare a sorreggere i carichi provenienti dal corpo pista e dall'impalcato.

Agli estremi l'impalcato è sostenuto da due spalle in CA attraverso degli appoggi elastomerici. La prima spalla nella progressiva ha una sezione chiusa e una larghezza di circa 5m e una profondità di circa 8m. La seconda invece ha una sezione a C ed è larga 3.2m e profonda 5m (Figura 66).

Infine, nell'ultimo tratto dopo l'impalcato, la sezione ritorna ad essere appoggiata, come quella in C11.1. In corrispondenza degli ultimi 3 appoggi scarica su dei setti di larghezza 2.24m e spessore 50cm.

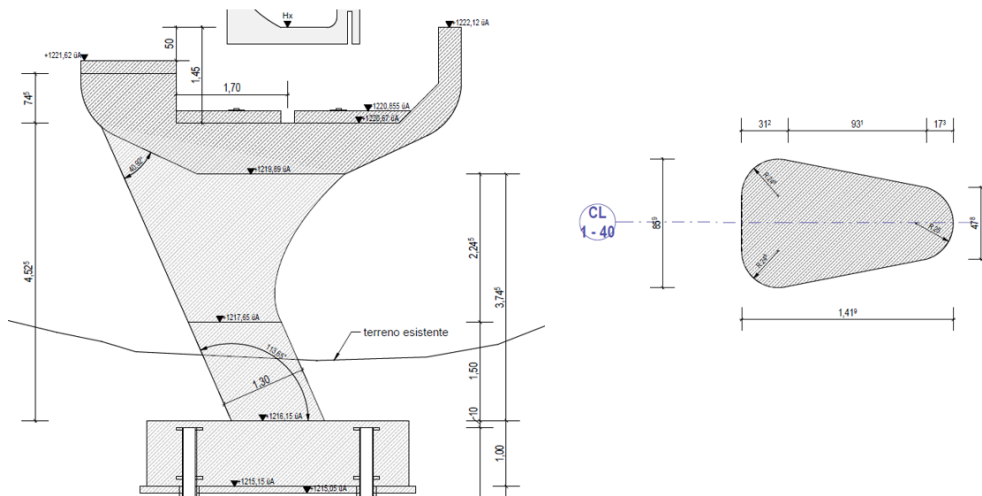


Figura 65: Prospetto e sezione di una pila generica C11.2 (CSC.S2.PE_PB.01_I.04_ST.SZ.001_D).

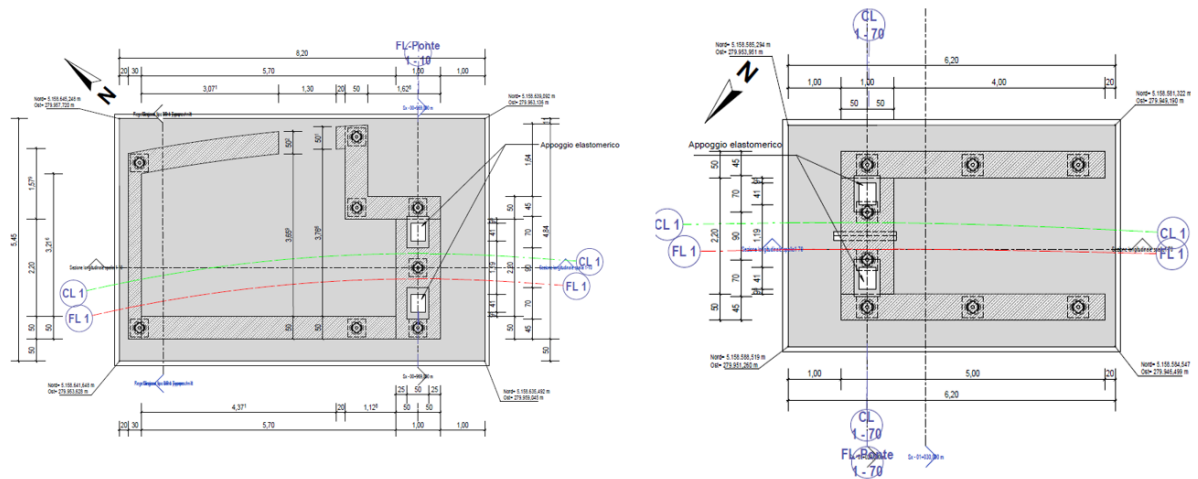


Figura 66: Planimetria spalle dell'impalcato C11.2 (CSC.S2.PE_PB.01_I.04_ST.PL.002_D).

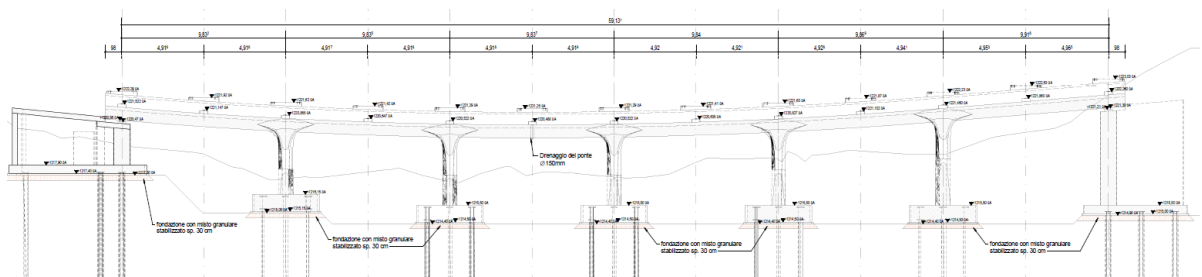


Figura 67: Profilo longitudinale dell'impalcato C11.2 (CSC.S2.PE_PB.01_I.04_ST.PL.003_D).

2 MODELLO BIM PARAMETRICO DELLA CURVA CRISTALLO

Il progetto della pista da bob presenta una notevole complessità sia dal punto di vista geometrico sia per l'estensione dell'opera. Per svilupparne un modello efficace non è sufficiente un utilizzo convenzionale del BIM: è infatti necessario gestire processi automatizzati che permettano di velocizzare e ottimizzare il lavoro.

Analizzando sia il corpo pista che la sottostruttura, emerge come la geometria si ripeta lungo il tracciato. Le variazioni dipendono principalmente da elementi tipologici o da differenze funzionali tra i vari tratti. Nella prima fase di questo studio è stato quindi sviluppato un metodo per generare automaticamente le geometrie e le componenti interne della pista.

Per testare l'applicabilità del modello si è scelto un tratto specifico, la Curva Cristallo, concentrandosi esclusivamente sul corpo pista. Questo perché la sottostruttura, per la maggior parte, può seguire lo stesso procedimento. Una volta validato il modello per questo segmento, lo stesso approccio potrà essere esteso all'intera pista.

Per la modellazione della curva sono stati analizzati tre aspetti principali del BIM: la **geometria**, le **armature** e gli **impianti**. Della geometria sono state individuate le sezioni tipologiche e i parametri ricorrenti lungo il tracciato; lo stesso approccio è stato adottato per armature e impianti. In questo modo, partendo da input iniziali, è possibile eseguire uno script parametrico in grado di restituire il modello completo.

Nei paragrafi seguenti verrà illustrato il processo di implementazione di tre script sviluppati in ambiente Dynamo, utilizzati per generare la sezione geometrica della Curva Cristallo nei suoi tratti rettilinei e curvilinei, le armature longitudinali e trasversali, e gli impianti di refrigerazione contenuti all'interno della sezione.

2.1 Sezione geometrica

Per realizzare la sezione geometrica, si è cercato di definirla in modo tale da poterla adattare al progetto effettivo della curva, variandone semplicemente le dimensioni. Il principale limite riscontrato riguarda la differenza tra la sezione nei tratti rettilinei e quella nei tratti curvi. Dopo diversi tentativi, si è quindi deciso di procedere con una sezione specifica per le curve e una distinta per i tratti rettilinei.

Le sezioni in rettilineo e in curva, riportate rispettivamente alla Figura 49 e Figura 50, hanno dei profili standard lungo il percorso. I parametri che variano sono soprattutto la larghezza, l'altezza del lato destro o del lato sinistro e i raggi delle parti curvate.

Si è deciso di ricostruire il corpo pista per conci di lunghezza fissa, in modo da andarli ad applicare, con parametri variabili, lungo la *Centre Line*. Sono stati realizzati due tipi di concio, uno per sezione, che si adattano a tre punti individuati lungo la CL. Per questo, i **conci rettilinei** e i **conci in curva** sono stati realizzati come *Famiglie Adattive* in Revit.

2.1.1 Famiglia adattiva Revit

Le famiglie dei due conci sono basate su tre **reference point** posizionati all'inizio, al centro e alla fine. In questo modo è possibile applicare la famiglia in 3 punti scelti della CL e ripetere il procedimento su tutta la lunghezza; dunque, è possibile governare la curvatura e direzione dell'elemento.

In corrispondenza dei tre punti si posiziona il **profilo del concio** importato come *nested family* con i propri parametri variabili. Il profilo è stato creato con una famiglia adattiva perché necessario per posizionarlo successivamente come nested family.

La famiglia **PROFILO IN RETTILINEO** è stata impostata su una serie di piani di riferimento verticali e orizzontali quotati rispetto al centro (Figura 68). Il **centro** della sezione è stato preso come il punto ad un'altezza fissa dal lato inferiore della soletta centrale e a metà dello stesso lato. Rispetto al centro sono stati creati una serie di piani di riferimento, uno per ogni lato della sezione. Sulla base delle intersezioni dei piani è stata realizzata una polilinea attraverso delle *model line*, la polilinea è vincolata ai piani in modo tale che si modifichi insieme ad essi.

Per modificare la sezione si deve agire sui parametri della famiglia elencati a Figura 69. Questi sono tutti *shared parameters* di istanza, in modo da poter essere modificati una volta importato il profilo nella famiglia del concio. Alcuni sono inoltre dei parametri di *report* che dipendono direttamente dalle altre dimensioni, quindi, non possono essere definiti manualmente.

Tra i parametri si distinguono alcuni variabili e altri fissi. Quelli fissi riguardano le porzioni della sezione che, come visto precedentemente, è sempre mantenuta costante; tutti gli altri sono invece variabili. Le ali esterne sono definite dalle altezze **H1**, **H2** e larghezze **L1**, **L2** e **L3** (dim. fisse). Anche lo **Spessore** rimane costante di 170 mm, così come l'**Altezza** di 500 mm.

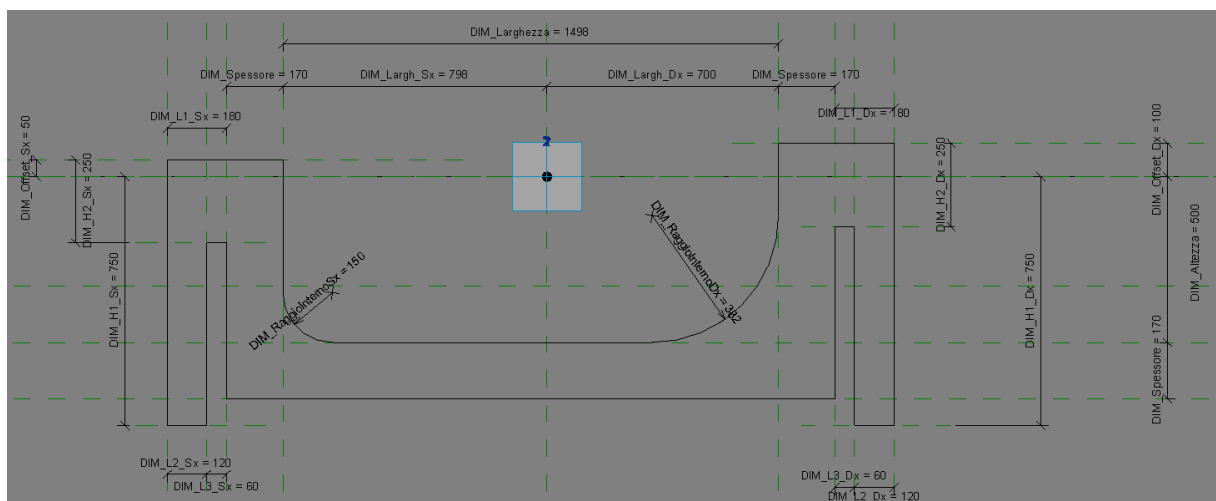


Figura 68: Famiglia adattiva del Profilo del concio in rettilineo.

Quote			
DIM_Altezza (default)	500.0	=	☐
DIM_H1_Dx (default)	750.0	=	☐
DIM_H1_Sx (default)	750.0	=	☐
DIM_H2_Dx (default)	250.0	=	☐
DIM_H2_Sx (default)	250.0	=	☐
DIM_L1_Dx (default)	180.0	=	☐
DIM_L1_Sx (default)	180.0	=	☐
DIM_L2_Dx (default)	120.0	=	☐
DIM_L2_Sx (default)	120.0	=	☐
DIM_L3_Dx (rapporto)	60.0	=	
DIM_L3_Sx (rapporto)	60.0	=	
DIM_Largh_Dx (default)	700.0	=	☐
DIM_Largh_Sx (default)	798.0	=	☐
DIM_Larghezza (rapporto)	1498.0	=	
DIM_Offset_Dx (default)	100.0	=	☐
DIM_Offset_Sx (default)	50.0	=	☐
DIM_RaggioInternoDx (default)	382.0	=	☐
DIM_RaggioInternoSx (default)	150.0	=	☐
DIM_Spessore (default)	170.0	=	☐

Figura 69: Parametri della famiglia del Profilo del concio rettilineo.

Si è scelto di mantenere il valore **Altezza** costante e di aggiungere a questa degli Offset a destra (**Offset_Dx**) e sinistra (**Offset_Sx**). Di base, infatti, la sezione è alta 0.5m e nel caso in cui questa varia allora si danno i valori corrispondenti agli offset, altrimenti rimane a 0.5m. La larghezza è definita dalle dimensioni di larghezza a destra (**Largh_Dx**) e sinistra (**Largh_Sx**), riportate per ogni sezione; da queste due dipende il parametro totale **Larghezza**.

Gli ultimi 2 parametri sono i raggi di curvature della parte più interna, in base alla direzione della curva infatti questi possono variare. Il **Raggio Interno Dx** e **Sx** di base sono pari a 150 mm, nelle zone di transizione vanno ad aumentare per adattarsi al guscio in curva.

A questo punto si crea la famiglia adattiva del **CONCIO IN RETTILINEO**, importando il profilo. Il concio, come anticipato, si adatta su tre reference points come riportato a sinistra della Figura 71. Per i tre punti si fa passare una *reference spline* che traccia la curva ipotetica, su questa si vanno a posizionare il profilo iniziale, centrale e finale.

Per posizzionarli è stato necessario mettere degli *adaptive points* lungo la curva perché altrimenti variando la direzione la sezione veniva specchiata e si andava a invertire il lato dentro con il sinistro. Quindi la famiglia del profilo è stata duplicata, per il punto iniziale (chiamato **P1**) e per il punto finale (**P2**), e si è andati a mettere due reference points al centro così che il primo permette di posizionare la sezione e il secondo di direzionarla. Alla Figura 70 sono riportate le due famiglie con il doppio reference point.

Nella famiglia del concio sono stati posizionati cinque *adaptive points*: all'inizio e alla fine, vicino ai punti 1 e 3; al centro ne sono stati posizionati due per distinguere il reference point che definisce il tracciato, dall'adaptive point che deve corrispondere con la metà del concio.

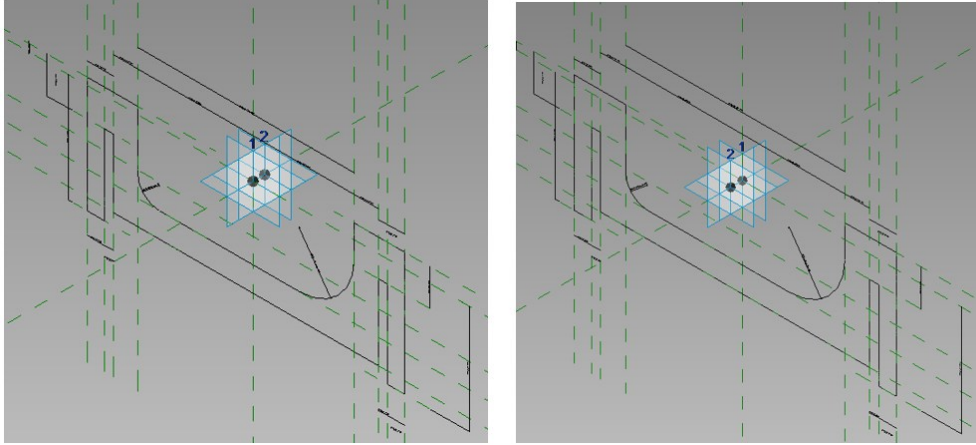


Figura 70: Famiglia adattiva concio rettilineo: a sinistra per P1 (inizio) e destra per P2 (fine).

Definiti i vari punti lungo la curva si vanno a posizionare le famiglie di profili. La famiglia del profilo P1 viene posizionata sia all'inizio che al centro, quella del profilo P2 alla fine. Utilizzando la curva e i profili si va a creare il solido di estrusione (Figura 71).

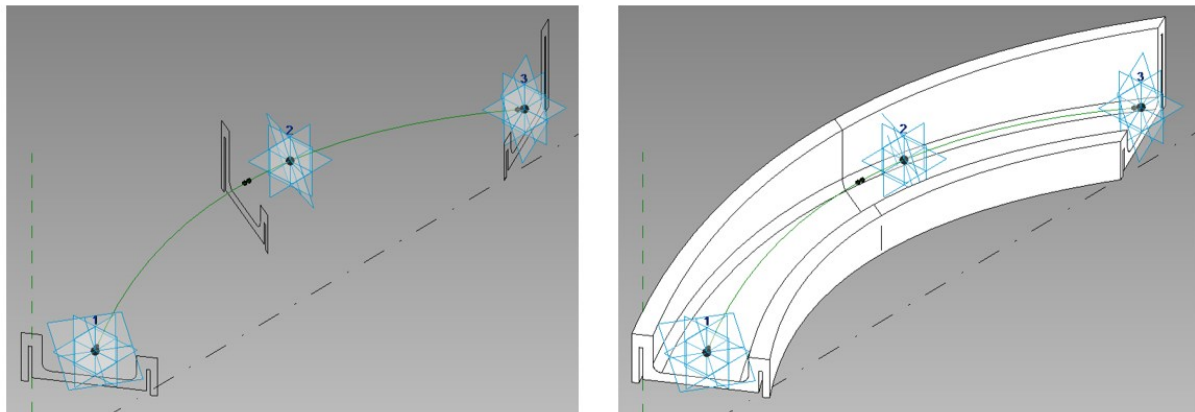


Figura 71: Creazione della famiglia adattiva del concio in rettilineo.

Come proprietà generali del concio, per far sì che sia veritiero con il progetto reale, si imposta come elemento strutturale. Questo è definito in calcestruzzo e può ospitare le armature.

I parametri delle tre sezioni devono essere modificabili in base all'effettivo andamento nel tracciato. Il punto P1 deve avere i parametri della faccia iniziale, il punto P2 i parametri della faccia finale e il punto Pm (centrale) deve andare a creare un adattamento; quindi, i suoi parametri saranno dati dalla media di quelli in P1 e P2.

La famiglia del concio è stata creata con i parametri mostrati a Figura 72, questi sono gli stessi parametri della famiglia del profilo ma copiati per i tre punti. In P1 e P2 i parametri sono tutti *shared parameters* di *istanza* così che possano essere definiti in modo differente per ogni concio. In Pm i parametri sono dati dalle formule riportate a lato, quindi non possono essere modificati manualmente.

A questo punto i parametri della famiglia concio sono stati uguagliati ai parametri della nested family, così che andando a modificare “DIM_Altezza_P2” in realtà vado a modificare il parametro “DIM_Altezza” (Figura 69) della famiglia profilo posizionata in quel punto. Alla sezione iniziale uguaglio i parametri per P1, a quella centrale i parametri per Pm e a quella finale i parametri per P2.

Dimensions			
DIM_Altezza_P2 (default)	500.0	=	☐
DIM_Altezza_P1 (default)	500.0	=	☐
DIM_Altezza_Pm (default)	500.0	$= (\text{DIM_Altezza_P2} + \text{DIM_Altezza_P1}) / 2$	☐
DIM_LarghDx_P1 (default)	700.0	=	☐
DIM_LarghDx_P2 (default)	700.0	=	☐
DIM_LarghDx_Pm (default)	700.0	$= (\text{DIM_LarghDx_P2} + \text{DIM_LarghDx_P1}) / 2$	☐
DIM_LarghSx_P1 (default)	900.0	=	☐
DIM_LarghSx_P2 (default)	900.0	=	☐
DIM_LarghSx_Pm (default)	700.0	$= (\text{DIM_LarghDx_P2} + \text{DIM_LarghDx_P1}) / 2$	☐
DIM_OffsetDx_P1 (default)	0.0	=	☐
DIM_OffsetDx_P2 (default)	0.0	=	☐
DIM_OffsetDx_Pm (default)	0.0	$= (\text{DIM_OffsetDx_P2} + \text{DIM_OffsetDx_P1}) / 2$	☐
DIM_OffsetSx_P1 (default)	200.0	=	☐
DIM_OffsetSx_P2 (default)	1000.0	=	☐
DIM_OffsetSx_Pm (default)	600.0	$= (\text{DIM_OffsetSx_P2} + \text{DIM_OffsetSx_P1}) / 2$	☐
DIM_RintDx_P1 (default)	150.0	=	☐
DIM_RintDx_P2 (default)	150.0	=	☐
DIM_RintDx_Pm (default)	150.0	$= (\text{DIM_RintDx_P2} + \text{DIM_RintDx_P1}) / 2$	☐
DIM_RintSx_P1 (default)	150.0	=	☐
DIM_RintSx_P2 (default)	150.0	=	☐
DIM_RintSx_Pm (default)	150.0	$= (\text{DIM_RintSx_P2} + \text{DIM_RintSx_P1}) / 2$	☐
DIM_Spessore_P1 (default)	170.0	=	☐
DIM_Spessore_P2 (default)	170.0	=	☐
DIM_Spessore_Pm (default)	170.0	$= (\text{DIM_Spessore_P2} + \text{DIM_Spessore_P1}) / 2$	☐

Figura 72: Parametri della famiglia del Concio in rettilineo.

Il procedimento appena descritto è lo stesso utilizzato anche per realizzare la famiglia del concio in curva.

Il **PROFILO IN CURVA** è proposto alla Figura 73 e i suoi parametri alla Figura 74. Il ragionamento è quello descritto in precedenza: identificato il punto centrale e i piani di riferimento si va a costruire la polilinea e si quotano i piani. In questo caso cambiano tutti i parametri relativi alla porzione di guscio; infatti, la figura è realizzata da una porzione circolare interna ed esterna e una trave in sommità. Si è cercato però di mantenere gli stessi nomi del profilo in rettilineo per creare omogeneità nei parametri.

A destra si hanno gli stessi parametri del rettilineo, a sinistra invece ho un raggio di curvatura interno (**Raggio Interno_Sx**) ed uno esterno (**Raggio Esterno_Dx**, definito come formula). La trave in sommità ha dimensioni fisse, identificate con **H1**, **H2**, **L1**.

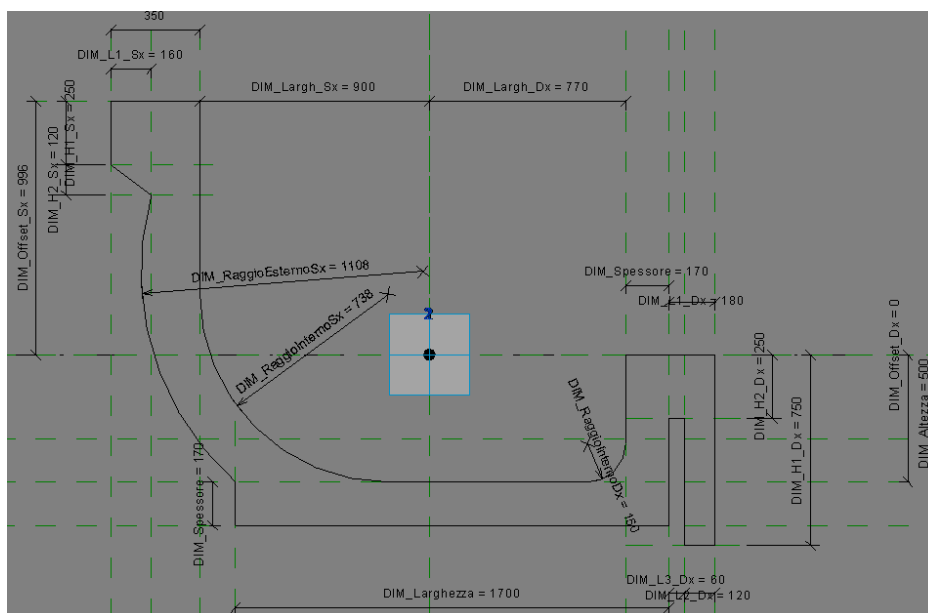


Figura 73: Famiglia adattiva del Profilo del concio in curva.

Dimensions		
DIM_Altezza (default)	500.0	=
DIM_H1_Dx (default)	750.0	=
DIM_H1_Sx (default)	250.0	=
DIM_H2_Dx (default)	250.0	=
DIM_H2_Sx (default)	120.0	=
DIM_L1_Dx (default)	180.0	=
DIM_L1_Sx (default)	160.0	=
DIM_L2_Dx (default)	120.0	=
DIM_L3_Dx (report)	60.0	=
DIM_Largh_Dx (default)	770.0	=
DIM_Largh_Sx (default)	900.0	=
DIM_Larghezza (default)	1700.0	=
DIM_Offset_Dx (default)	0.0	=
DIM_Offset_Sx (default)	996.0	=
DIM_RaggioEsternoSx (default)	1107.6	= DIM_RaggioInternoSx * 1.5
DIM_RaggioInternoDx (default)	150.0	=
DIM_RaggioInternoSx (default)	738.4	=
DIM_Spessore (default)	170.0	=

Figura 74: Parametri della famiglia adattiva del Profilo del concio in curva.

Il **CONCIO IN CURVA** viene eseguito con una nuova adaptive family, nella quale vengono importati i profili P1 e P2 (Figura 75). Definiti i tre reference points e gli adaptive points si crea la curva e si applicano le sezioni, da queste si crea l'estrusione dell'elemento strutturale (Figura 76). I parametri della famiglia adattiva del concio sono gli stessi della famiglia del profilo, moltiplicati per le tre sezioni (Figura 77). Quindi si vanno ad uguagliare i parametri del concio con quelli dei profili nei tre punti, ottenendo un concio variabile in ogni punto del tracciato.

Avendo a disposizione le famiglie dei due conci, si procede nell'individuazione del tracciato e nell'applicazione degli elementi. Andando a modificare i parametri impostati in base alle dimensioni effettive di progetto.

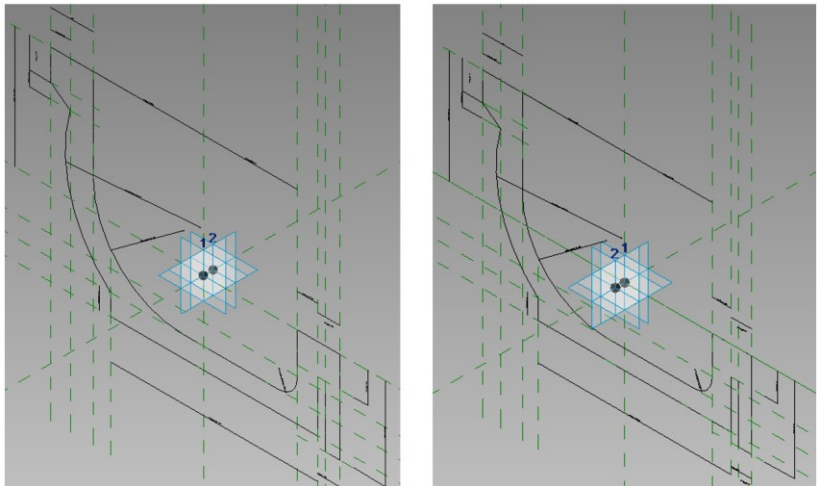


Figura 75: Famiglia adattiva concio in curva: a sinistra per P1 (inizio) e destra per P2 (fine).

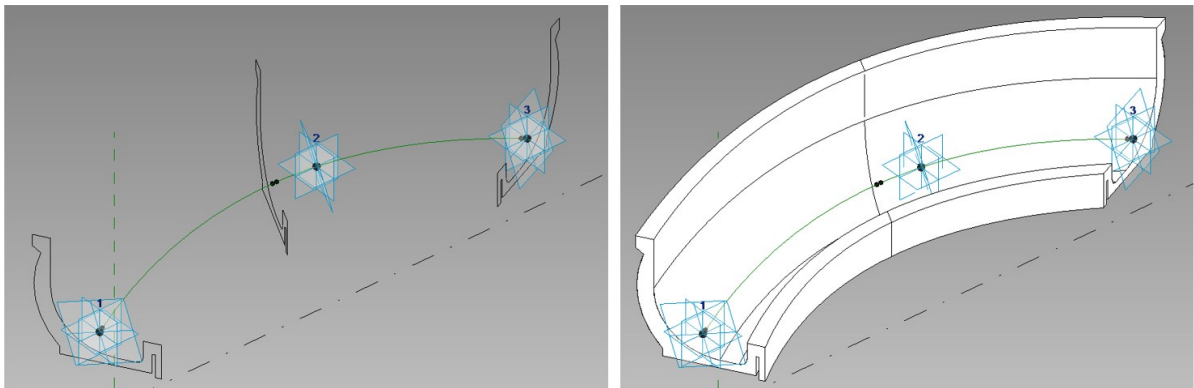


Figura 76: Creazione della famiglia adattiva del concio in curva.

Dimensions			
DIM_Altezza_P2 (default)	500.0	=	☐
DIM_Altezza_P1 (default)	500.0	=	☐
DIM_Altezza_Pm (default)	500.0	=(DIM_Altezza_P2 + DIM_Altezza_P1) / 2	☐
DIM_LarghDx_P1 (default)	845.0	=	☐
DIM_LarghDx_P2 (default)	840.0	=	☐
DIM_LarghDx_Pm (default)	842.5	=(DIM_LarghDx_P2 + DIM_LarghDx_P1) / 2	☐
DIM_LarghSx_P1 (default)	944.0	=	☐
DIM_LarghSx_P2 (default)	949.0	=	☐
DIM_LarghSx_Pm (default)	946.5	=(DIM_LarghSx_P2 + DIM_LarghSx_P1) / 2	☐
DIM_Larghezza_P1 (default)	1789.0	=	☐
DIM_Larghezza_P2 (default)	1789.0	=	☐
DIM_Larghezza_Pm (default)	1789.0	=(DIM_Larghezza_P2 + DIM_Larghezza_P1) / 2	☐
DIM_OffsetDx_P1 (default)	0.0	=	☐
DIM_OffsetDx_P2 (default)	0.0	=	☐
DIM_OffsetDx_Pm (default)	0.0	=(DIM_OffsetDx_P2 + DIM_OffsetDx_P1) / 2	☐
DIM_OffsetSx_P1 (default)	1850.0	=	☐
DIM_OffsetSx_P2 (default)	1850.0	=	☐
DIM_OffsetSx_Pm (default)	1850.0	=(DIM_OffsetSx_P2 + DIM_OffsetSx_P1) / 2	☐
DIM_RintDx_P1 (default)	150.0	=	☐
DIM_RintDx_P2 (default)	150.0	=	☐
DIM_RintDx_Pm (default)	150.0	=(DIM_RintDx_P2 + DIM_RintDx_P1) / 2	☐
DIM_RintSx_P1 (default)	1268.0	=	☐
DIM_RintSx_P2 (default)	1244.0	=	☐
DIM_RintSx_Pm (default)	1256.0	=(DIM_RintSx_P2 + DIM_RintSx_P1) / 2	☐
DIM_Spessore_P1 (default)	170.0	=	☐
DIM_Spessore_P2 (default)	170.0	=	☐
DIM_Spessore_Pm (default)	170.0	=(DIM_Spessore_P2 + DIM_Spessore_P1) / 2	☐

Figura 77: Parametri della famiglia del Concio in curva.

2.1.2 Implementazione in Dynamo

In ambiente Dynamo è ora possibile andare a posizionare i concetti rettilinei e in curva come descritto negli elaborati progettuali. Si crea un file Revit all'interno del quale vengono solamente importate le famiglie dei concetti, dopo di che facendo girare gli script Dynamo si andrà a costruire il guscio. Per applicare le famiglie adattive lungo il tracciato il processo operativo che si vuole seguire è il seguente:

- Importare le coordinate della Centre Line dai progetti e ricreare la curva;
- Dividere la curva in parti uguali e individuare tre punti per ogni tratto;
- Applicare le famiglie dei conci ai gruppi di tre punti;
- Applicare le proprietà corrette alle sezioni dei conci.

Di seguito è riportato il flusso dello script che verrà poi analizzato nel dettaglio.

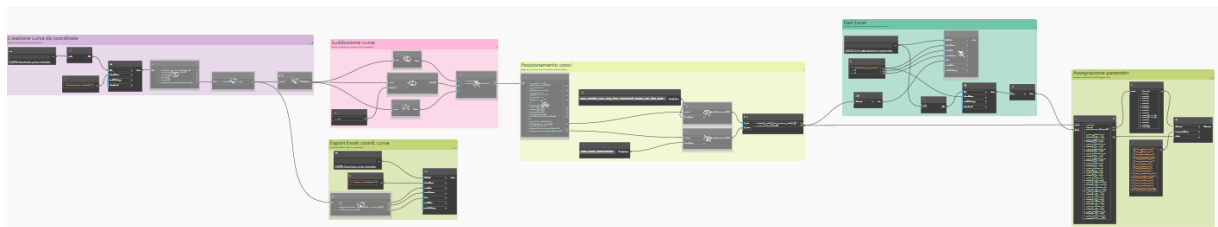


Figura 78: Script Dynamo per la generazione della geometria del guscio.

La prima fase è l'**importazione delle coordinate** della Curva Cristallo (Figura 79). L'elenco delle coordinate è stato estratto dagli elaborati progettuali e riportato in un file excel per tutta la progressiva della Pista da Bob. Dell'elenco interessa la progressiva che va da Sx=888 a 1050m, per cui si andrà a filtrare il file excel.

Il flusso parte dall'importazione del file excel attraverso dei nodi che definiscono il percorso e il nome del foglio. Poi si vanno ad estrapolare le coordinate per le righe che interessano la Curva Cristallo, in particolare dalla 1801 alla 2125. Dai punti scelti si va a creare una *NurbsCurve.ByPoints*.

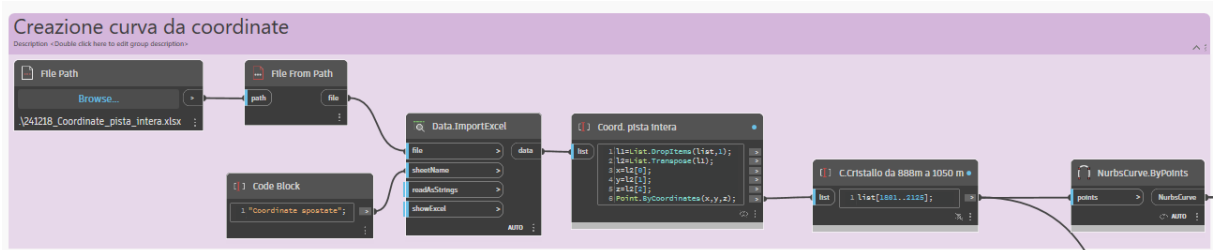


Figura 79: Importazione delle coordinate della Curva Cristallo.

La curva viene in seguito **suddivisa in parti uguali** (Figura 80), si sceglie di suddividerla in 50 parti. Per ogni segmento si individua il punto iniziale, centrale e finale per **posizionare i conchi** (Figura 81). Nel caso della curva cristallo, e per la suddivisione scelta, i conchi in rettilineo

sono due, uno all'inizio della curva e uno alla fine.

Una volta posizionati i conci questi avranno le dimensioni di default della famiglia, dovranno essere quindi modificate in base alle dimensioni effettive. Alla Figura 83 sono elencate le **proprietà geometriche** delle curve estrapolate dai documenti progettuali di riferimento.

Quindi, si vanno ad estrapolare da dynamo gli Id dei conci creati, che si vanno ad inserire nella prima colonna dell'exel. In seguito, l'exel viene reimportato e andrà a leggere tutti i parametri riferiti all'id del concio corretto (Figura 82). I conci, quindi, avranno le dimensioni effettive di progetto (Figura 84).

Da Figura 85 a Figura 87 sono riportate le **viste 3D** dei conci posizionati. Il processo descritto si può applicare a tutti i tratti della curva, basta individuare le dimensioni per le sezioni tipologiche e i tratti in cui si ha sezione in rettilineo e quando quella in curva.

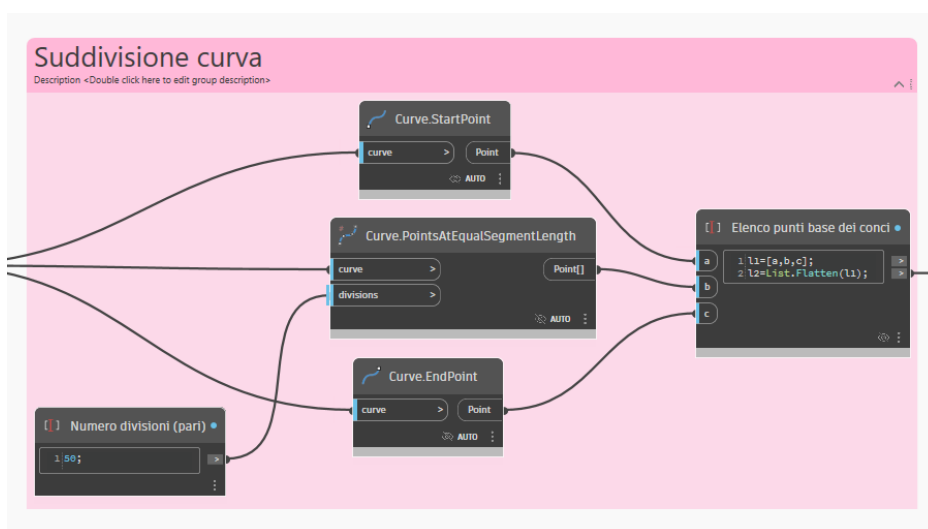


Figura 80: Suddivisione della curva in parti uguali.



Figura 81: Posizionamento dei conci rettilinei e in curva.

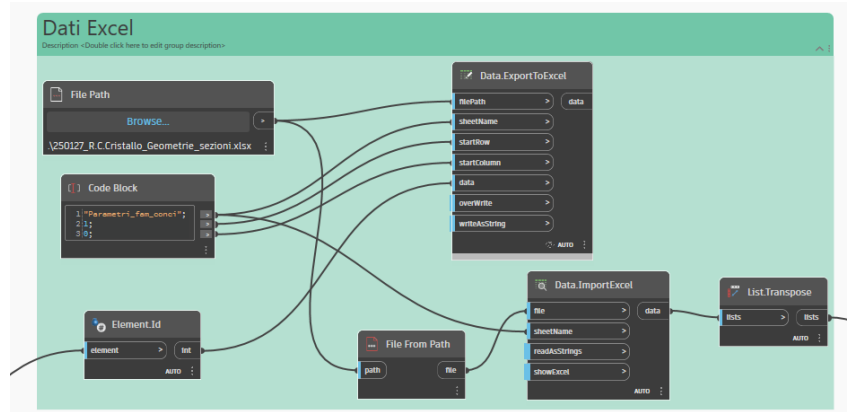


Figura 82: Esportazione dei codici dei conci e importazione delle proprietà.

DIM. GEN.	Altezza p1	Altezza p2	Off dx p1	Off dx p2	Off sx p1	Off sx p2	Rint dx p1	Rint dx p2	Rint sx p1	Rint sx p2	Larghezza P1	Larghezza P2	Largh dx P1	Largh dx P2	Largh sx P1	Largh sx P2	Spessore P1	Spessore P2
495223	0.5	0.5	0.111	0	0	0.468	0.382	0.15	0.15	0.322	1.5	1.7	0.798	0.6	0.702	0.9	0.17	0.17
495235	0.5	0.5	0	0	0.468	0.996	0.15	0.15	0.322	0.738	1.7	1.7	0.6	0.77	0.900	0.9	0.17	0.17
495250	0.5	0.5	0	0	0.996	1.375	0.15	0.15	0.738	1.274	1.7	1.765	0.77	0.865	0.900	0.9	0.17	0.17
495265	0.5	0.5	0	0	1.375	1.628	0.15	0.15	1.274	1.465	1.765	1.789	0.865	0.886	0.900	0.903	0.17	0.17
495280	0.5	0.5	0	0	1.628	1.778	0.15	0.15	1.465	1.44	1.789	1.79	0.886	0.882	0.903	0.908	0.17	0.17
495295	0.5	0.5	0	0	1.778	1.844	0.15	0.15	1.44	1.416	1.79	1.79	0.882	0.877	0.908	0.913	0.17	0.17
495310	0.5	0.5	0	0	1.844	1.85	0.15	0.15	1.416	1.391	1.79	1.79	0.877	0.871	0.913	0.919	0.17	0.17
495325	0.5	0.5	0	0	1.85	1.85	0.15	0.15	1.391	1.367	1.79	1.79	0.871	0.866	0.919	0.924	0.17	0.17
495340	0.5	0.5	0	0	1.85	1.85	0.15	0.15	1.367	1.342	1.79	1.79	0.866	0.861	0.924	0.929	0.17	0.17
495355	0.5	0.5	0	0	1.85	1.85	0.15	0.15	1.342	1.317	1.79	1.79	0.861	0.856	0.929	0.934	0.17	0.17
495370	0.5	0.5	0	0	1.85	1.85	0.15	0.15	1.317	1.293	1.79	1.79	0.856	0.851	0.934	0.939	0.17	0.17
495385	0.5	0.5	0	0	1.85	1.85	0.15	0.15	1.293	1.268	1.79	1.789	0.851	0.845	0.939	0.944	0.17	0.17
495400	0.5	0.5	0	0	1.85	1.85	0.15	0.15	1.268	1.244	1.789	1.789	0.845	0.84	0.944	0.949	0.17	0.17
495415	0.5	0.5	0	0	1.85	1.85	0.15	0.15	1.244	1.219	1.789	1.788	0.84	0.834	0.949	0.954	0.17	0.17
495430	0.5	0.5	0	0	1.85	1.85	0.15	0.15	1.219	1.194	1.788	1.787	0.834	0.828	0.954	0.959	0.17	0.17
495445	0.5	0.5	0	0	1.85	1.85	0.15	0.15	1.194	1.17	1.787	1.786	0.828	0.821	0.959	0.965	0.17	0.17
495460	0.5	0.5	0	0	1.85	1.835	0.15	0.15	1.17	1.145	1.786	1.785	0.821	0.815	0.965	0.97	0.17	0.17
495475	0.5	0.5	0	0	1.835	1.779	0.15	0.15	1.145	1.121	1.785	1.784	0.815	0.809	0.970	0.975	0.17	0.17
495490	0.5	0.5	0	0	1.779	1.653	0.15	0.15	1.121	1.096	1.784	1.783	0.809	0.803	0.975	0.98	0.17	0.17
495505	0.5	0.5	0	0	1.653	1.438	0.15	0.15	1.096	1.072	1.783	1.781	0.803	0.796	0.980	0.985	0.17	0.17
495520	0.5	0.5	0	0	1.438	1.132	0.15	0.15	1.072	1.047	1.781	1.779	0.796	0.789	0.985	0.99	0.17	0.17
495535	0.5	0.5	0	0	1.132	0.761	0.15	0.15	1.047	0.904	1.779	1.754	0.789	0.759	0.990	0.995	0.17	0.17
495550	0.5	0.5	0	0	0.761	0.387	0.15	0.15	0.904	0.583	1.754	1.627	0.759	0.636	0.995	0.991	0.17	0.17
495565	0.5	0.5	0	0	0.387	0.101	0.15	0.15	0.583	0.245	1.627	1.5	0.636	0.627	0.991	0.873	0.17	0.17
495580	0.5	0.5	0	0	0.101	0	0.15	0.15	0.245	0.245	1.5	1.5	0.627	0.75	0.873	0.75	0.17	0.17

Figura 83: Proprietà geometriche dei conci.

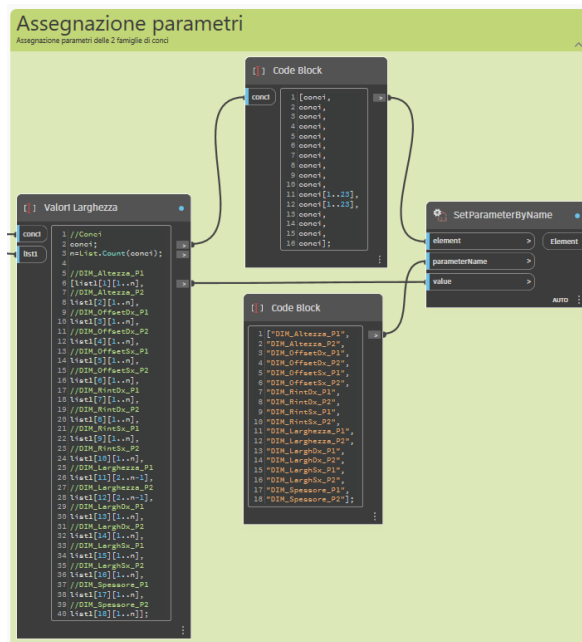


Figura 84: Assegnazione delle proprietà geometriche.

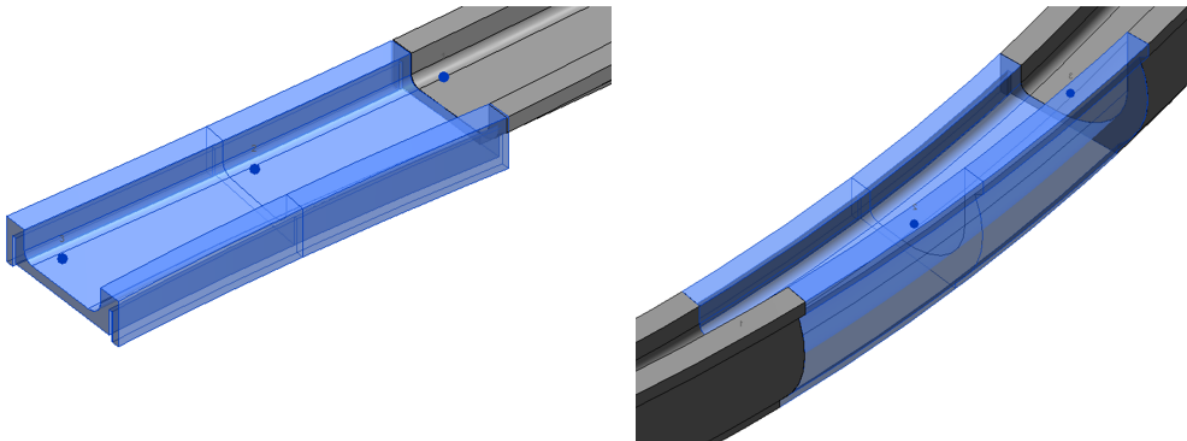


Figura 85: Esempio concio in rettilineo e in curva.

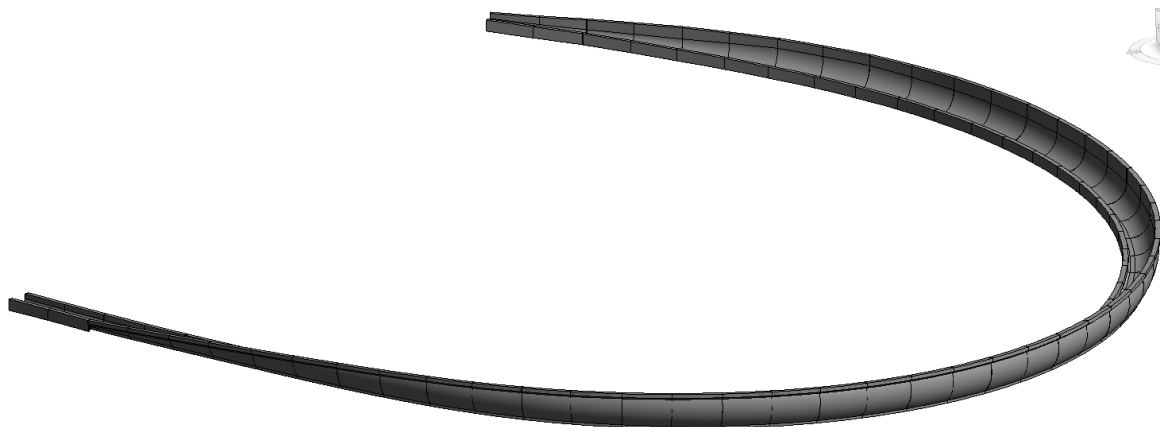


Figura 86: Vista 3D dei conci rettilinei e in curva.



Figura 87: Vista 3D della geometria.

2.2 Armature

Le armature dei conci sono realizzate attraverso due script separati, uno per i conci in rettilineo (Figura 88) e uno per quelli in curva (Figura 89). Questo perché, avendo sezione differente, i bordi e le facce di riferimenti subiscono delle piccole variazioni. I due script seguono lo stesso flusso di lavoro che è costituito dai seguenti punti:

- Individuazione dei conci ed esplosione in facce;
- Realizzazione dei profili in P1, Pm e P2 e offset di questi;
- Individuazione dei punti e creazione delle curve a cui si andranno ad applicare le armature longitudinali;
- Creazione delle curve ripetute con passo costante di tutte le armature trasversali;
- Applicazione delle *rebar* e modifica delle proprietà secondo BS-8666.

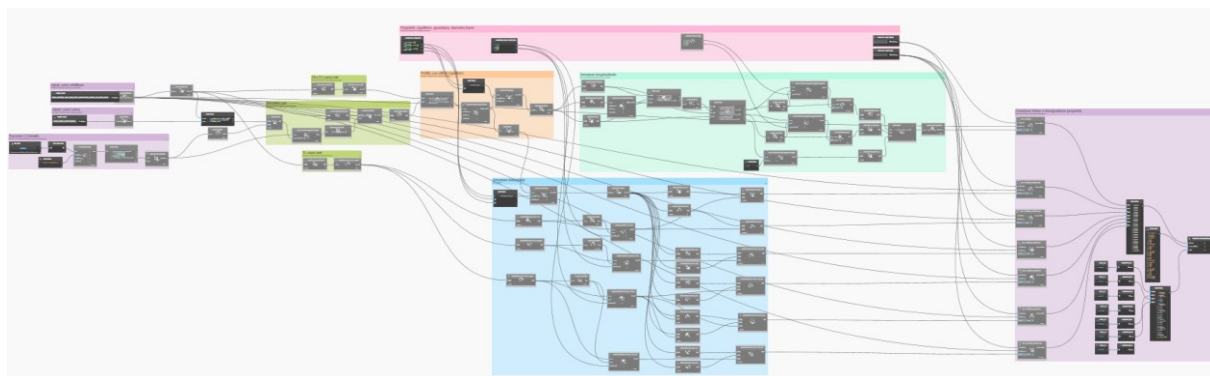


Figura 88: Script per armature longitudinali e trasversali dei conci in rettilineo.

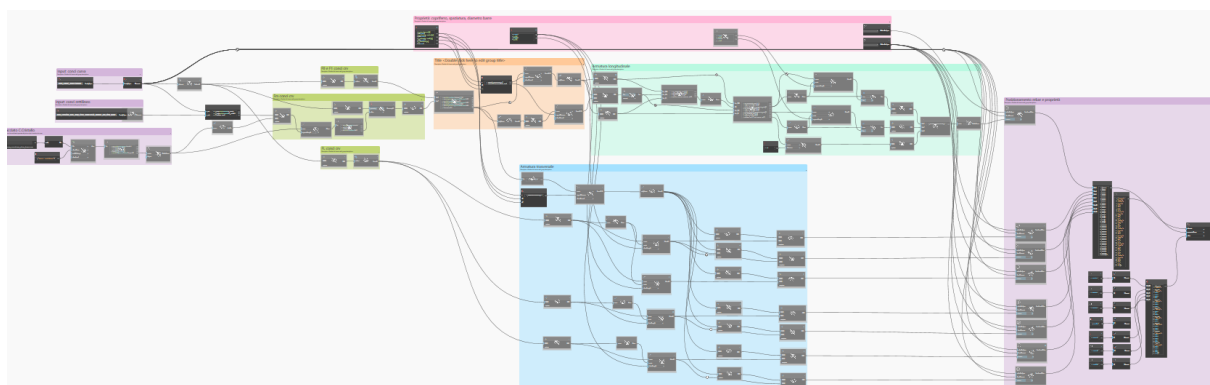


Figura 89: Script per armature longitudinali e trasversali dei conci in curva.

In entrambi i casi l'input iniziale è l'individuazione di tutti i conci e del tracciato che servirà ad impostare lo schema globale della curva (Figura 90). Da qui lo script si divide in due parti, un flusso porta alla creazione delle armature longitudinali utilizzando i tre profili principali del concio, l'altro flusso porta alla creazione di tutte le staffe partendo dalla faccia iniziale e individuando i percorsi lungo i quali si deve ripetere l'armatura. Prima verrà descritto il flusso delle armature longitudinali per i due tipi di concio, poi quello delle armature trasversali.

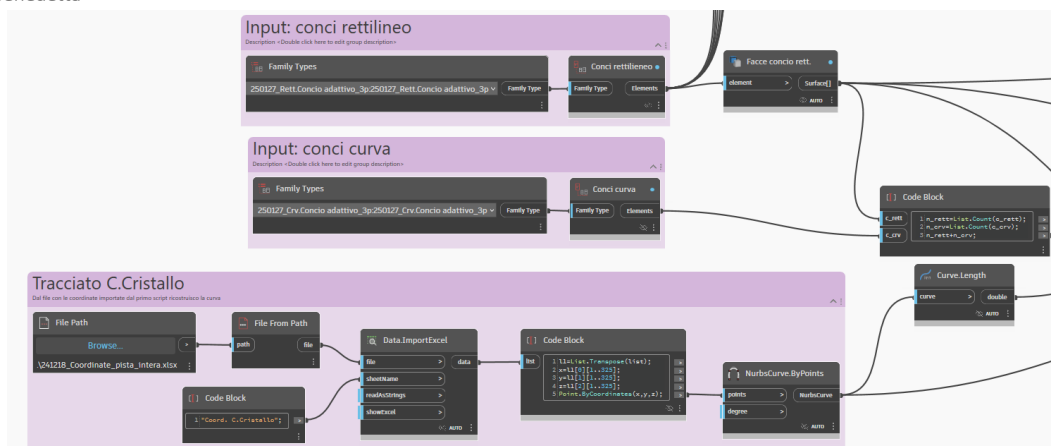


Figura 90: Importazione del tracciato, dei conci e loro esplosione in facce.

2.2.1 Armature longitudinali

Individuati i **CONCI IN RETTILINEO**, vengono filtrare le facce di interesse attraverso dei nodi python. Infatti, esplodendo i conci si ottengono 19 facce, di queste si prendono la faccia 18 e 19 per il profilo iniziale e finale per ogni concio. Delle facce si va quindi ad estrapolare il profilo.

Attraverso l'intersezione con i conci dei piani perpendicolari al tracciato si ottiene il profilo medio. Una volta individuati i piani perpendicolari, si vanno a filtrare le facce laterali dei conci. Le intersezioni devono poi essere filtrate nuovamente poiché i piani possono intercettare più conci, ma il profilo di interesse è solo quello dato dalla prima intersezione (Figura 91).

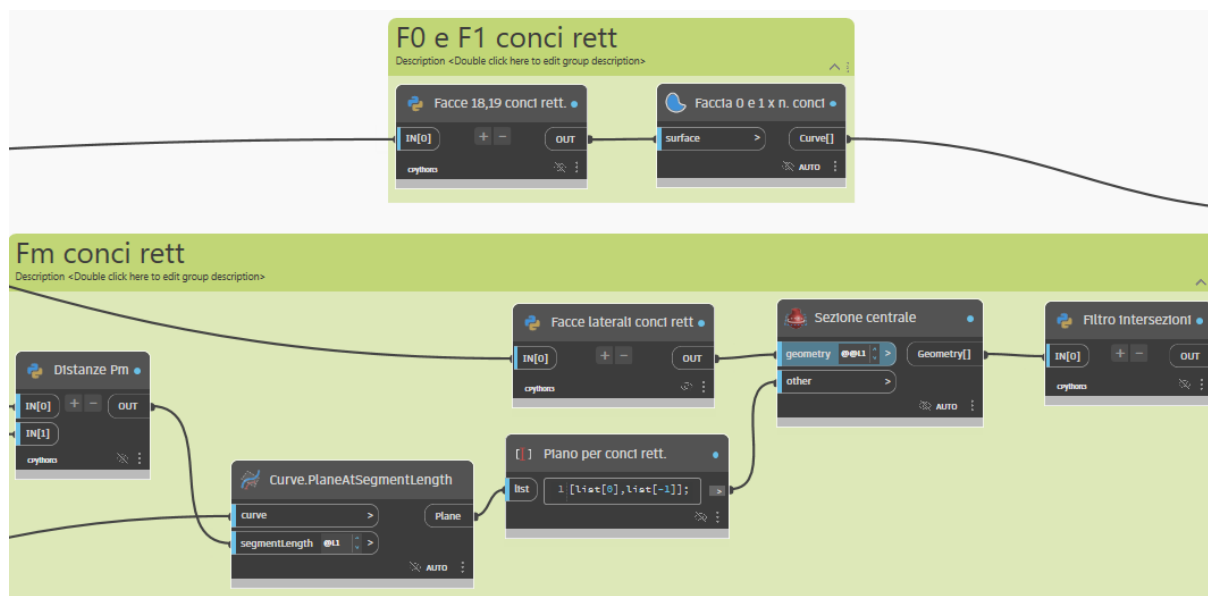


Figura 91: Individuazione profili delle sezioni in P1, Pm e P2 conci in rettilineo.

I profili delle tre facce sono necessari per individuare i punti per i quali far passare le armature, per fare questo serve individuare il copriferro. Da progetto le sezioni hanno un

copriferro di 4 cm, a questo viene aggiunto il diametro delle armature trasversali per non mettere le due in sovrapposizione. Attraverso un offset del profilo esterno si va a creare il bordo in cui posizionare i punti. Sono state prima unite le curve che costituiscono i profili come *Polycurve*, eseguito l'offset vengono nuovamente separate (Figura 92).

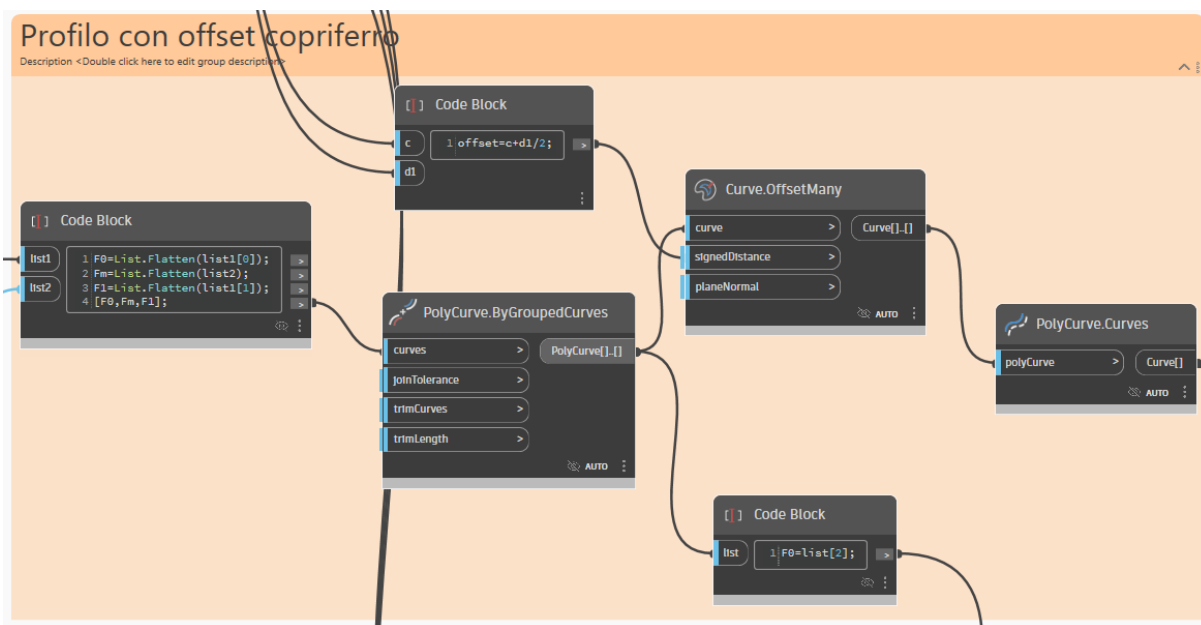


Figura 92: Offset dei profili delle sezioni in P1, Pm e P2 conci in rettilineo.

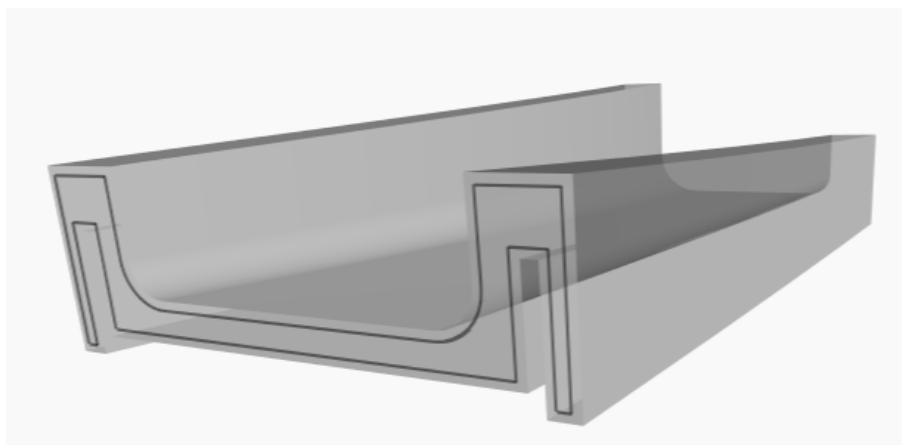


Figura 93: Offset bordo faccia iniziale concio in rettilineo.

Le armature longitudinali hanno delle spaziature differenti in base alla posizione, per questo si devono individuare dei bordi specifici per le suddivisioni in punti. Ogni concio ha tre profili, ogni profilo è costituito da 18 curve; per selezionare i profili giusti si utilizzano dei nodi python con cui si vanno a filtrare come mostrato a Figura 94.

Oltre all'armatura distribuita ci sono dei tondini in corrispondenza delle travi di bordo, per posizionare i punti viene filtrata la curva superiore e divisa per punti. I punti ottenuti vengono copiati verso il basso per ottenere in totale 10 tondini per ogni lato.

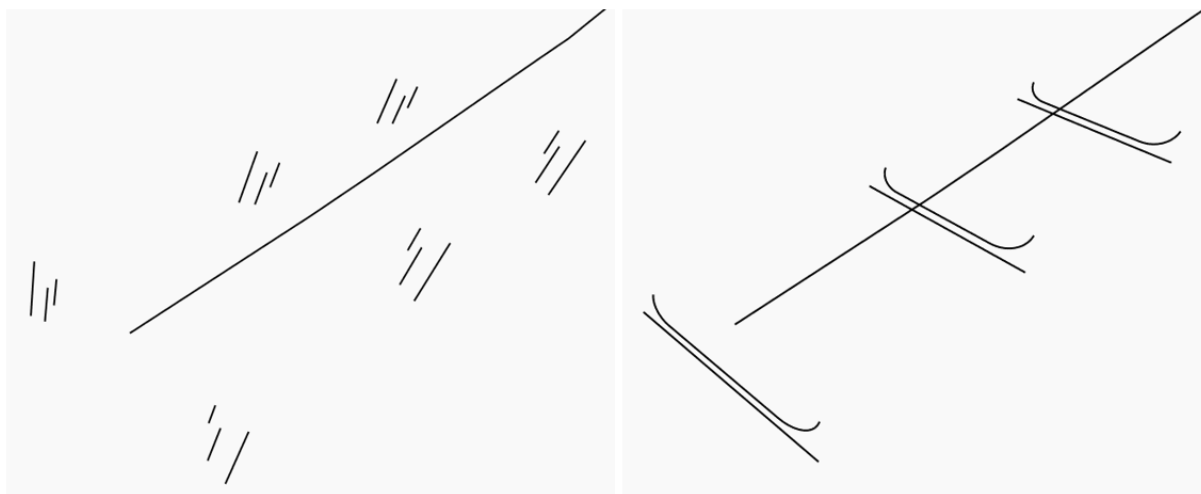


Figura 94: Bordi con passo 10cm a sinistra, passo 12,5cm a destra concci rettilinei.

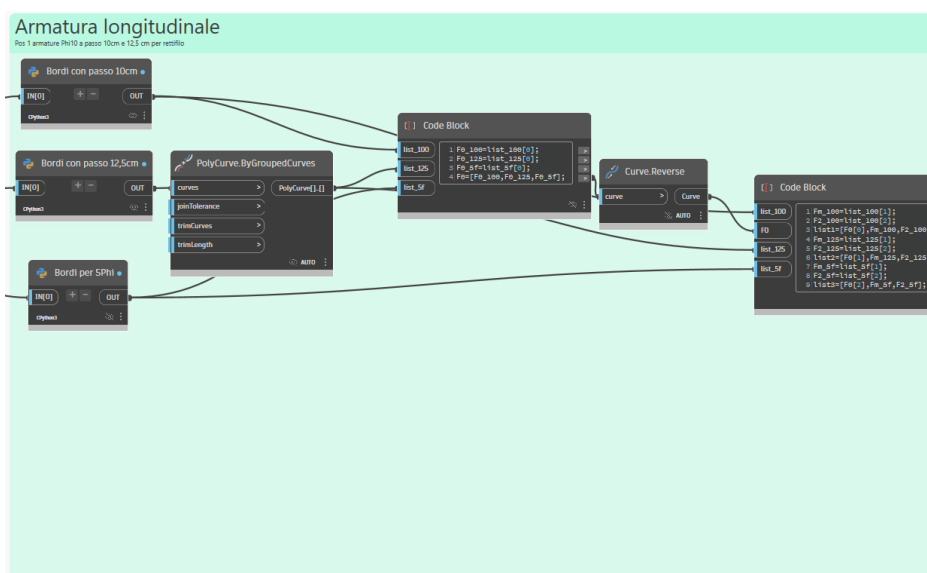


Figura 95: Curve per armatura longitudinale concci in rettilineo, parte 1.

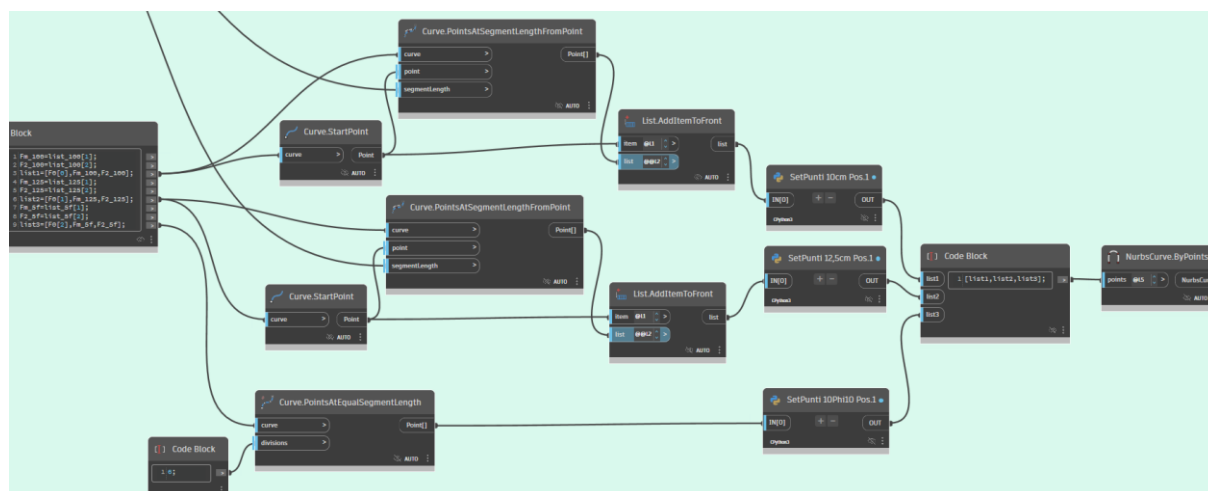


Figura 96: Curve per armatura longitudinale concci in rettilineo, parte 2.

I bordi per le armature con spaziatura di 10cm e 12,5 cm vengono divisi e i punti ottenuti vengono raggruppati. Lo stesso si fa per i punti dei 10 tondini fissi. Il raggruppamento è necessario per creare ogni linea delle armature; quindi, per ogni concio e per ogni tipologia di armatura si riordinano le liste per avere gruppi di 3 punti. Con questi punti vengono realizzate le *Polycurve* proposte a Figura 97 e Figura 98.

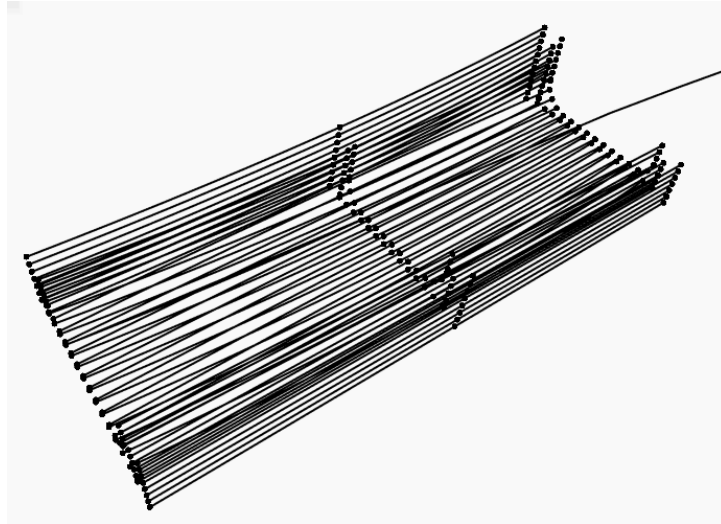


Figura 97: Curve per armature con spaziatura 10cm e 12,5cm, concio in rettilineo.

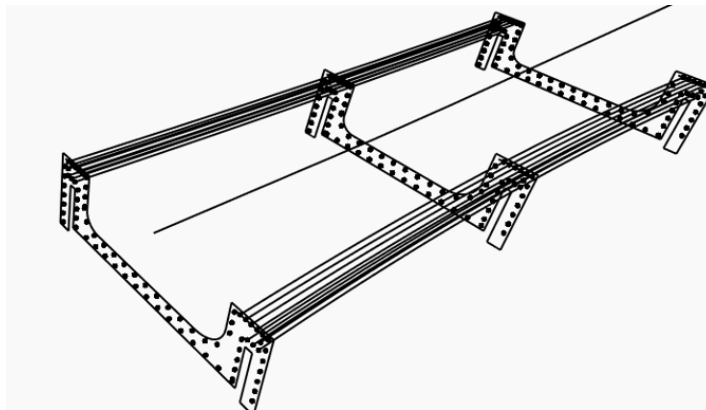


Figura 98: Curve per armature 10 Φ 10, concio in rettilineo.

Infine, vengono posizionate le armature con i nodi specifici per le *Structural Rebar*. Per applicare le proprietà giuste si utilizza il pacchetto *Structural Design* che permette di definire forme, diametri e tutti gli altri parametri.

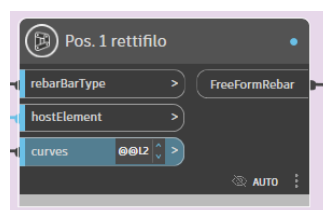


Figura 99: Posizionamento armature longitudinali conci in rettilineo.

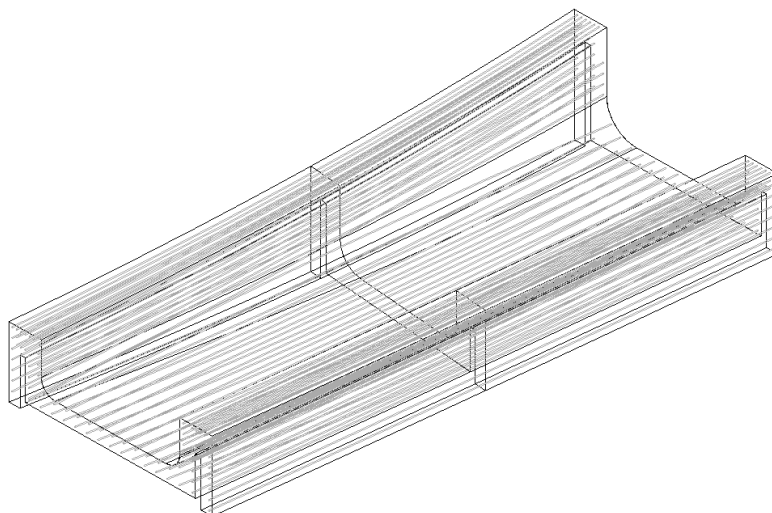


Figura 100: Armatura longitudinale concio in rettilineo.

Le armature longitudinali dei **CONCI IN CURVA** seguono lo stesso procedimento. Rispetto allo script per il rettilineo c'è da reimpostare sono il numero delle facce coinvolte e delle curve dei profili.

Quindi anche in questo caso si prendono i tre profili principali per ogni concio, si suddividono in base alla spaziatura e si creano i gruppi di punti ai quali applicare le curve. Un'altra differenza è che le armature con spaziatura coprono tutta la parte del guscio, mentre i 10 tondini fissi si trovano solo al lato interno.

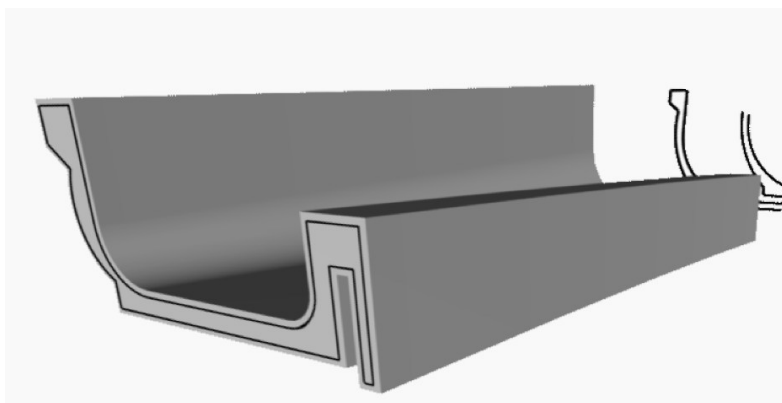


Figura 101: Offset bordo faccia iniziale concio in curva.

Quindi le armature longitudinali si dividono in tre parti: le armature con spaziatura 10cm si trovano agli elementi più esterni della sezione, le armature con spaziatura 12.5cm si trovano lungo tutta la parte centrale della sezione e nella parte a guscio, i tondini $10\Phi 10$ sono posizionati lungo il bordo nella parte interna della curva. A Figura 102 sono riportati i punti realizzati dalla suddivisione delle curve in parti uguali, per le tre sezioni di ogni concio sono distinti i punti per le tre tipologie di armature. Per applicare le curve questi sono stati riordinati in gruppi da tre, con lo stesso procedimento utilizzato per i conci in rettilineo.

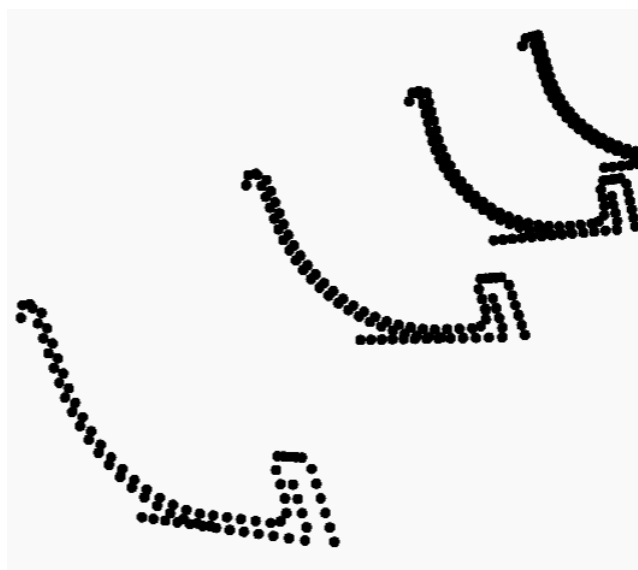


Figura 102: Punti di applicazione delle curve.

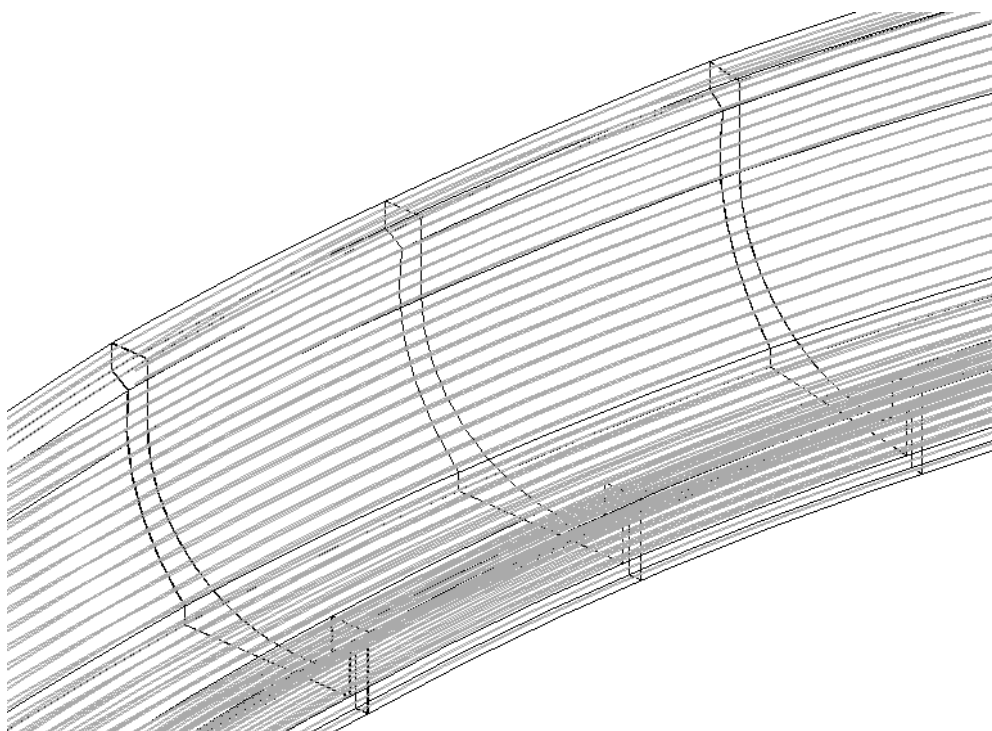


Figura 103: Vista 3D armature longitudinali concio in curva.

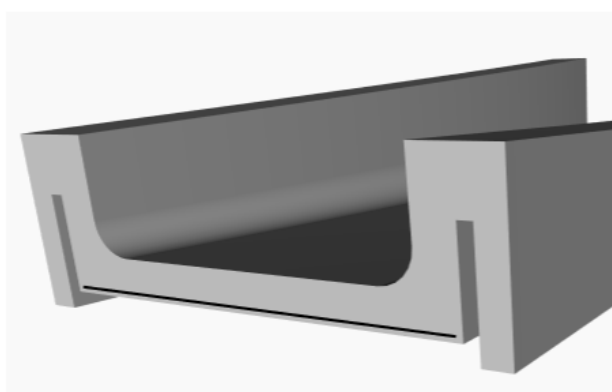
2.2.2 Armature trasversali

La realizzazione delle armature trasversali è della stessa tipologia per tutte le posizioni. Partendo da punti di riferimento è stata costruita la prima curva vincolata ai bordi della sezione, viene quindi ripetuta con spaziatura fissa lungo un bordo di riferimento del concio.

Nei **CONCI IN RETTILINEO** le armature trasversali occupano le Pos. 2, 3, 4, 5, 6, 9. Di seguito saranno riportate singolarmente. Per ogni posizione la prima curva viene realizzata in

base all'offset del profilo. L'offset è fatto in modo che le armature trasversali non si sovrappongano a quelle longitudinali. Questa viene adattata in base alla forma che deve assumere secondo la normativa BS 8666. In base alla forma vengono poi applicate le proprietà giuste ad ogni gruppo di armatura come riportato precedentemente a Tabella 2.

La linea che crea l'armatura in **Pos.2** viene selezionata dall'offset del bordo della sezione. Prendendo poi come riferimento un bordo del lato inferiore si va a copiare questa armatura con spaziatura di 12.5cm attraverso un nodo python. La Pos.2 ha una lunghezza variabile con la larghezza della sezione, per cui a questa dimensione viene applicato il parametro $a = \text{variabile}$ della forma BS00.



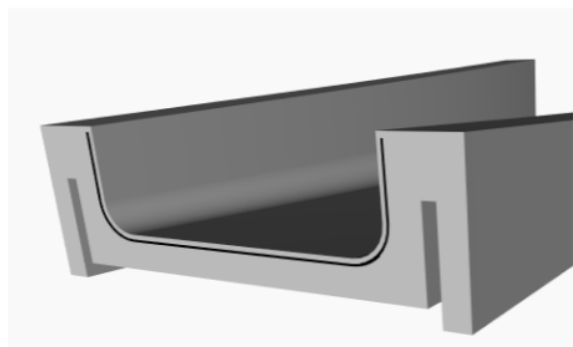
```
# Creazione vettori da P(i) a P(i+1)
n_conci=len(punti)
l_Pos2=[]
ind_c=range(n_conci)

#Traslazione curve
for c in ind_c:
    n_punti=len(punti[c])
    ind_i=range(n_punti-1)
    lPos2_Ci=[]
    l0=linee0[c][0]
    for i in ind_i:
        v0=Vector.ByTwoPoints(punti[c][i],punti[c][i+1])
        l1=Geometry.Translate(l0,v0.X,v0.Y,v0.Z)
        lPos2_Ci.append(l1)
        l0=l1
    l_Pos2.append(lPos2_Ci)

#Output
OUT = l_Pos2
```

Figura 104: Creazione linea per Pos.2 e copia lungo il bordo concio in rettilineo.

La **Pos.9** segue il bordo interno della parte centrale della sezione, il bordo viene costruito con 2 linee e 2 archi e ripetuto lungo il concio con spaziatura di 12.5cm. Le dimensioni della staffa sono $a = c = 28cm$, $b = var.$ e curvatura $r = 22cm$ per la forma BS21.



```
# Place your code below this line
facce0_ftr=[]

bf0=[13,14,15,16,17]

for concio in facce:
    bordi0=[concio[i] for i in bf0]
    facce0_ftr.append(bordi0)

for concio in facce0_ftr:
    l0=concio[0]
    l2=concio[2]
    l4=concio[4]

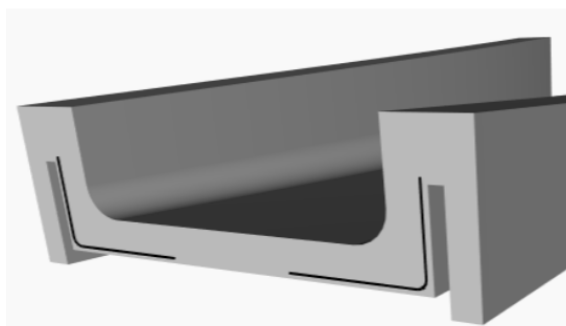
    P0e=l0.EndPoint
    P2s=l2.StartPoint
    P0s=l0.StartPoint
    v0=Vector.ByTwoPoints(P0s,P0e)
    arc0=Arc.ByStartPointEndPointStartTangent(P0e,P2s,v0)
    concio[1]=arc0

    P2e=l2.EndPoint
    P4s=l4.StartPoint
    P2s=l2.StartPoint
    v1=Vector.ByTwoPoints(P2s,P2e)
    arc1=Arc.ByStartPointEndPointStartTangent(P2e,P4s,v1)
    concio[3]=arc1

# Assign your output to the OUT variable.
OUT = facce0_ftr
```

Figura 105: Creazione curva per Pos.9 concio in rettilineo.

La **Pos.3** confina l'angolo a 90° della parte centrale della sezione, ha le stesse proprietà ad entrambi i lati. È realizzata con la traslazione del vertice di dimensioni fisse come mostrato a Figura 106. Le curve sono poi ripetute con spaziatura di 25cm. Le dimensioni della staffa sono $a = 55\text{cm}$, $b = 60\text{cm}$ e curvatura $r = 4\text{cm}$ per la forma BS11.



```
# Place your code below this line
c_Pos3=[]

r=0.04 #raggio arco
h=0.60 #altezza int staffa
d=0.008 #diametro Pos3

lato=0 #indice per sx

c_Pos3_dx=[] #indice bordo del profilo a sx

for concio in facce:
    b0=concio[7]
    b1=concio[6]

    P0=b0.EndPoint
    P1=b0.StartPoint

    k1=b1.Length
    PA=b0.PointAtSegmentLength(r)
    PB=b1.PointAtSegmentLength(k1-r)
    PC=b1.PointAtSegmentLength(k1-h)

    l0=Line.ByStartPointEndPoint(P0,PA)
    l1=Line.ByStartPointEndPoint(PB,PC)
    a0=Arc.ByFillet(l0,l1,r)

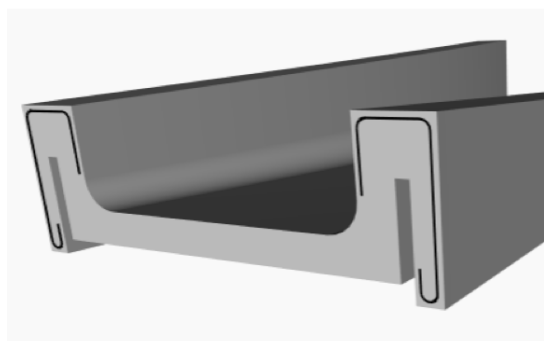
    c0=[l0,l1,a0]

    c_Pos3_dx.append(c0)

# Assign your output to the OUT variable.
OUT = c_Pos3_dx
```

Figura 106: Creazione Pos.3 destra e sinistra concio in rettilineo.

La **Pos.4** copre tutto il bordo esterno delle travi di bordo a destra e sinistra per creare un confinamento completo. È realizzata con la traslazione del bordo superiore e di quelli laterali, creando dei raccordi agli spigoli con archi di raggio fisso come mostrato a Figura 107. Le curve sono poi ripetute con spaziatura di 25cm. Le dimensioni della staffa sono $a = 30\text{cm}$, $b = 25\text{cm}$, $c = 66\text{cm}$, $d = 9\text{cm}$ e curvatura $r = 4\text{cm}$ per la forma BS22.



```
c_Pos4_ax=[] #indice bordo del profilo a sx

for concio in facce:
    b0=concio[0]
    b1=concio[1]
    b2=concio[2]

    P0=b0.StartPoint
    P1=b0.EndPoint

    Q0=Geometry.Translate(P0,0,0,-h0)
    Q1=b1.EndPoint
    Q2=b2.EndPoint

    k0=b0.Length
    k1=b1.Length
    k2=b2.Length
    PA=Geometry.Translate(P0,0,0,-r)
    PB=b0.PointAtSegmentLength(r)
    PC=b0.PointAtSegmentLength(k0-r)
    PD=Geometry.Translate(P1,0,0,-r)
    PE=b1.PointAtSegmentLength(k1-r)
    PF=b2.PointAtSegmentLength(r)
    PG=b2.PointAtSegmentLength(2*r)
    PH=Geometry.Translate(PG,0,0,r)
    PL=Geometry.Translate(PH,0,0,h2)

    l0=Line.ByStartPointEndPoint(Q0,PA)
    l1=Line.ByStartPointEndPoint(PB,PC)
    l2=Line.ByStartPointEndPoint(PD,PE)
    l3=Line.ByStartPointEndPoint(PH,PL)
    a0=Arc.ByFillet(l0,l1,r)
    a1=Arc.ByFillet(l1,l2,r)
    a2=Arc.ByThreePoints(PE,PF,PH)

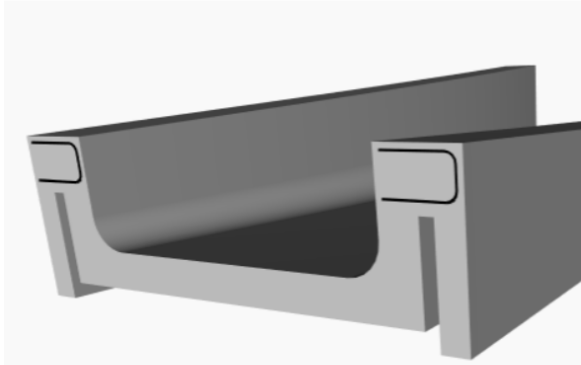
    c0=[l0,l1,l2,l3,a0,a1,a2]

    c_Pos4_ax.append(c0)

# Assign your output to the OUT variable.
OUT = c_Pos4_ax
```

Figura 107: Creazione Pos.4 destra e sinistra concio in rettilineo.

La **Pos.5** copre la parte superiore delle travi di bordo a destra e sinistra, è una staffa doppia posta a distanza debita per non metterle in sovrapposizione. È realizzata con la traslazione del bordo superiore e dei raccordi agli spigoli con archi di raggio fisso come mostrato a Figura 108. Le curve sono poi ripetute con spaziatura di 25cm. Le dimensioni della staffa sono $a = c = 24cm$, $b = 17cm$ e curvatura $r = 4cm$ per la forma BS21.



```
g0=[concio[n] for concio in facce]
for l0 in g0:
    Q0=l0.EndPoint
    P0=l0.StartPoint

    Q1=Geometry.Translate(Q0,0,0,-h)
    P1=Geometry.Translate(P0,0,0,-h)

    PA=l0.PointAtSegmentLength(r)
    PB=Geometry.Translate(P0,0,0,-r)
    PC=Geometry.Translate(P0,0,0,-(h-r))
    PD=Geometry.Translate(PA,0,0,-h)
    l1=l0.Length
    QA=l0.PointAtSegmentLength(l1-r)
    QB=Geometry.Translate(Q0,0,0,-r)
    QC=Geometry.Translate(Q0,0,0,-(h-r))
    QD=Geometry.Translate(QA,0,0,-h)

    l0=Line.ByStartPointEndPoint(Q0,PA)
    l1=Line.ByStartPointEndPoint(PB,PC)
    l2=Line.ByStartPointEndPoint(PD,Q1)
    a0=Arc.ByFillet(l0,l1,r)
    a1=Arc.ByFillet(l1,l2,r)
    c0=[l0,l1,l2,a0,a1]

    l3=Line.ByStartPointEndPoint(P0,QA)
    l4=Line.ByStartPointEndPoint(QB,QC)
    l5=Line.ByStartPointEndPoint(QD,P1)
    b0=Arc.ByFillet(l3,l4,r)
    b1=Arc.ByFillet(l4,l5,r)

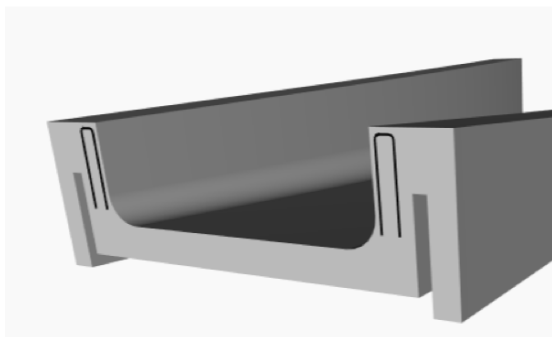
    V0=Vector.ByTwoPoints(punti[lato][c][0], punti[lato][c][1])
    v0=Vector.Normalized(V0)
    l3t=Geometry.Translate(l3,(v0.X*d),(v0.Y*d),(v0.Z*d))
    l4t=Geometry.Translate(l4,(v0.X*d),(v0.Y*d),(v0.Z*d))
    l5t=Geometry.Translate(l5,(v0.X*d),(v0.Y*d),(v0.Z*d))
    b0t=Geometry.Translate(b0,(v0.X*d),(v0.Y*d),(v0.Z*d))
    b1t=Geometry.Translate(b1,(v0.X*d),(v0.Y*d),(v0.Z*d))

    c1=[l3t,l4t,l5t,b0t,b1t]
    c=c+1
    c_Pos5_sx.append([c0,c1])

# Assign your output to the OUT variable.
OUT = c_Pos5_sx
```

Figura 108: Creazione Pos.5 destra e sinistra concio in rettilineo.

La **Pos.6** crea un collegamento tra la trave di bordo e la porzione arcuata della sezione. È realizzata con la traslazione di punti fissi del bordo superiore e dei raccordi agli spigoli con come mostrato a Figura 109. Le curve sono poi ripetute con spaziatura di 12.5cm. Le dimensioni della staffa sono $a = c = 40cm$, $b = 8cm$ e curvatura $r = 4cm$ per la forma BS21.



```
c_Pos6_sx=[]#indice bordo del profilo a sx
g0=[concio[n] for concio in facce]
for l0 in g0:
    P0=l0.StartPoint
    P1=l0.PointAtSegmentLength(l)

    Q0=Geometry.Translate(P0,0,0,-h)
    Q1=Geometry.Translate(P1,0,0,-h)

    PA=Geometry.Translate(P0,0,0,-r)
    PB=l0.PointAtSegmentLength(r)
    PC=l0.PointAtSegmentLength(l-r)
    PD=Geometry.Translate(P1,0,0,-r)

    l0=Line.ByStartPointEndPoint(Q0,PA)
    l1=Line.ByStartPointEndPoint(PB,PC)
    l2=Line.ByStartPointEndPoint(PD,Q1)
    a0=Arc.ByFillet(l0,l1,r)
    a1=Arc.ByFillet(l1,l2,r)
    c0=[l0,l1,l2,a0,a1]

    c=c+1
    c_Pos6_sx.append(c0)

# Assign your output to the OUT variable.
OUT = c_Pos6_sx
```

Figura 109: Creazione Pos.6 destra e sinistra concio in rettilineo.

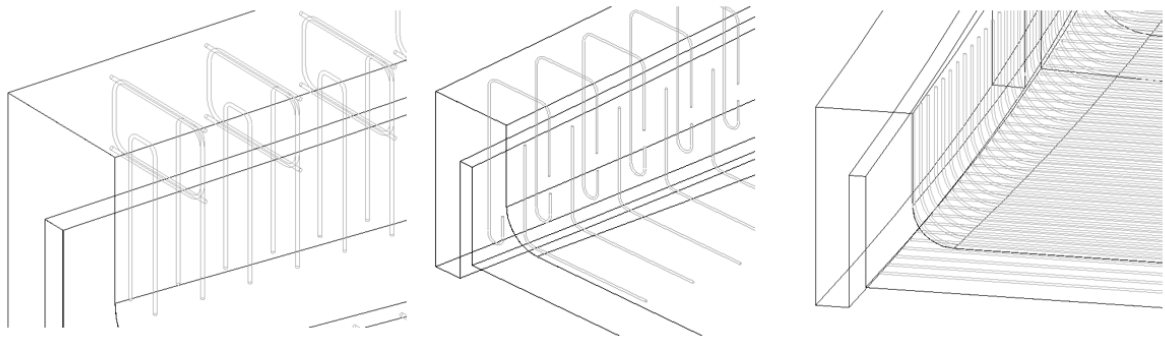


Figura 110: Dettaglio armature concio in rettilineo.

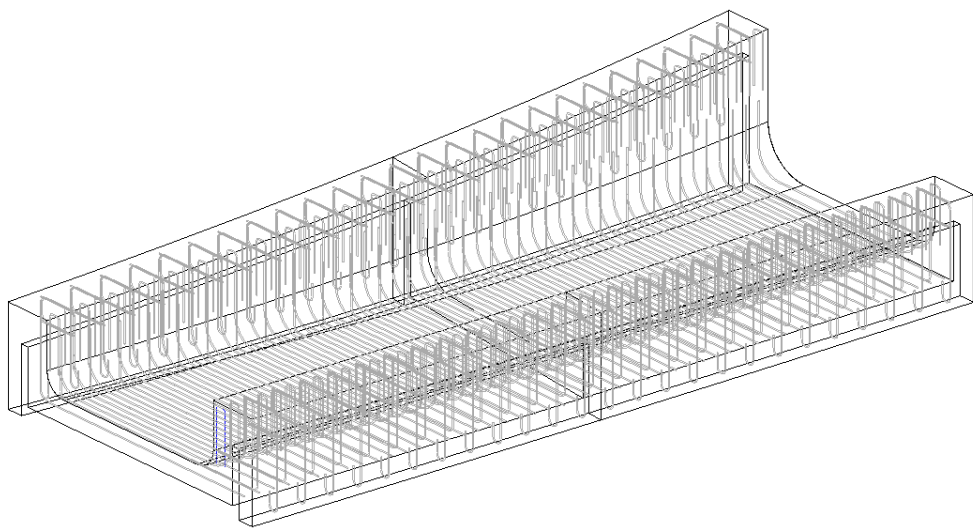


Figura 111: Concio in rettilineo con armature trasversali.

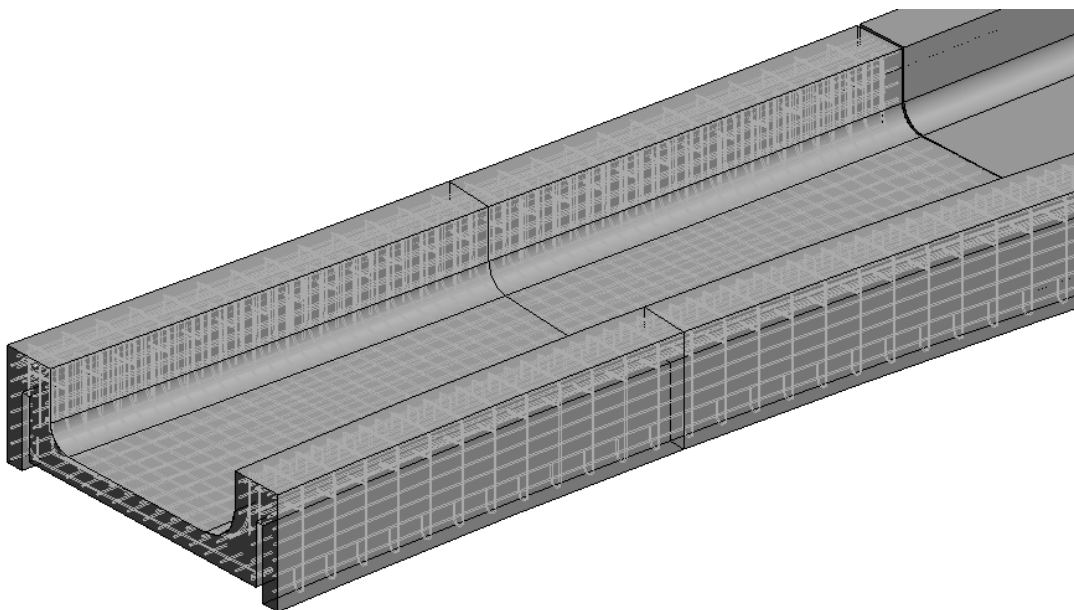
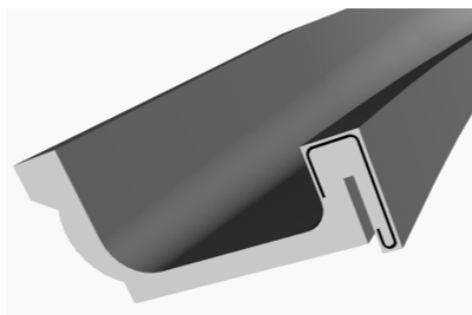


Figura 112: Concio in rettilineo con armatura completa.

Le armature trasversali nei **CONCI IN CURVA** si rifanno a quelle in rettilineo, cambia solo la porzione a guscio. Le armature occupano le Pos. 4, 5, 6, 8, 10, 11, 16. Di seguito saranno riportate singolarmente. Per ogni posizione la prima curva viene realizzata in base all'offset del profilo. L'offset è fatto in modo che le armature trasversali non si sovrappongano a quelle longitudinali. Questa viene adattata in base alla forma che deve assumere secondo la normativa BS 8666. In base alla forma vengono poi applicate le proprietà giuste ad ogni gruppo di armatura come riportato a Tabella 3.

Le **Pos.4, 5 e 6** hanno le stesse proprietà descritte per il concio in rettilineo, in questo caso sono poste solamente al lato interno della sezione. Le forme sono quindi BS21 per la 5 e ala 6 e BS22 per la 4.



```
c_Pos4_dx=[]#Indice bordo del profilo a sx
for concio in facce:
    b0=concio[7]
    b1=concio[6]
    b2=concio[5]

    P0=b0.EndPoint
    P1=b0.StartPoint

    Q0=Geometry.Translate(P0,0,0,-h0)
    Q1=b1.StartPoint
    Q2=b2.StartPoint

    k0=b0.Length
    k1=b1.Length
    k2=b2.Length
    PA=Geometry.Translate(P0,0,0,-r)
    PB=b0.PointAtSegmentLength(k0-r)
    PC=b0.PointAtSegmentLength(r)
    PD=Geometry.Translate(P1,0,0,-r)
    PE=b1.PointAtSegmentLength(r)
    PF=b2.PointAtSegmentLength(k2-r)
    PG=b2.PointAtSegmentLength(k2-(2*r))
    PH=Geometry.Translate(PG,0,0,r)
    PL=Geometry.Translate(PH,0,0,h2)

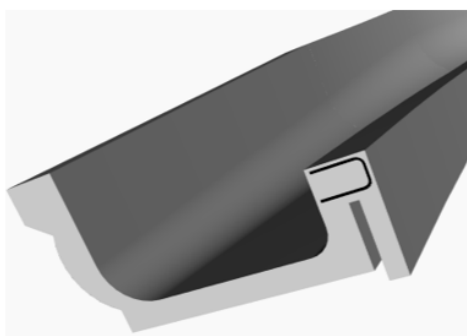
    l0=Line.ByStartPointEndPoint(Q0,PA)
    l1=Line.ByStartPointEndPoint(PB,PC)
    l2=Line.ByStartPointEndPoint(PD,PE)
    l3=Line.ByStartPointEndPoint(PH,PL)
    a0=Arc.ByFillet(l0,l1,r)
    a1=Arc.ByFillet(l1,l2,r)
    a2=Arc.ByThreePoints(PF,PE,PH)

    c0=[l0,l1,l2,l3,a0,a1,a2]

    c_Pos4_dx.append(c0)

# Assign your output to the OUT variable.
OUT = c_Pos4_dx
```

Figura 113: Creazione Pos.4 concio in curva.



```
c_Pos5_dx=[]
g0=[concio[n] for concio in facce]
for l0 in g0:
    Q0=l0.EndPoint
    P0=l0.StartPoint

    Q1=Geometry.Translate(Q0,0,0,-h)
    P1=Geometry.Translate(P0,0,0,-h)

    PA=l0.PointAtSegmentLength(r)
    PB=Geometry.Translate(P0,0,0,-r)
    PC=Geometry.Translate(P0,0,0,-(h-r))
    PD=Geometry.Translate(PA,0,0,-h)
    l1=l0.Length
    QA=l0.PointAtSegmentLength(l1-r)
    QB=Geometry.Translate(Q0,0,0,-r)
    QC=Geometry.Translate(Q0,0,0,-(h-r))
    QD=Geometry.Translate(QA,0,0,-h)

    l0=Line.ByStartPointEndPoint(Q0,PA)
    l1=Line.ByStartPointEndPoint(PB,PC)
    l2=Line.ByStartPointEndPoint(PD,Q1)
    a0=Arc.ByFillet(l0,l1,r)
    a1=Arc.ByFillet(l1,l2,r)
    c0=[l0,l1,l2,a0,a1]

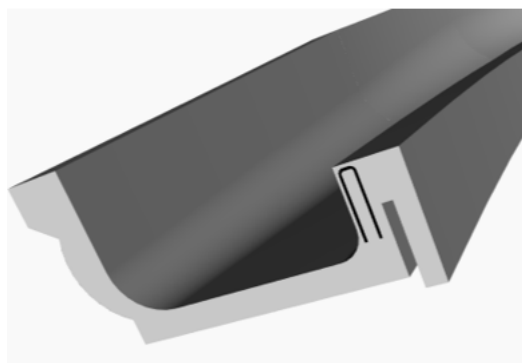
    l3=Line.ByStartPointEndPoint(P0,QA)
    l4=Line.ByStartPointEndPoint(Q0,QC)
    l5=Line.ByStartPointEndPoint(QD,Q1)
    b0=Arc.ByFillet(l3,l4,r)
    b1=Arc.ByFillet(l4,l5,r)

    V0=vector.ByTwoPoints(punti[c][0],punti[c][1])
    v0=vector.Normalized(V0)
    l3t=Geometry.Translate(l3,(v0.x*d),(v0.y*d),(v0.z*d))
    l4t=Geometry.Translate(l4,(v0.x*d),(v0.y*d),(v0.z*d))
    l5t=Geometry.Translate(l5,(v0.x*d),(v0.y*d),(v0.z*d))
    b0t=Geometry.Translate(b0,(v0.x*d),(v0.y*d),(v0.z*d))
    b1t=Geometry.Translate(b1,(v0.x*d),(v0.y*d),(v0.z*d))

    c1=[l3t,l4t,l5t,b0t,b1t]
    c=c1
    c_Pos5_dx.append([c0,c1])

# Assign your output to the OUT variable.
OUT = c_Pos5_dx
```

Figura 114: Creazione Pos.5 concio in curva.



```

c_Pos6_dx=[] #indice bordo del profilo a sx
g0=[concio[n] for concio in facce]
for l0 in g0:
    k=l0.Length
    P0=l0.EndPoint
    P1=l0.PointAtSegmentLength(k-l)

    Q0=Geometry.Translate(P0,0,0,-h)
    Q1=Geometry.Translate(P1,0,0,-h)

    PA=Geometry.Translate(P0,0,0,-r)
    PB=l0.PointAtSegmentLength(k-r)
    PC=l0.PointAtSegmentLength(k-l+r)
    PD=Geometry.Translate(P1,0,0,-r)

    l0=Line.ByStartPointEndPoint(Q0,PA)
    l1=Line.ByStartPointEndPoint(PB,PC)
    l2=Line.ByStartPointEndPoint(PD,Q1)
    a0=Arc.ByFillet(l0,l1,r)
    a1=Arc.ByFillet(l1,l2,r)
    c0=[l0,l1,l2,a0,a1]

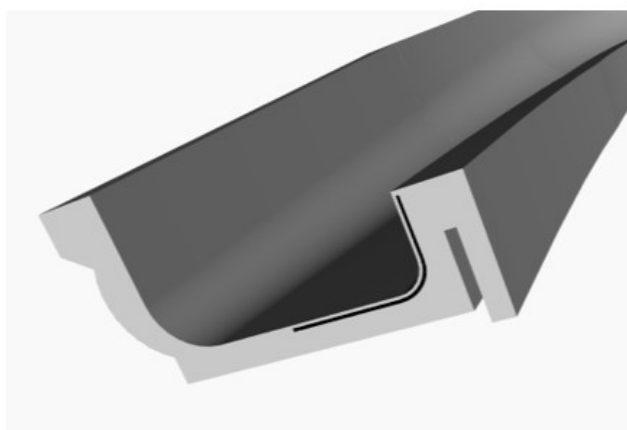
    c=c+1
    c_Pos6_dx.append(c0)

# Assign your output to the OUT variable.
OUT = c_Pos6_dx

```

Figura 115: Creazione Pos.6 concio in curva.

La **Pos.8** confina il bordo interno della zona centrale della sezione. È individuata dai bordi interni dell'offset, tagliati in base alle dimensioni previste da progetto. La curva è mostrata a Figura 116, questa è ripetuta con spaziatura di 12.5cm. Le dimensioni della staffa sono $a = 60cm$, $b = 33cm$ e curvatura $r = 20cm$ per la forma BS12.



```

c_Pos8_dx=[]
for concio in facce:
    b0=concio[8]
    b1=concio[9]
    b2=concio[10]

    PB=b2.StartPoint
    PC=b2.PointAtSegmentLength(d)
    l2=Line.ByStartPointEndPoint(PB,PC)

    c0=[b0,b1,l2]

    c_Pos8_dx.append(c0)

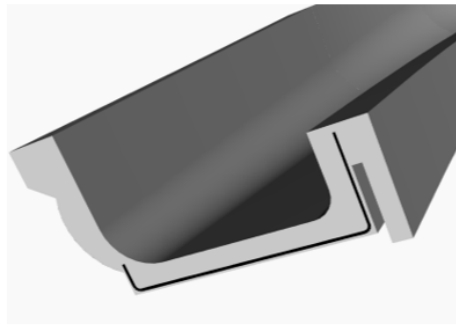
# Assign your output to the OUT variable.
OUT = c_Pos8_dx

```

Figura 116: Creazione Pos.8 concio in curva.

La **Pos.10** si propaga sul bordo inferiore della parte centrale, prolungandosi in verticale fino alla trave di bordo da un lato e fino all'inizio del guscio dall'altro lato. La curva è mostrata a Figura 117, questa è ripetuta con spaziatura di 12.5cm. Le dimensioni della staffa sono $a = 20cm$, $b = var$, $c = 60cm$ e curvatura $r = 4cm$ per la forma BS21.

Infine, per la trave di bordo che sormonta il guscio sono presenti due staffe che vanno a confinare tutto il profilo. La **Pos. 11** ha dimensioni $a = 20cm$, $b = 19cm$, $c = 60cm$ mentre la **Pos.16** ha dimensioni $a = 19cm$, $b = 24cm$, $c = 40cm$, entrambe per la forma BS27. In particolare, la Pos.11 è realizzata in modo da essere ripiegata nella parte terminale per rientrare all'intero dello spessore del guscio.



```
c_Pos10=[]
for concio in facce:
    b0=concio[2]
    b1=concio[1]
    b2=concio[0]

    P0=b1.EndPoint
    P1=b1.StartPoint

    Q0=Geometry.Translate(P0,0,0,h0)
    Q1=Geometry.Translate(P1,0,0,h1)

    k0=b0.Length
    k1=b1.Length

    PA=Geometry.Translate(P0,0,0,r)
    PB=b1.PointAtSegmentLength(k1-r)
    PC=b1.PointAtSegmentLength(r)
    PD=Geometry.Translate(P1,0,0,r)

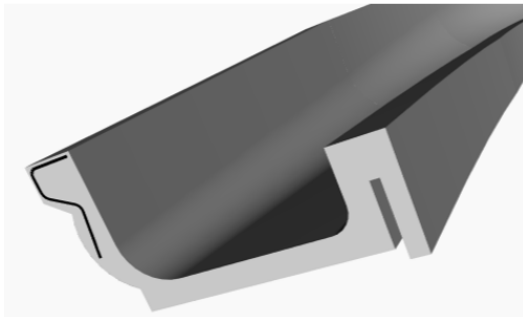
    l0=Line.ByStartPointEndPoint(Q0,PA)
    l1=Line.ByStartPointEndPoint(PB,PC)
    l2=Line.ByStartPointEndPoint(PD,Q1)
    a0=Arc.ByFillet(l0,l1,r)
    a1=Arc.ByFillet(l1,l2,r)

    c0=[l0,l1,l2,a0,a1]

    c_Pos10.append(c0)

# Assign your output to the OUT variable.
OUT = c_Pos10
```

Figura 117: Creazione Pos.10 concio in curva.



```
c_Pos11=[]
for concio in facce:
    b0=concio[13]

    P0=b0.EndPoint
    P1=b0.StartPoint

    Q0=Geometry.Translate(P0,0,0,-h1)
    Q1=b0.PointAtSegmentLength(d0-d2)
    Q2=Geometry.Translate(Q1,0,0,-(h1+h2))
    Q3=b0.PointAtSegmentLength(d0-d3)
    Q4=Geometry.Translate(Q2,0,0,-(h1+h2+h3))
    b2=Line.ByStartPointEndPoint(Q0,Q1)
    b3=Line.ByStartPointEndPoint(Q1,Q2)

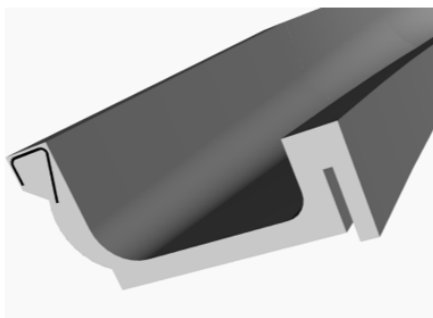
    k0=b0.Length
    k2=b2.Length
    k3=b3.Length
    PA=b0.PointAtSegmentLength(k0-r)
    PB=Geometry.Translate(PA,0,0,-r)
    PC=Geometry.Translate(Q0,0,0,r)
    PD=b2.PointAtSegmentLength(r)
    PE=b2.PointAtSegmentLength(k2-r)
    PF=b3.PointAtSegmentLength(r)

    l0=Line.ByStartPointEndPoint(P1,PA)
    l1=Line.ByStartPointEndPoint(PB,PC)
    l2=Line.ByStartPointEndPoint(PD,PE)
    l3=Line.ByStartPointEndPoint(PF,Q2)
    a0=Arc.ByFillet(l0,l1,r)
    v1=Vector.ByTwoPoints(PB,PC)
    a1=Arc.ByStartPointEndPointStartTangent(PC,PD,v1)
    v2=Vector.ByTwoPoints(PD,PE)
    a2=Arc.ByStartPointEndPointStartTangent(PE,PF,v2)

    c0=[l0,l1,l2,l3,a0,a1,a2]
    c_Pos11.append(c0)

# Assign your output to the OUT variable.
OUT = c_Pos11
```

Figura 118: Creazione Pos.11 concio in curva.



```
c_Pos16=[]
for concio in facce:
    b0=concio[13]

    P0=b0.EndPoint
    P1=b0.StartPoint

    Q0=Geometry.Translate(P0,0,0,-h1)

    k0=b0.Length
    PA=Geometry.Translate(P0,0,0,-r)
    PB=b0.PointAtSegmentLength(k0-r)
    PC=b0.PointAtSegmentLength(r)
    PD=Geometry.Translate(P1,0,0,-r)
    PE=b0.PointAtSegmentLength(h3)
    PF=Geometry.Translate(PE,0,0,-h2)

    l0=Line.ByStartPointEndPoint(Q0,PA)
    l1=Line.ByStartPointEndPoint(PB,PC)
    l2=Line.ByStartPointEndPoint(PD,PF)
    a0=Arc.ByFillet(l0,l1,r)
    v1=Vector.ByTwoPoints(PB,PC)
    a1=Arc.ByStartPointEndPointStartTangent(PC,PD,v1)

    c0=[l0,l1,l2,a0,a1]
    c_Pos16.append(c0)

# Assign your output to the OUT variable.
OUT = c_Pos16
```

Figura 119: Creazione Pos.16 concio in curva.

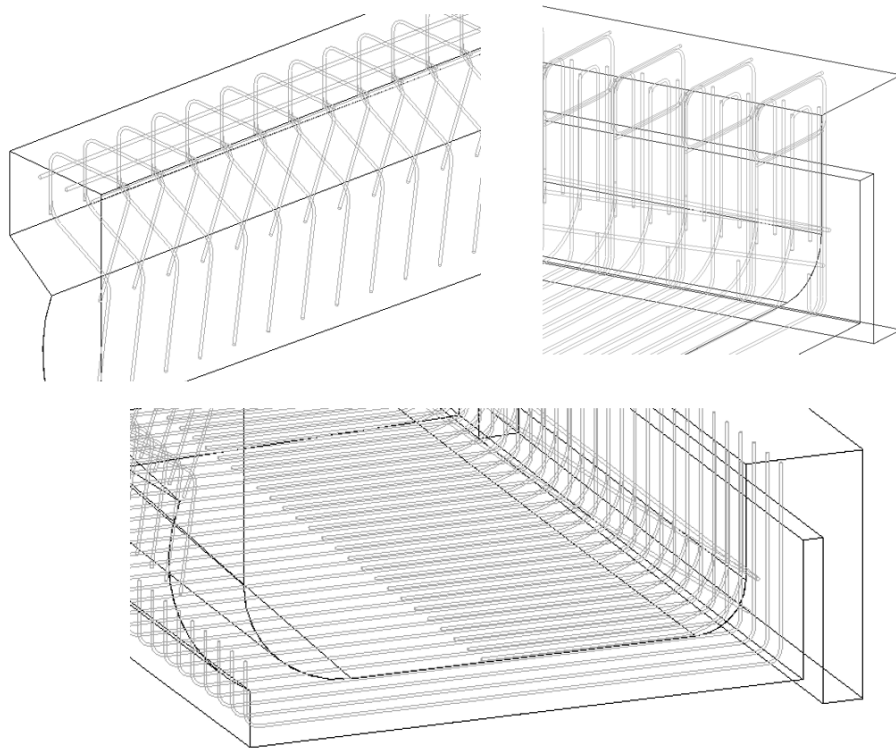


Figura 120: Dettagli armatura trasversale concio in curva.

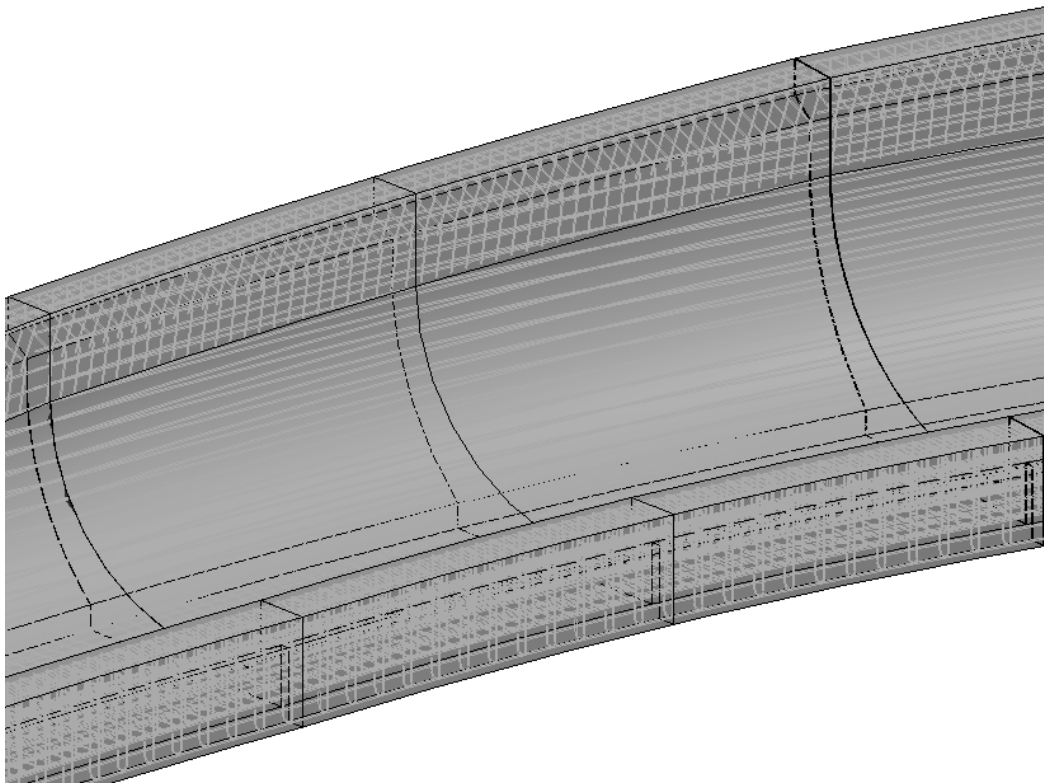


Figura 121 Concio in curva con armatura completa.

2.3 Impianti

Gli impianti seguono la stessa impostazione dello script definito per le armature longitudinali. Si devono andare a posizionare le tubazioni secondarie lungo tutto il percorso della pista e i collettori ad inizio e fine di ogni gruppo di tubazioni secondarie. Infatti, in questo caso non si va a differenziare tra conci in rettilineo e in curva; poiché, in qualsiasi sezione le tubazioni si trovano a metà spessore e ad una distanza precisa tra loro per raggiungere il numero di tubi da progetto. Per questo motivo il flusso dello script per gli impianti è il seguente:

- Importazione della curva e dei conci ed esplosione delle facce;
- Individuazione dei profili delle sezioni iniziale, finale e in mezzeria;
- Offset dei profili, suddivisione in parti uguali in base al numero di tubi per gruppi di conci;
- Raggruppamento dei gruppi di punti e applicazione delle tubazioni secondarie e dei collettori.

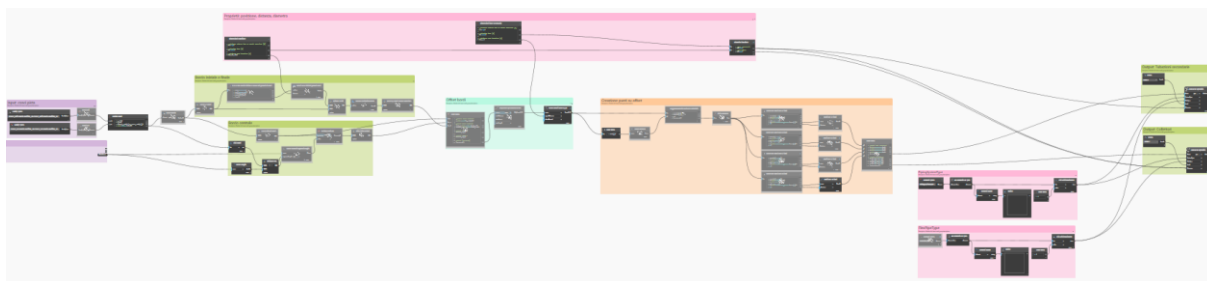


Figura 122: Script per posizionamento degli impianti di refrigerazione.

Le prime fasi sono analoghe al processo di costruzione delle armature longitudinali. Si vanno ad importare i conci in rettilineo e in curva e il percorso della Curva Cristallo. I conci vengono quindi esplosi in modo da poter lavorare con le facce desiderate.

Per ricavare il profilo della faccia iniziale, finale e della faccia in mezzeria, si vanno a filtrare le facce attraverso dei nodi python. Le facce di estremità vengono filtrate in base al numero corrispondente nella lista di facce esplose; il numero è differente per i due tipi di conci per cui si vanno a differenziare all'interno del nodo python. Delle facce scelte interessa tutto il bordo superiore della sezione che sarà quello di riferimento per posizionare le armature. Quindi una volta ottenute le facce iniziali e finali si estrapola il profilo, si divide in curve e si vanno a filtrare solo quelle relative al bordo superiore.

Tra le facce di estremità si fa attenzione a quelle che si trovano in corrispondenza dei collettori. Infatti, il collettore che ha un diametro di 14cm circa, causa un arretramento dell'inizio del tubo secondario. Dato che il bordo superiore filtrato è quello sul quale si va a posizionare la tubazione, deve essere preso alla giusta distanza dall'estremità del concio. Quindi, le facce iniziali e finali in corrispondenza del collettore vengono spostate attraverso un offset e viene selezionato il bordo superiore della nuova faccia.

Per ottenere il bordo superiore del profilo in mezzeria si utilizza il metodo adottato per le armature longitudinali, ovvero l'intersezione dei piani perpendicolari al tracciato. Per avere direttamente il filtro del bordo però, non viene eseguita l'intersezione con tutte le facce laterali ma solo con quelle superiori (Figura 123).

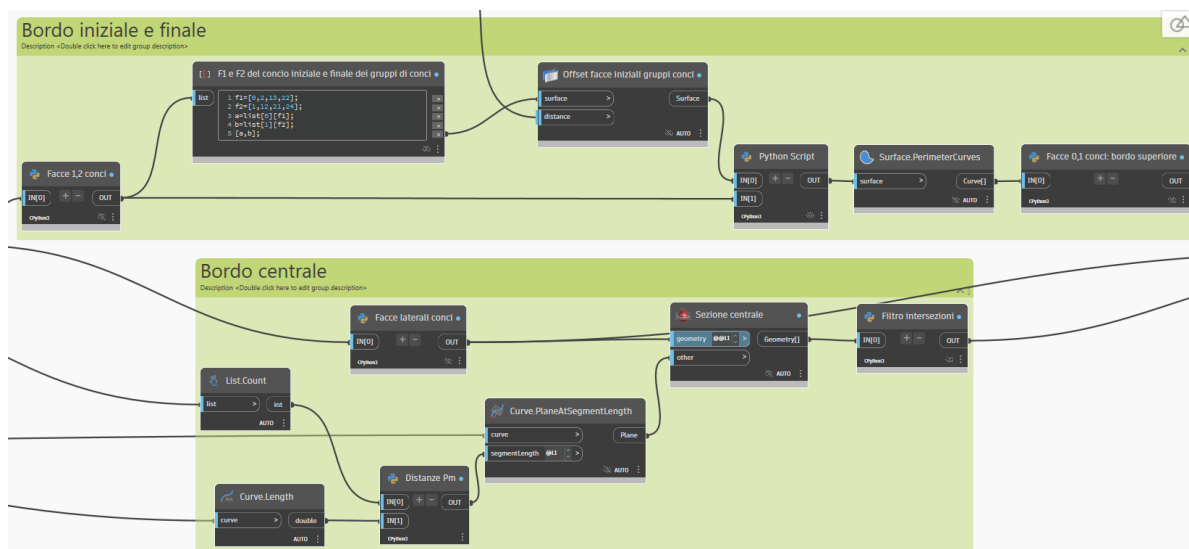


Figura 123: Individuazione bordi delle facce iniziale, finale e in mezzeria.

Ricavati i bordi di riferimento si va ad eseguire un offset pari a metà spessore della sezione. In questo modo si ottiene la traccia precisa dei tubi secondari su tutte le sezioni principali.

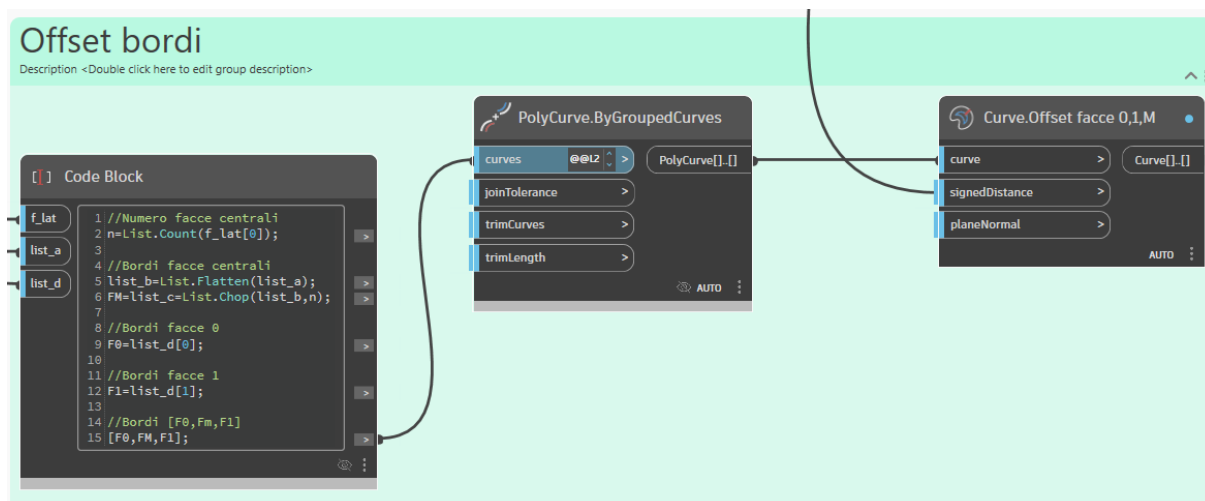


Figura 124: Offset dei bordi delle tre facce.

I profili ottenuti dagli offset sono sufficienti per andare a posizionare tutte le tubazioni. Nei paragrafi precedenti è emerso che lungo il percorso si distinguono quattro zone con un numero specifico di tubi. Quindi, i profili vengono separati in queste quattro parti, ogni profilo viene suddiviso in parti uguali in modo da ottenere un numero di punti sufficiente (Figura 125).

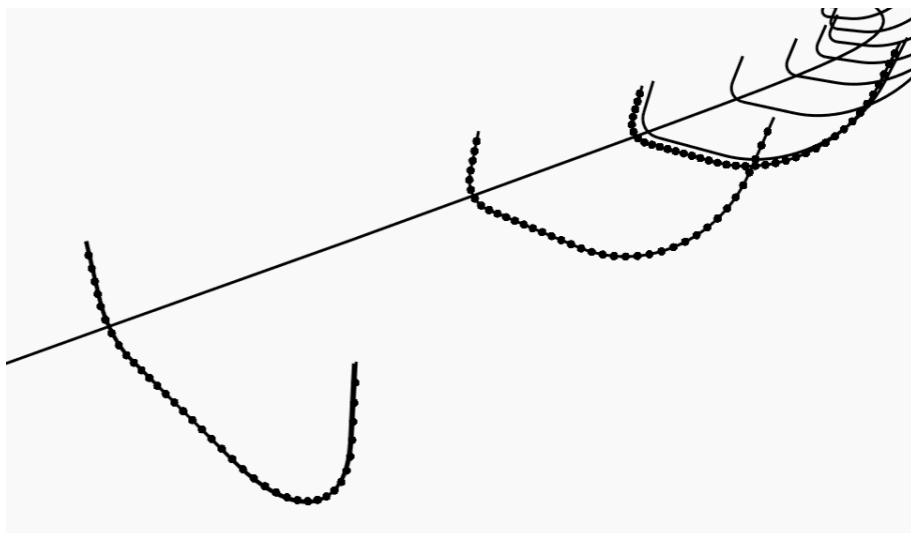


Figura 125: Individuazione dei punti lungo i tre profili del conico.

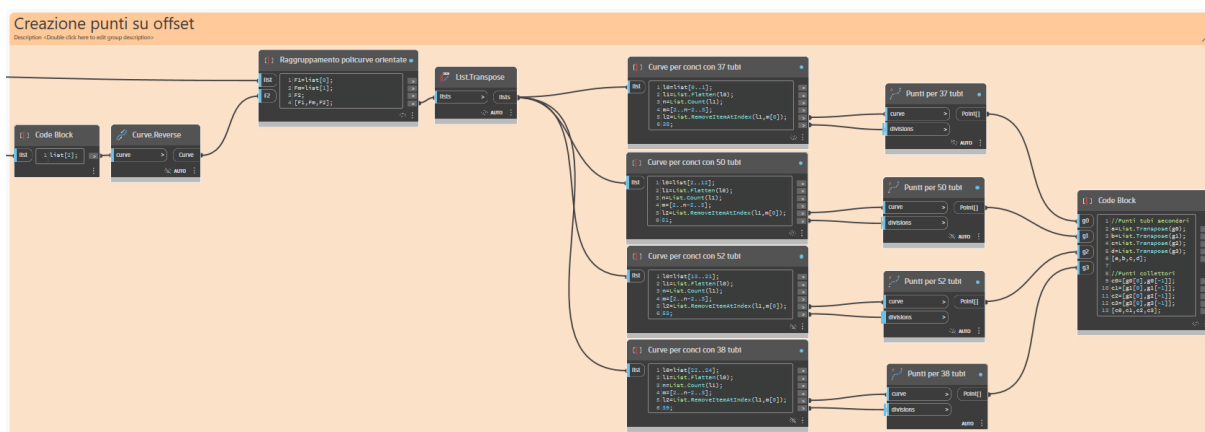


Figura 126: Creazione dei punti di passaggio delle tubazioni.

Le quattro zone hanno rispettivamente 37, 50, 52 e 38 tubi. I tubi devono essere continui attraversando tutti i conici. I punti inizialmente sono ordinati in liste per conico e per faccia, ma per ottenere i punti in modo continuo queste liste devono essere riordinate. Allora si utilizza un Code Block in cui per ogni gruppo di conici si prendono in ordine tutti i punti che deve attraversare il primo tubo, poi il secondo fino all'ultimo. Si ottengono così delle nuove liste in cui per ogni gruppo di conici c'è il gruppo di punti per ogni tubo. Oltre a questi serve l'ultima lista, ovvero quella che necessaria per posizionare i collettori. Per questi si vanno semplicemente a prendere i gruppi di punti del profilo iniziale e finale per ogni gruppo di conici (Figura 126).

L'ultimo passaggio è l'applicazione delle *FlexPipes*, questa infatti è l'unica tipologia che permette di seguire un percorso variabile. Per applicarli si utilizza il pacchetto *MEPover* per cui deve essere definito il *PipingSystemType* e il *FlexPipeType*. Definito il diametro della tubazione, la famiglia e il tipo si vanno a posizionare le tubazioni secondarie e principali con il nodo *FlexPipe.ByPoints*.



Figura 127: Creazione delle tubazioni secondarie e dei collettori.

Lo script dà ottimi risultati come si può vedere a Figura 128, Figura 129 e Figura 130; in cui sono evidenziati tre tratti di interruzione con i collettori.

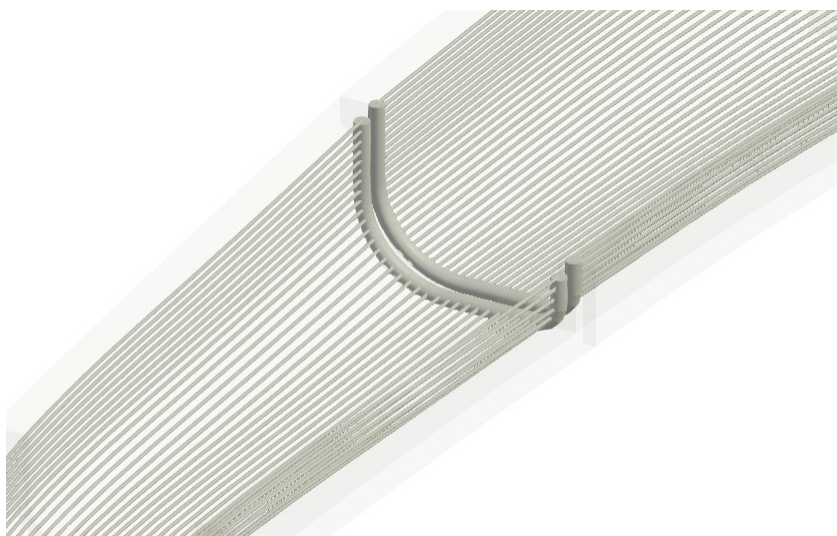


Figura 128: Vista 3D delle tubazioni, parte in curva, zona iniziale.

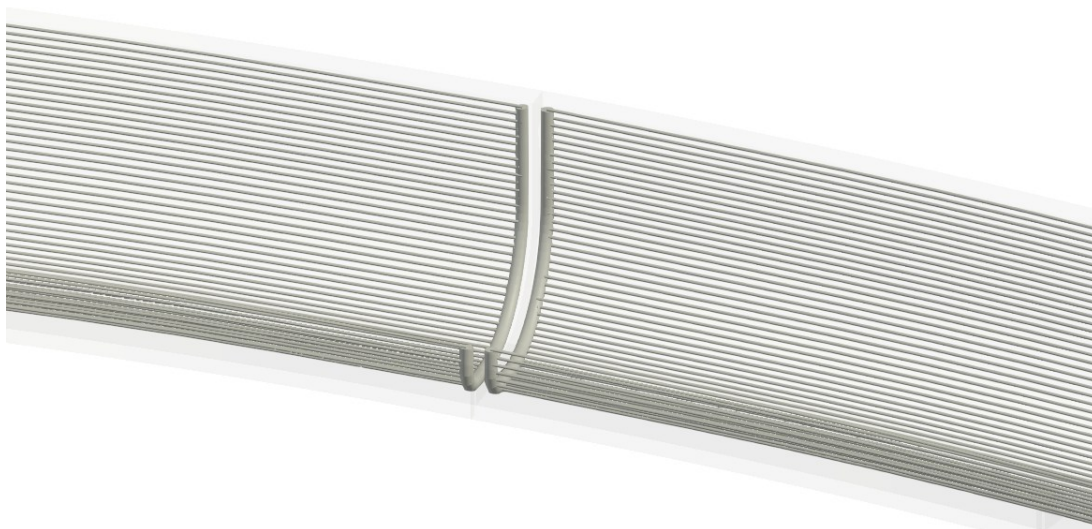


Figura 129: Vista 3D delle tubazioni, parte in curva, cona centrale.

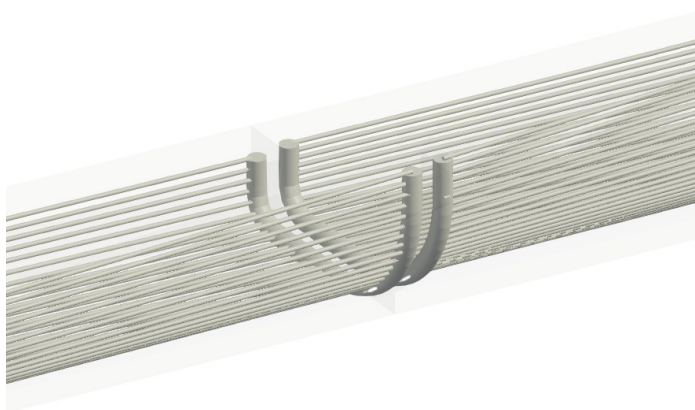


Figura 130: Vista 3D delle tubazioni, parte in curva, zona finale.

3 ANALISI FEM DELLA CURVA CRISTALLO

Dal punto di vista strutturale è stato analizzato il comportamento del corpo pista sotto l'azione di carichi statici e dinamici. Considerando la complessità della superficie, si è voluto indagare come l'interoperabilità tra ambienti BIM e FEM potesse facilitare il processo di modellazione e analisi.

A partire dal modello BIM è stato costruito un modello FEM sia del corpo pista che della sottostruttura. Trattandosi di strutture complesse, la generazione manuale del modello FEM risulterebbe particolarmente laboriosa; per questo motivo è stato sviluppato un metodo che permettesse l'importazione automatizzata della geometria nel software di calcolo.

A tal fine è stato realizzato un ulteriore script che consente di generare la mesh degli elementi strutturali direttamente a partire dal modello BIM. In questo modo, eventuali modifiche progettuali non richiedono la ricostruzione completa del modello FEM, ma possono essere aggiornate in modo più rapido ed efficiente.

Sono stati così realizzati due modelli: uno comprendente solo il corpo pista e un secondo che include anche la sottostruttura, entrambi riferiti alla Curva Cristallo. Su questi modelli sono stati applicati i carichi statici (peso proprio, peso permanente portato, carichi accidentali) e i carichi dinamici, come quelli indotti dal passaggio del bob e dall'azione sismica.

Dopo aver definito le proprietà dei materiali, i vincoli e le combinazioni di carico, è stata condotta un'analisi per valutare gli effetti delle diverse sollecitazioni sulla struttura. In particolare, si è posto l'accento sul confronto tra le sollecitazioni prodotte dal carico dinamico del bob, che può raggiungere accelerazioni fino a 4g, e quelle generate da un evento sismico. Infine, sono state eseguite verifiche su sezioni specifiche della struttura sotto le combinazioni di carico più gravose.

3.1 Costruzione del modello

Per la creazione del modello FEM è necessario prendere in esame la parte strutturale della pista, semplificandone la geometria. Della sezione trasversale viene considerata la forma a "U", escludendo gli elementi accessori come le travi di bordo. A partire da questa geometria, è fondamentale individuare la superficie media, che rappresenta la base per la generazione della mesh.

Tuttavia, poiché la superficie della pista è complessa e soggetta a possibili modifiche durante le fasi di progettazione, è stato sviluppato uno script in ambiente Dynamo capace di produrre automaticamente la mesh della superficie media, partendo dalla geometria generata dagli script precedenti.

Lo stesso approccio è stato adottato per la sottostruttura, composta, come visto in precedenza, da una fondazione, un impalcato a sezione costante a forma di "U" e da pile inclinate in corrispondenza dell'impalcato.

Per limitare i tempi di calcolo, si è deciso di suddividere l'analisi in due modelli distinti. Il primo include esclusivamente il corpo pista e i relativi appoggi, mentre il secondo comprende il corpo pista completo della sottostruttura.

3.1.1 Corpo Pista

La geometria del Corpo Pista è stata realizzata attraverso degli offset della superficie interna di ogni concio. Le superfici sono state copiate a metà spessore per ottenere la linea media della sezione. Tuttavia, da qui si ottiene una superficie curva della pista che non può essere importata facilmente all'interno dei programmi di calcolo, deve essere infatti convertita in mesh. Lo script è proposto alla Figura 131.

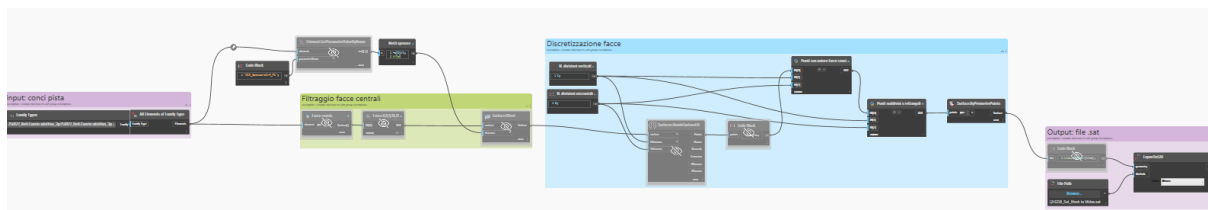


Figura 131: Script per realizzazione mesh corpo pista.

Lo scopo dello script è quello di realizzare una mesh fatta di elementi piani, a partire dalla superficie complessa. Per fare questo si utilizzano dei nodi che permettono di individuare dei punti in una griglia specifica, su di una superficie qualsiasi. A Figura 132 è riportato il flusso per la discretizzazione, in cui scelto il numero di suddivisioni nelle due direzioni, si crea la griglia con il nodo *Surface.DivideSurfaceUV*.

Ora però per creare la mesh serve andare a realizzare le superfici piane adattate alla griglia. Prime di fare questo si devono andare ad unire i punti finali e iniziali di ogni concio, perché non combaciano perfettamente. Quindi, si utilizza un nodo python per sostituire i nodi del profilo finale di ogni concio con quelli iniziali del concio successivo.

A questo punto con un altro nodo python si creano tutti gruppi da quattro nodi attraverso dei cicli for che passano per ogni riga e colonna della griglia, per ogni concio. Infine, si costruiscono dei rettangoli che realizzano tutta la mesh.

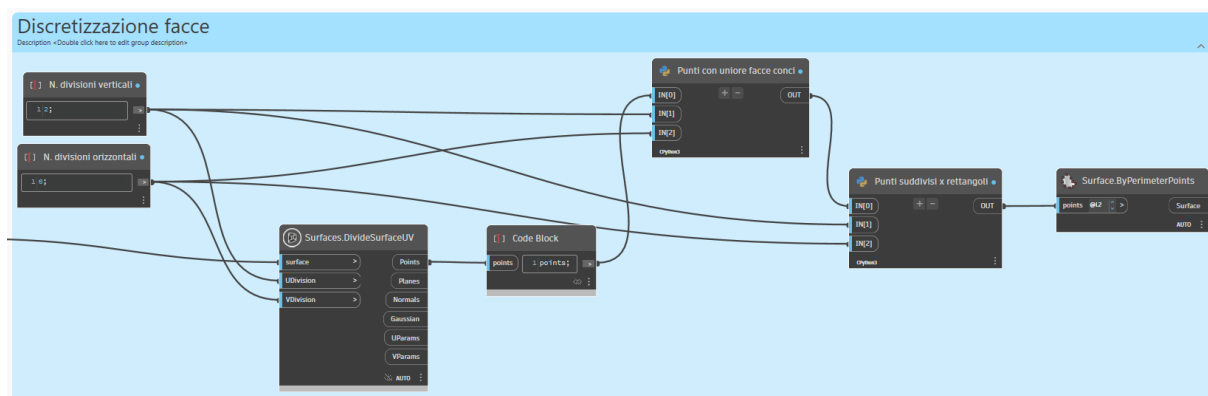


Figura 132: Discretizzazione facce medie corpo pista.

La mesh viene in fine esportata in file *.sat che poi viene convertito in ambiente AutoCAD in un *.dxf per l'importazione del modello di calcolo.

L'analisi FEM viene eseguita con il programma **MidasCivil**, qui viene importato il file della pista e trasformato in elementi plate. Agli elementi vengono applicate le proprietà definite da progetto: spessore 17cm e materiale in calcestruzzo di classe C32/40.

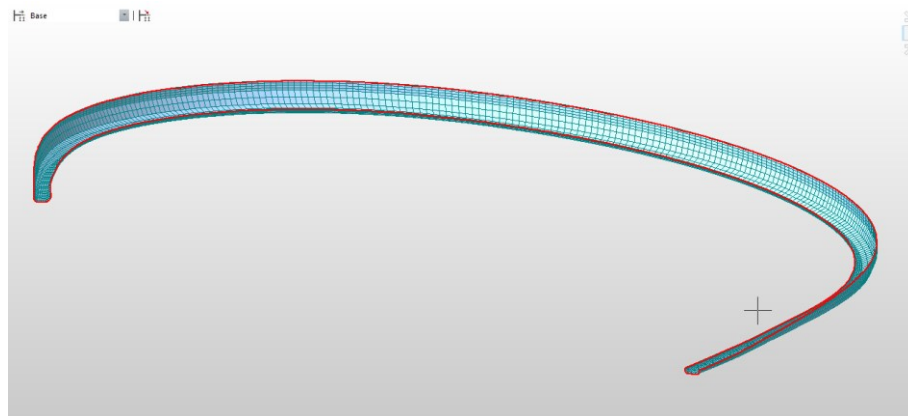


Figura 133: Importazione del corpo pista.

Il guscio viene poi vincolato, creando gli appoggi fissi, a telaio e a colonna presentati nei paragrafi precedenti. Gli appoggi in totale si trovano su 34 punti, realizzati in calcestruzzo C32/40 e sezione 25x25cm. Le teste degli appoggi sono state vincolate al guscio attraverso dei *rigid link* e le basi sono state vincolate con degli incastri.

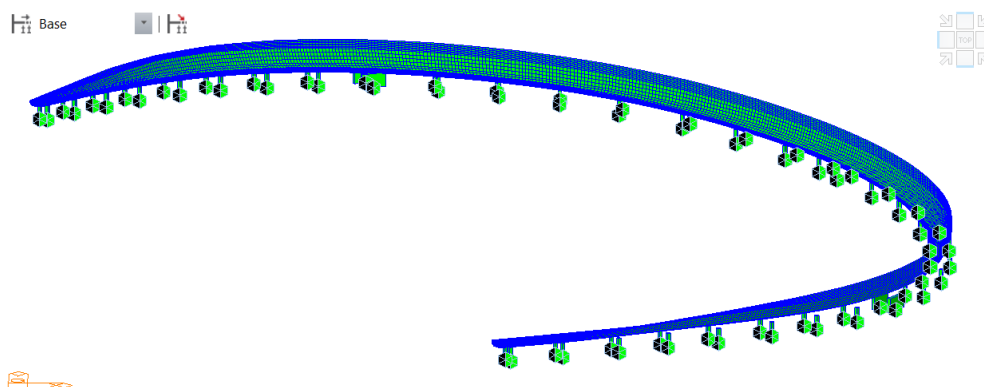


Figura 134: Modello FEM del corpo pista.

3.1.2 Sottostruttura

Il secondo modello è stato implementato con tutta la sottostruttura oltre al corpo pista. La sottostruttura ha una sezione articolata, come visto nei paragrafi precedenti, e un tracciato curvo. Per questo si è scelto di modellarla anche in questo caso attraverso la sua superficie media con degli elementi plate.

Per semplificare la sezione sono stati presi dei punti ad una distanza fissa dalle basi degli

appoggi, in modo da delineare la linea media. Per ottenere già una mesh coerente per il modello, è stato fatto in modo che le basi degli appoggi coincidessero con dei nodi della sezione.

Questo procedimento è stato fatto con un altro script python che, seguendo lo stesso concetto del corpo pista, permette di realizzare tutta la mesh della fondazione della porzione C11.1 e dell'impalcato della porzione C11.2 (Figura 135).

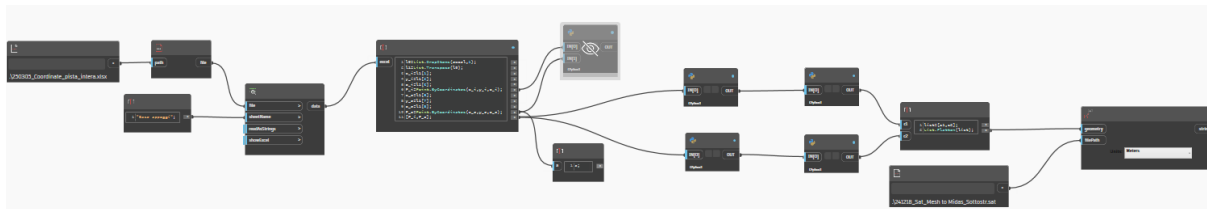


Figura 135: Script per mesh della fondazione della sottostruttura.

La superficie curva della sottostruttura viene quindi importata in MidasCivil attraverso un file *.dxf e per ogni parte sono state applicate le giuste proprietà. Rispetto al corpo pista lo spessore non è costante, per cui è stato preso un valore medio per le diverse parti della sezione. Gli spessori scelti sono di 35, 45, 50, 70, 145 cm e sono distribuiti come mostrato a Figura 136.

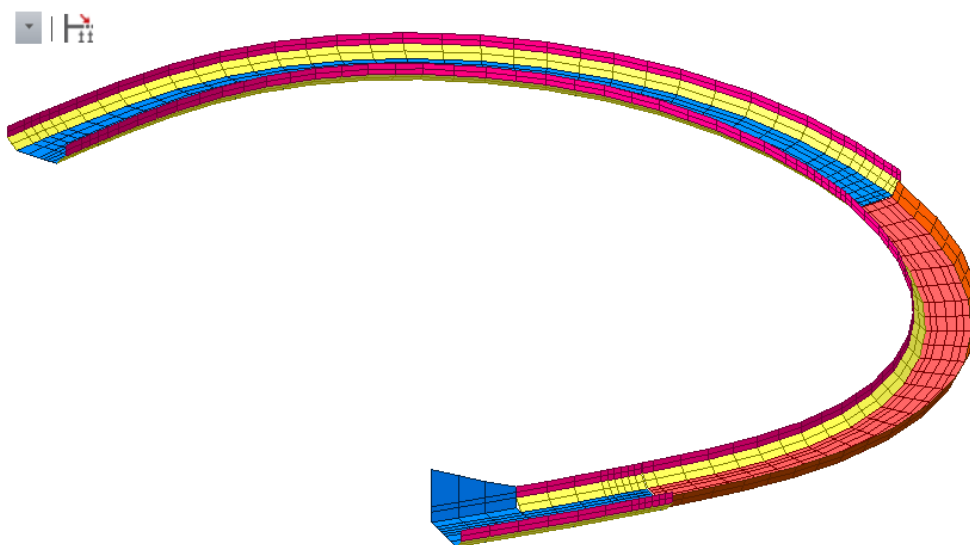


Figura 136: Mesh fondazione sottostruttura C11.1 e impalcato C11.2.

Il modello è completo con il corpo pista e con le pile nella zona dell'impalcato. Le pile sono cinque, poste lungo la zona dell'impalcato, come mostrato a Figura 137. Questa modellazione è stata scelta sulla base di quanto fatto anche in fase di progettazione, ovvero un fusto unico inclinato per la pila con sezione costante e testa in calcestruzzo semplificata con due elementi trave. La sezione della pila ha un'area totale di 0.87 m^2 e le travi in CA hanno sezione di $30 \times 30 \text{ cm}$. Nella progettazione è stato adottato questo metodo per semplificare le geometrie, mantenendo il comportamento adatto della porzione in sommità della pila inclinata.

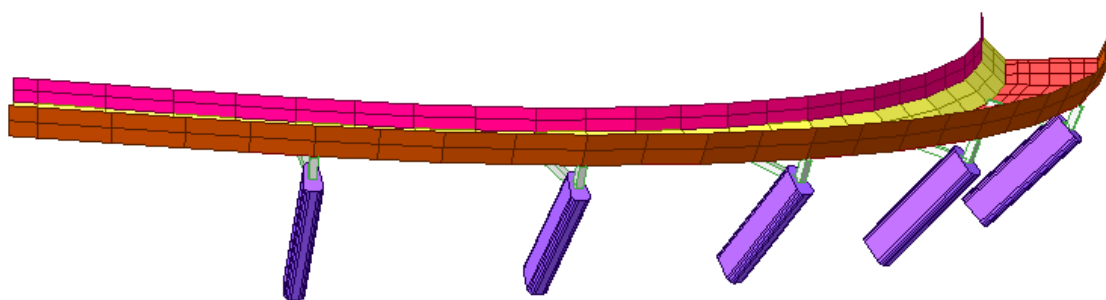


Figura 137: Modello delle pile della sottostruttura.

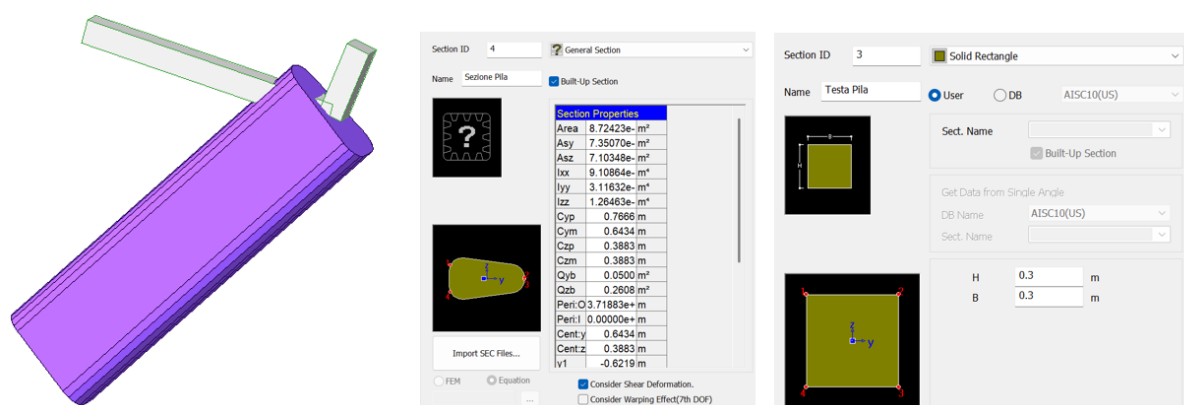


Figura 138: Modello della pila, con sezione della pila e della testa.

Infine, sono stati applicati tutti i vincoli come incastri e molle alla Winkler. Alle basi delle pile e in corrispondenza dell'attacco con setti e spalle sono stati posti tutti incastri. È stato scelto infatti di non modellare anche gli elementi delle spalle e dei setti per non aumentare eccessivamente il carico computazionale. In corrispondenza degli appoggi dell'impalcato sono stati messi dei vincoli elastici con le stesse proprietà degli appoggi elastomerici definiti da progetto.

La porzione della curva C11.1, essendo direttamente appoggiata al terreno, è stata vincolata con delle molle alla Winkler per simulare la rigidità laterale. I dati di rigidità sono stati estrapolati dall'elaborato "Relazione geotecnica". Nella relazione è riportato un coefficiente di Winkler di circa 88.000 kN/m^3 ma che nei calcoli agli elementi finiti viene impostato un valore di 50.000 kN/m^3 . Nel modello le molle vengono inserite come delle *Surface Spring* i cui coefficienti sono espressi in kN/m^3 , poi in base all'estensione della superficie li converte in automatico in *Point Spring*.

Alla Figura 139 e Figura 140 sono riportate le proprietà degli appoggi elastomerici applicati all'impalcato e delle molle applicate alla prima parte della curva. Alla Figura 141 è riportato il modello completo con corpo pista e sottostruttura e alla Figura 142 sono evidenziati i vincoli applicati.

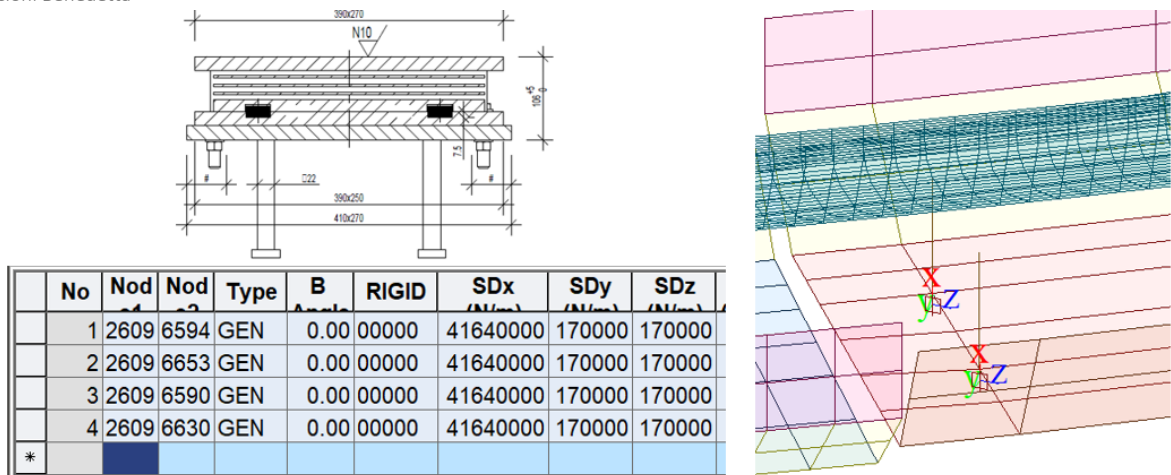


Figura 139: Appoggi elastomerici e proprietà per l’impalcato in C11.2.

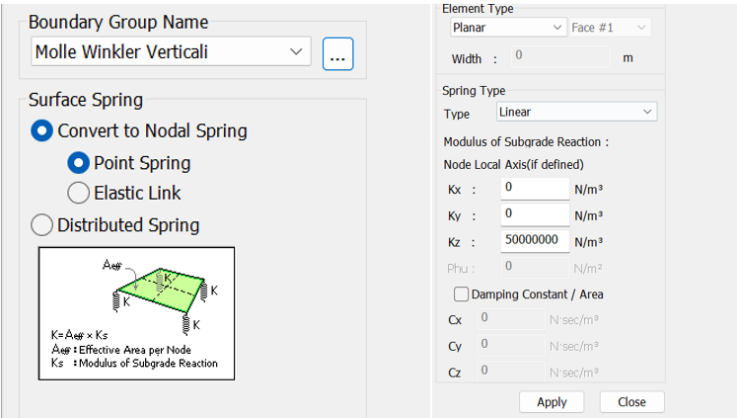


Figura 140: Molle alla Winkler per la curva C11.1.

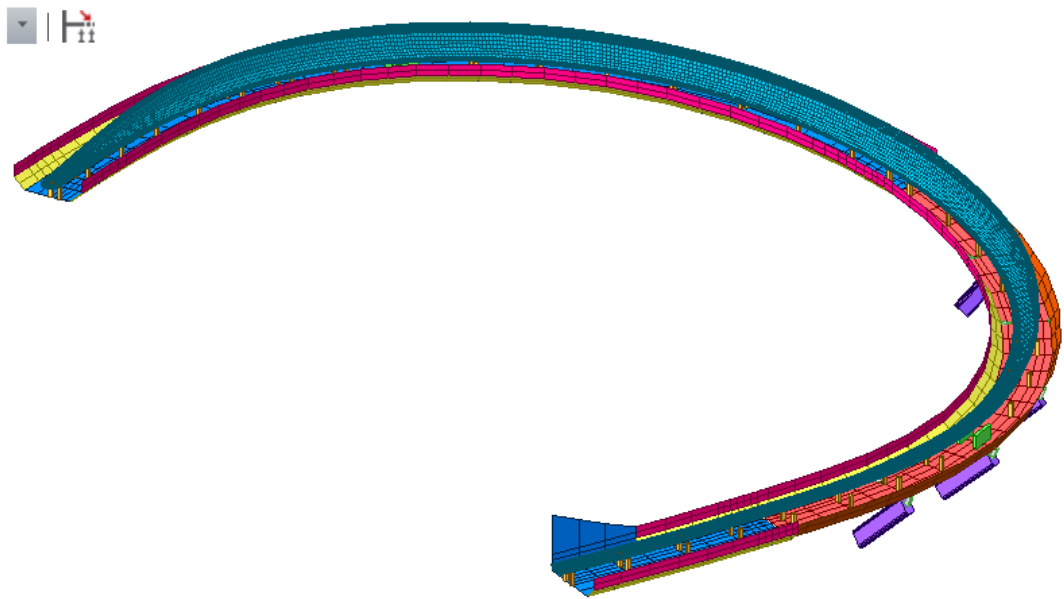


Figura 141: Modello completo Corpo Pista e Sottostruttura.

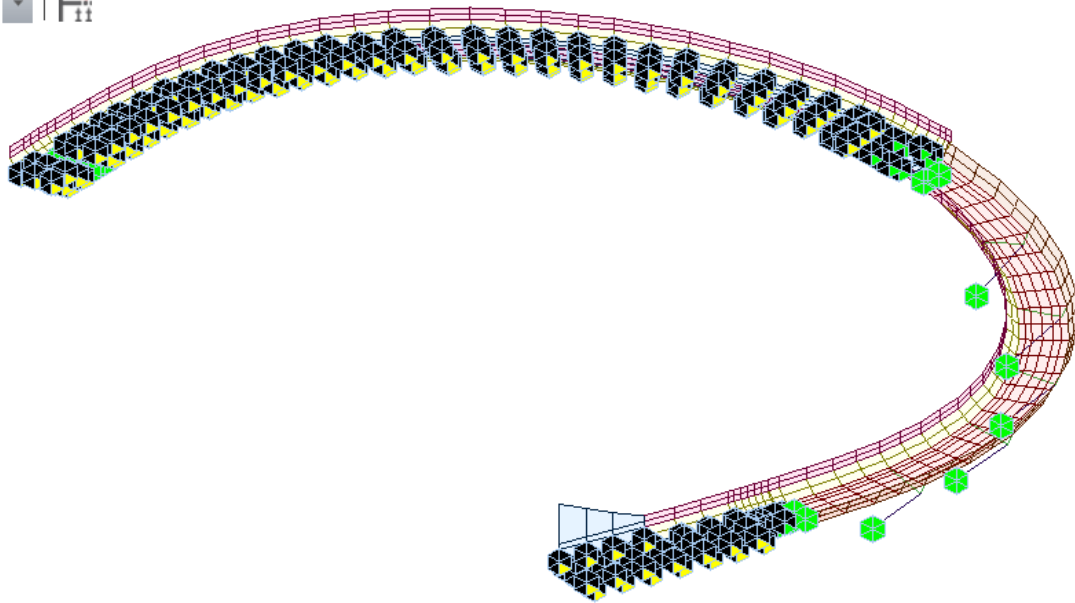


Figura 142: Vincoli modello con sottostruttura.

3.2 Moto del Bob

Uno dei carichi di maggiore interesse è il carico dovuto al passaggio bob, ma per applicarlo nel modo corretto è stata studiata nel dettaglio l'interazione tra la slitta e la pista. Si è fatto riferimento a diversi studi eseguiti sulle Piste da Bob per individuare traiettoria, velocità e carichi trasmessi dalla slitta.

Il primo aspetto da considerare è il contatto tra la slitta e la pista. Secondo lo studio di Braghin et al. (2011), il contatto si può distribuire attraverso dei punti distribuiti su tre sezioni principali (Figura 143). Il concetto è che il contatto sia distribuito su tre sezioni, due delle quali corrispondono ai punti in cui viene a contatto il pattino anteriore e posteriore. In questo caso si vuole semplificare la superficie mantenendo solo 2 punti di contatto lungo la traiettoria del Bob: il primo punto corrisponde con il centro dei pattini anteriori e il secondo con il centro dei pattini posteriori.

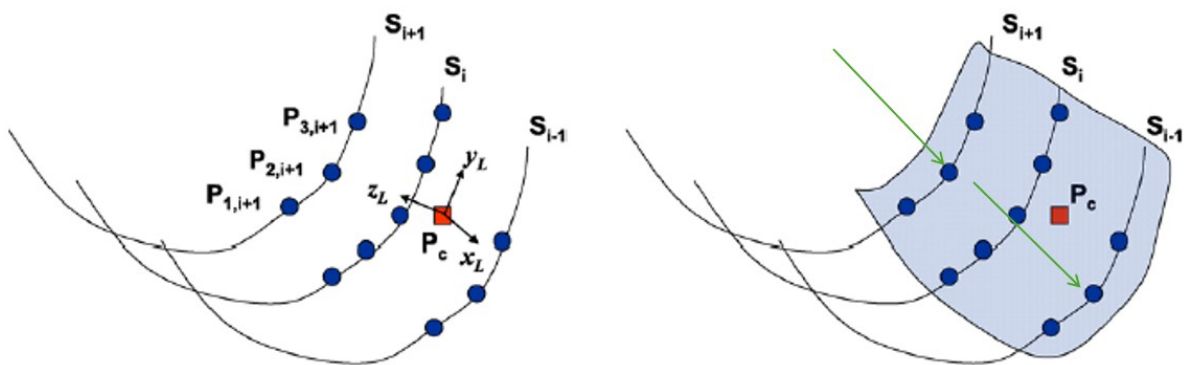


Figura 143: Superficie di contatto slitta-pista (Braghin et al. 2011).

Per definire con precisione la posizione dei due punti di contatto si fa riferimento alle dimensioni riportate nel regolamento FIBT (2014). Le dimensioni di interesse sono riportate a Tabella 4: si ricavano la lunghezza dei pattini l_a e l_p , la distanza dal centro dei pattini anteriori con quelli posteriori d_{ap} e l'interasse tra i pattini i_{ap} . Si considera inoltre che la distribuzione del peso sia leggermente differente tra la coppia di pattini anteriore e posteriore considerando che gli atleti si trovano nella parte finale della slitta. Per questo, si considera una distribuzione del peso del 45% (β) per i pattini anteriori e del 55% (α) per quelli posteriori.

Dettaglio composizione - 4 Men Bob		
Interasse pattini ante post	i_{ap} [m]	2.130
Lunghezza pattino anteriore	l_a [m]	0.735
Lunghezza pattino posteriore	l_p [m]	0.940
Lunghezza totale	l [m]	2.968
Distanza intermedia pattini	d_{ap} [m]	1.293
Distribuzione carico	α	0.55
	β	0.45

Tabella 4: Dimensioni punti di contatto slitta-pista.

A questo punto è necessario definire la **traiettoria** che assume il Bob, questa dipende dalla geometria della sezione e dalla velocità che raggiunge il Bob in ogni punto. La velocità del Bob è definita nello specifico nella Relazione tecnica relativa al tracciato sportivo. A Figura 144 sono riportate la velocità e accelerazione raggiunta dai diversi tipi di Bob lungo tutto il tracciato della pista, l'andamento è lo stesso per tutte le slitte ma quella più pesante raggiunge i valori maggiori, per questo ci si è concentrati sul Bob a 4 uomini.

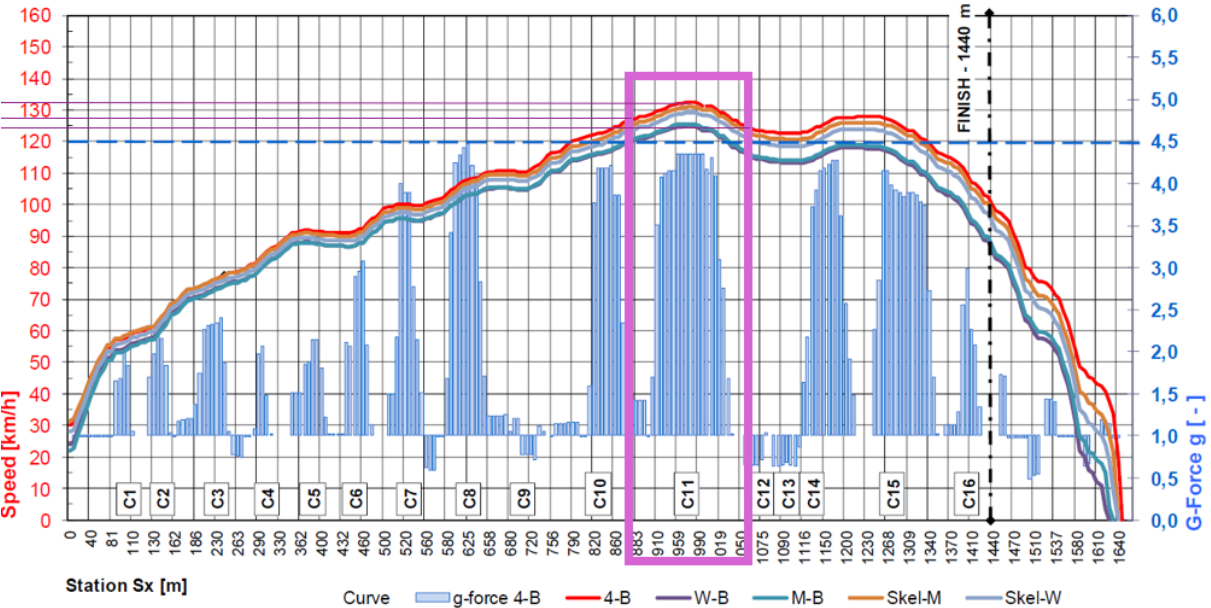


Figura 144: velocità e Accelerazione dei Bob da progetto, dall'elaborato "Relazione tecnica relativa al tracciato sportivo".

Dalla relazione risulta che la Curva Cristallo, quindi dalla progressiva 888m a 1050m, il tempo di percorrenza è di 4.1s. La velocità di entrata del 4-Men-Bob è di 128.3km/h, quella di uscita è di 126.6km/h e la velocità massima raggiunta è di 132.5km/h intorno alla progressiva $S_x=980$ m. L'accelerazione è calcolata in g e va da un minimo di circa 1.5g a un massimo di 4.5g, accelerazioni $>4g$ si raggiungono per un tempo totale di circa 2.7s. Per definire la traiettoria è necessario conoscere la massa del Bob che è di 630kg (FIBT 2014).

Curva Cristallo - 4 Men Bob			
Progressiva inizio curva	S_x	m	888.00
Progressiva fine curva	S_x	m	1050.00
Velocità inizio curva	V	km/h	128.30
Velocità massima ($S_x=980$ m)	V_{max}	km/h	132.50
Velocità fine curva	V	km/h	126.60
Massa	m	kg	630.00
Accelerazione gravitazionale	g	m/s^2	9.81

Tabella 5: Dati moto del 4-Men-Bob.

Avendo tutti i dati è possibile determinare la traiettoria, questa dipende dalla risultante tra forza peso e forza centrifuga come riportati negli studi di Mössner et al. (2011) e (Braghin, Donzelli, et al. (2011)). Ricavando l'angolo α è possibile determinare il punto della traiettoria in una sezione specifica, per ricavarlo si utilizza un processo iterativo che permette di trovare la soluzione all'equazione:

$$\min\left(m \frac{V^2}{R} \cos \alpha - mg \sin \alpha\right)$$

$$F_c = m \frac{V^2}{R} \quad P = mg$$

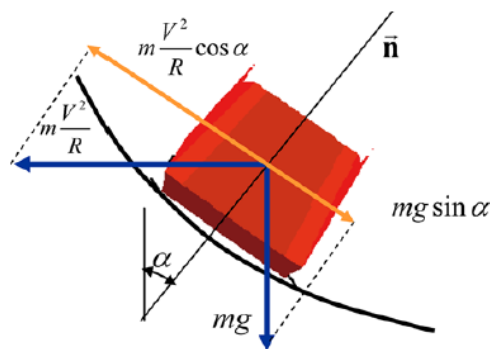


Figura 145: Inclinazione del Bob da risultante delle forze (Braghin, Cheli, et al. 2011).

L'equazione si può applicare a qualsiasi punto della pista conoscendo la velocità V , il raggio di curvatura del tracciato R e la massa del Bob m . Dal progetto sono stati estrapolati tutti questi valori e si è quindi andati a calcolare la forza centrifuga F_c e la forza peso P .

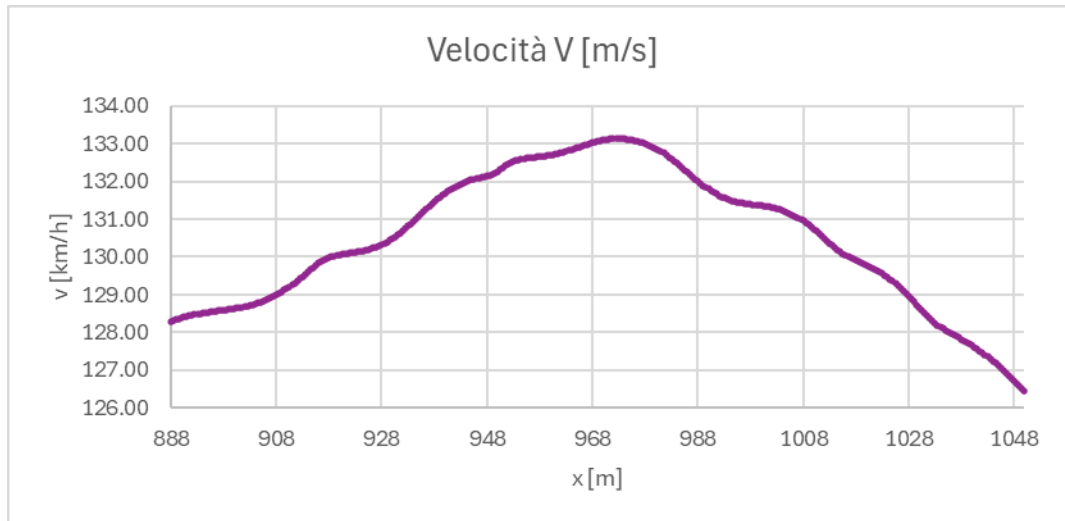


Figura 146: Valori di velocità V lungo la Curva Cristallo.

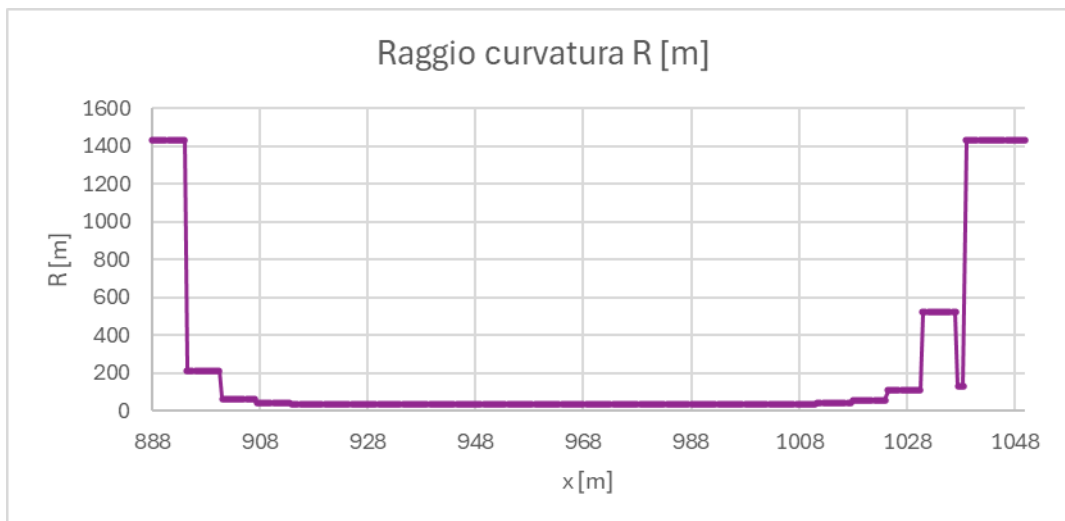


Figura 147: Valori del Raggio di Curvatura R della Curva Cristallo.

Per ricavare l'angolo α si deve risolvere la derivata dell'equazione riportata precedentemente, per fare questo si utilizza una cella Python di excel (Figura 148).

```
PY val_a=range(91)|
ris_f=[]
for a_deg in val_a:
    a_rad=np.radians(a_deg)
    f=xl("M5")*np.cos(a_rad)-xl("N5")*np.sin(a_rad)
    ris_f.append(abs(f))

indice_min=ris_f.index(min(ris_f))
val_a[indice_min]
```

Figura 148: Ciclo per ricerca angolo α .

L'individuazione dell'angolo α determina la traiettoria. Infatti, prendendo delle sezioni lungo il tracciato è possibile determinare per quale punto della sezione la perpendicolare alla sezione descrive un angolo α con la verticale. Questo processo è stato fatto manualmente per 8 sezioni e gli altri valori sono stati interpolati con funzione parabolica. In questo modo si trova l'altezza della traiettoria H per tutto il tracciato come riportato a Tabella 6 e Figura 149.

Progressiva	Incl. Vert	Altezza traiett.
x [m]	α [deg]	H [m]
888.00	5.00	0.00
913.50	73.00	0.64
945.00	76.00	0.99
973.00	77.00	1.00
998.50	76.00	0.92
1024.00	67.00	0.58
1050.00	5.00	0.00

Tabella 6: Altezza traiettoria Bob su 8 sezioni della Curva Cristallo.

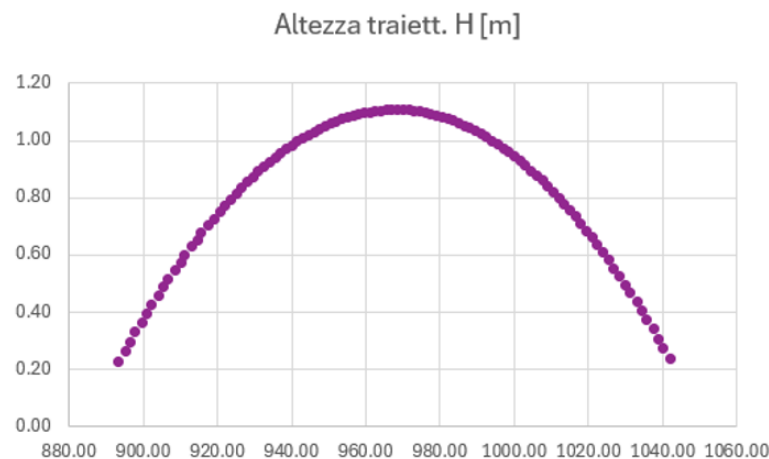


Figura 149: Altezza traiettoria su tutta la Curva Cristallo.

Dalla traiettoria è possibile determinare la **forza totale agente** sulla pista, questa è data dalla sommatoria delle componenti perpendicolari di F_c e P . Dalla reazione vincolare F_r è quindi possibile determinare l'accelerazione normale agente sulla pista.

$$F_R = F_C \sin \alpha + P \cos \alpha$$

$$a_n = \frac{F_R}{m}$$

Questi procedimenti sono stati eseguiti ogni 50cm lungo tutta la traiettoria. I calcoli e risultati sono riportati di seguito.

N. pos CL n	Progressiva x [m]	R.curvatura R [m]	Velocità v [km/h]	Velocità v [m/s]	Tempo t [s]	Forza centr. F_c [N]	Forza peso P [N]	Incl. α [deg]	Equazione $F_c \cos \alpha - P \sin \alpha$	Reazione F_R [N]	Accel. a_n [g]	Accel. a_n [m/s ²]
1801	888	1435.05881	128.30	35.64	0.00	557.60	6180.30	[°] 5.00	16.82	6205.38	1.004	9.85
1802	888.5	1435.05881	128.33	35.65	0.01	557.81	6180.30	[°] 5.00	17.04	6205.40	1.004	9.85
1803	889	1435.05881	128.35	35.65	0.03	558.02	6180.30	[°] 5.00	17.25	6205.42	1.004	9.85
1804	889.5	1435.05881	128.37	35.66	0.04	558.21	6180.30	[°] 5.00	17.44	6205.43	1.004	9.85
1805	890	1435.05881	128.39	35.66	0.06	558.39	6180.30	[°] 5.00	17.61	6205.45	1.004	9.85
1806	890.5	1435.05881	128.41	35.67	0.07	558.55	6180.30	[°] 5.00	17.78	6205.46	1.004	9.85

Figura 150: Calcoli per traiettoria e forza applicata alla pista.

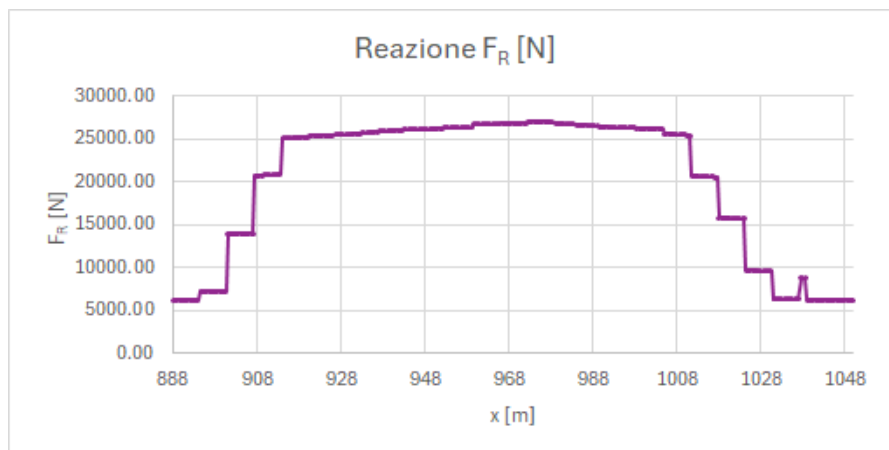


Figura 151: Forza applicata alla Curva Cristallo.

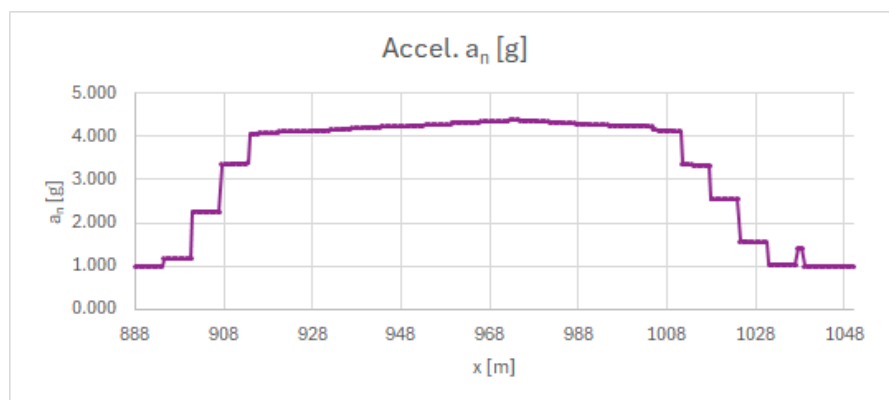


Figura 152: Accelerazione normale in g applicata alla Curva Cristallo.

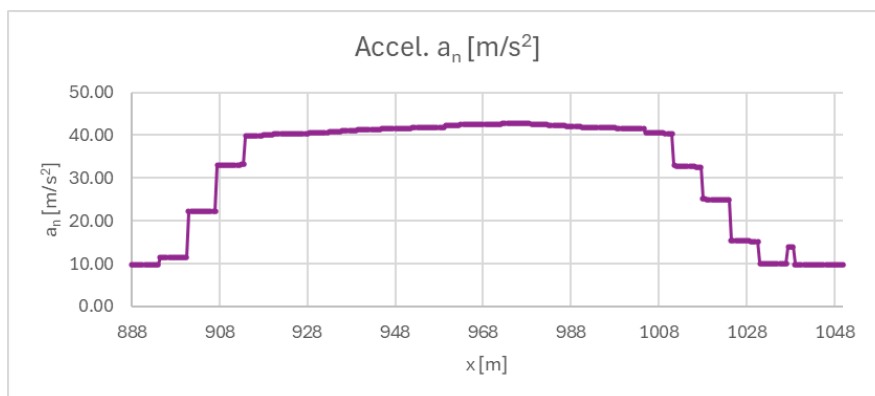


Figura 153: Accelerazione normale in m/s² applicata alla Curva Cristallo.

La forza F_R è però la reazione vincolare totale, a questo punto è necessario trovare la **forza dinamica del Bob** applicata alla progressiva x generica. L'azione dinamica alla progressiva x viene considerata come un'azione impulsiva distribuita su 2 picchi corrispondenti ai due pattini. La posizione dei due picchi dipende dalla distanza tra i pattini, dalla velocità che il Bob ha alla progressiva x e dall'istante in cui il Bob raggiunge la posizione.

Il tempo t di raggiungimento della progressiva è dato dall'equazione del moto semplice, conoscendo la velocità del Bob e la progressiva (Figura 150). Al tempo t si considera il raggiungimento del pattino anteriore, da qui in base alla velocità v saranno determinati il tempo di percorrenza del pattino anteriore, posteriore e la distanza tra il passaggio tra i due.

Il primo picco raggiunge il valore βF_R e il secondo αF_R , il tempo di differenza tra i due picchi è $t = d_{ap}/v$, la durata del primo picco è $t = l_a/v$ e quella del secondo è $t = l_p/v$.

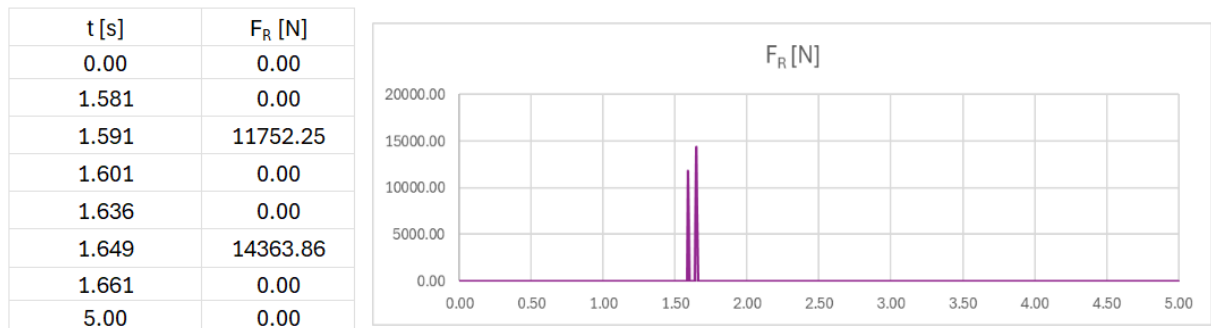


Figura 154: Esempio di azione dinamico alla progressiva x generica.

La funzione è stata graficata su un intervallo di 5 secondi in modo da avere in ogni punto la stessa durata del carico, poi in base alla progressiva i picchi si troveranno in punti diversi del grafico in modo da coprire tutto l'intervallo.



Figura 155: Risultante carico dinamico per quattro punti consecutivi.

3.3 Applicazione dei carichi

Per completare i modelli FEM si vanno ad applicare i carichi dinamici e statici al corpo pista e alla sottostruttura. Nella Relazione di calcolo del Corpo Pista, vengono applicati il carico Bob, il peso permanente proprio e portato, il vento, la temperatura, il peso del ghiaccio e il carico manutenzione. Nel progetto, per semplicità, i carichi sono stati applicati come carichi statici; nell'attuale studio invece si è scelto di approfondire il carico Bob come carico dinamico e gli altri sono stati mantenuti come carichi statici.

Nella Relazione di calcolo delle Strutture della pista, sono stati applicati tutti i carichi provenienti dalla base del corpo pista e l'azione sismica. In questo caso studio, avendo riportato il modello completo, viene solamente applicata l'azione sismica al modello con la sottostruttura.

Di seguito sono riportati i dettagli di tutti i carichi applicati.

3.3.1 Carico Bob dinamico

L'azione dovuta al moto del Bob, descritta nel paragrafo precedente, è stata applicata in 100 punti del guscio, posti lungo la traiettoria.

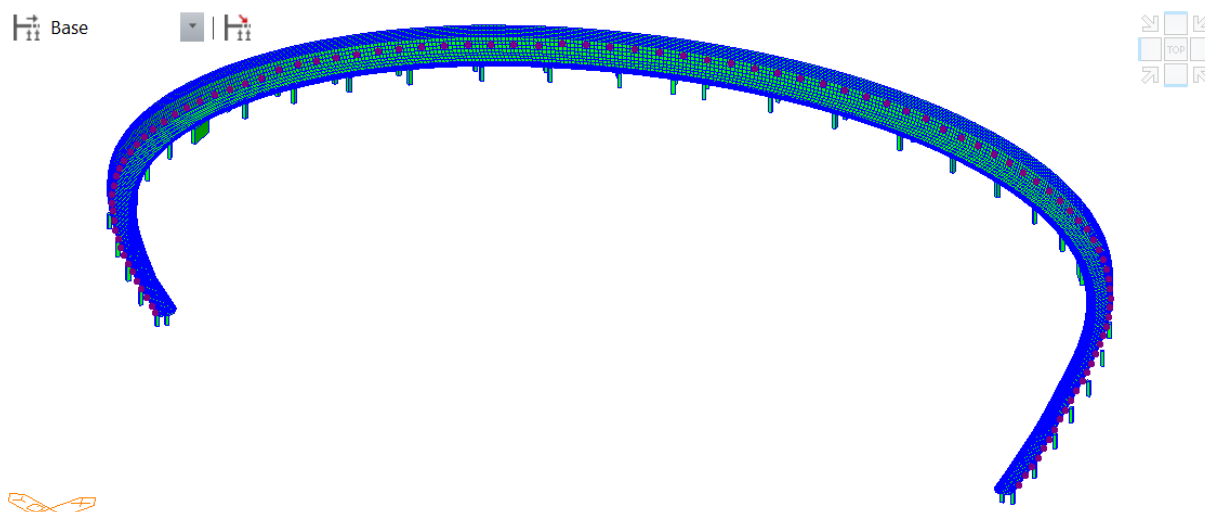


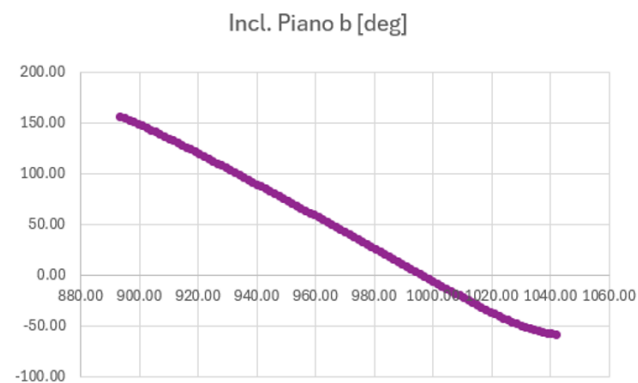
Figura 156: Posizione 100 di applicazione del carico Bob.

Come prima cosa sono stati individuati i punti più vicini alla traiettoria, questi sono stati selezionati conoscendo l'altezza della traiettoria in funzione della progressiva (Figura 149). A questo punto per applicare la forza F_r riportata a Figura 151, sono state utilizzate delle *Time History Functions*. Queste sono funzioni di forza variabile nel tempo come quella riportata a Figura 154. Però in MidasCivil non è possibile applicare una forza perpendicolare al plate, dovrà essere scomposta nelle tre direzioni principali.

Per scomporre la forza sono stati individuati gli angoli tra la perpendicolare alla superficie e le direzioni principali. È stato fatto per otto punti e per tutti gli altri si è trovato il valore per interpolazione.

Progressiva	Incl. Piano
x [m]	β [deg]
888.00	157.00
913.50	130.00
945.00	83.00
973.00	36.00
998.50	-12.00
1024.00	-48.00
1050.00	-60.00

Tabella 7: Inclinazione della perpendicolare alla superficie con asse x.

Figura 157: Inclinazione β per tutta la Curva Cristallo.

Quindi con una semplice proiezione sulle tre direzioni si è passati dalla forza totale dinamica F_r alle componenti F_{rx} , F_{ry} e F_{rz} . L'angolo è impostato in modo da ottenere i segni delle componenti coerenti con il verso positivo degli assi.

Le funzioni di time history in questo modo diventano 300, poiché sono 100 per ogni direzione principale. Queste vengono applicate nei punti della traiettoria di riferimento come dei *Dynamic Nodal Load*.

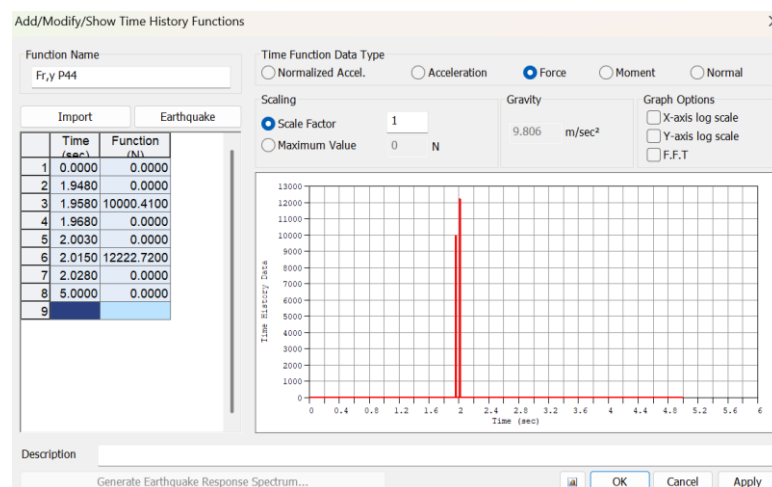


Figura 158: Esempio di forza dinamica, componente y per il punto 44.

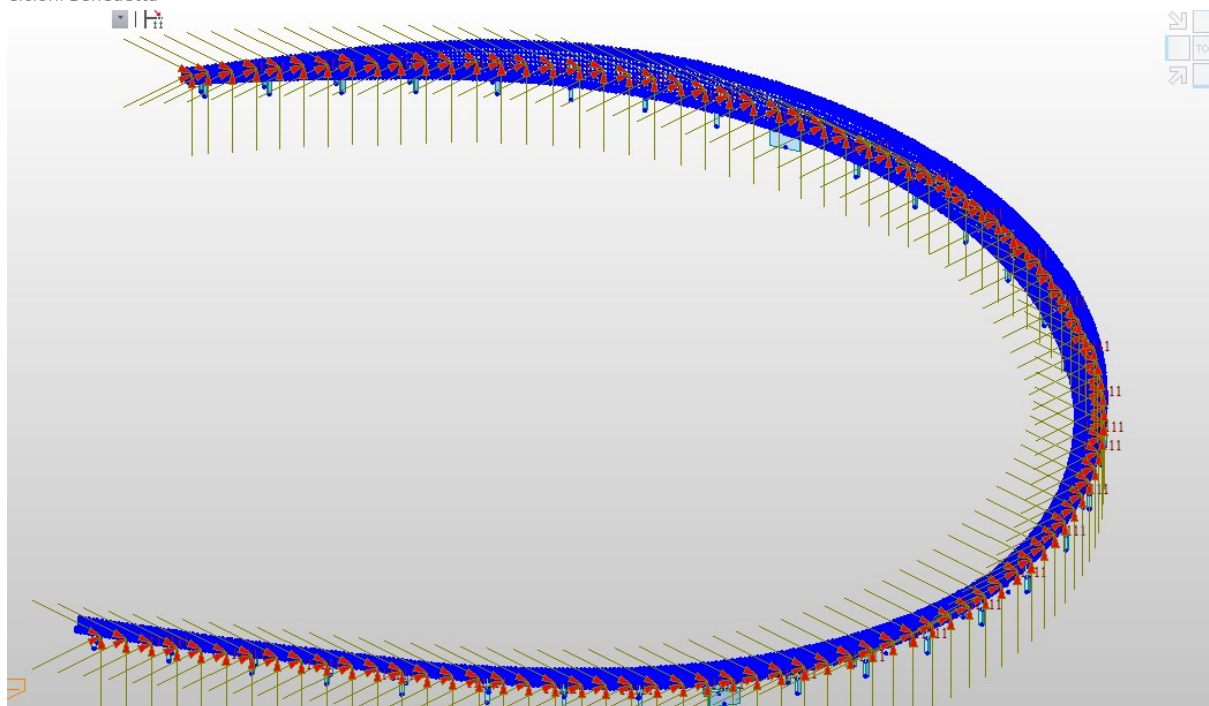


Figura 159: Applicazione del carico Bob dinamico ai 100 punti della traiettoria.

Per eseguire l'analisi dinamica con il carico Bob è stato creato un *Time History Load Case* riportato alla Figura 160.

General
Name : Reazione Fr Description :

Analysis Type
☒ Linear
☐ Nonlinear

Analysis Method
☐ Modal
☒ Direct Integration
☐ Static

Time History Type
☒ Transient
☐ Periodic

End Time : 20 sec Time Increment : 0.01 sec
Step Number Increment for Output : 1

Order in Sequential Loading
☐ Subsequent to ☒ Load Case
☐ Initial Element Forces (Table)
☐ Initial Forces for Geometric Stiffness
☐ Cumulate D/V/A Results ☐ Keep Final Step Loads Constant

Geometric Nonlinearity Type
☒ None ☐ Large Displacements

Damping
Damping Method : Mass & Stiffness Proportional

Mass and Stiffness Coefficients
Damping Type : ☒ Direct Specification
☐ Calculate from Modal Damping :
Coefficients Calculation
☒ Frequency [Hz] :
☐ Period [sec] :
Damping Ratio :

	Mode 1	Mode 2
Frequency [Hz]	0	0
Period [sec]	0	0
Damping Ratio	0	0

Show Damping Ratio ...

Time Integration Parameters
Newmark Method : Gamma 0.5 Beta 0.25
☒ Constant Acceleration ☐ Linear Acceleration ☐ User Input

Nonlinear Analysis Control Parameters
☒ Perform Iteration Iteration Controls...
Damping Matrix Update : ☐ No ☒ Yes Description

OK Cancel Apply

Figura 160: Time history load case.

3.3.2 Carichi statici

Al modello del corpo pista sono stati applicati i carichi statici come descritto nella relazione di calcolo. Il peso proprio **G1** è dato dal coefficiente -1 in direzione Z, il carico ghiaccio **Qg** distribuito su tutta la superficie è di 1500 N/m^2 , il carico vento è distribuito su tutto il guscio sia in direzione X **Vx** che in direzione Y **Vy** ed è di 1000 N/m^2 , il carico manutenzione **Qm** è applicato in verticale solo nella zona centrale del guscio ed è di 1000 N/m^2 . La temperatura è applicata direttamente ai plate come temperatura uniforme, è inserita quindi con un valore positivo **T+** di 50° e uno negativo **T-** di -30° , impostando una temperatura iniziale del materiale di 10° . L'applicazione dei carichi è riportata dalla Figura 161 alla Figura 167.

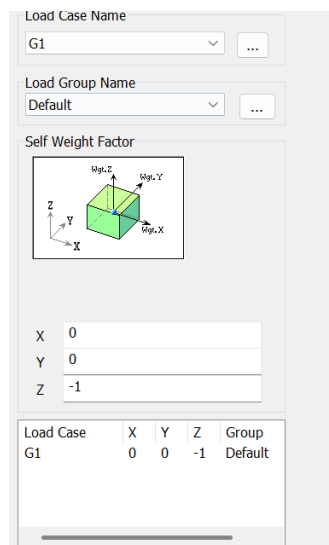


Figura 161: Peso proprio G1.

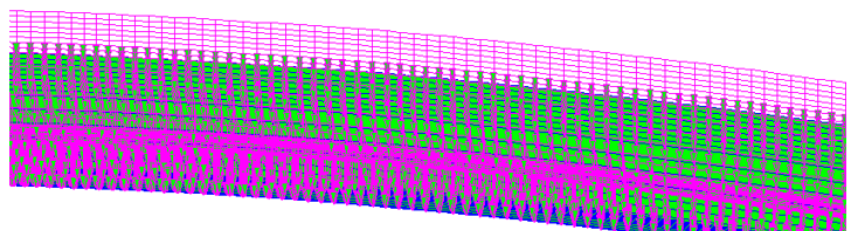
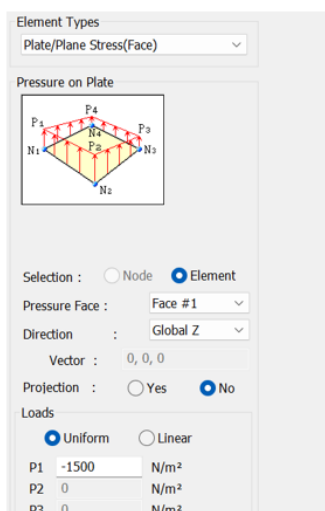


Figura 162: Peso ghiaccio Qg.

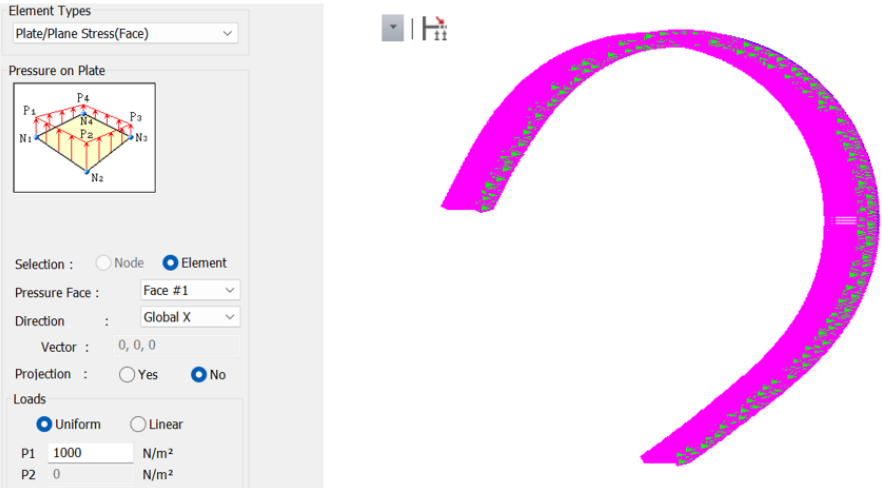


Figura 163: Carico vento Vx.

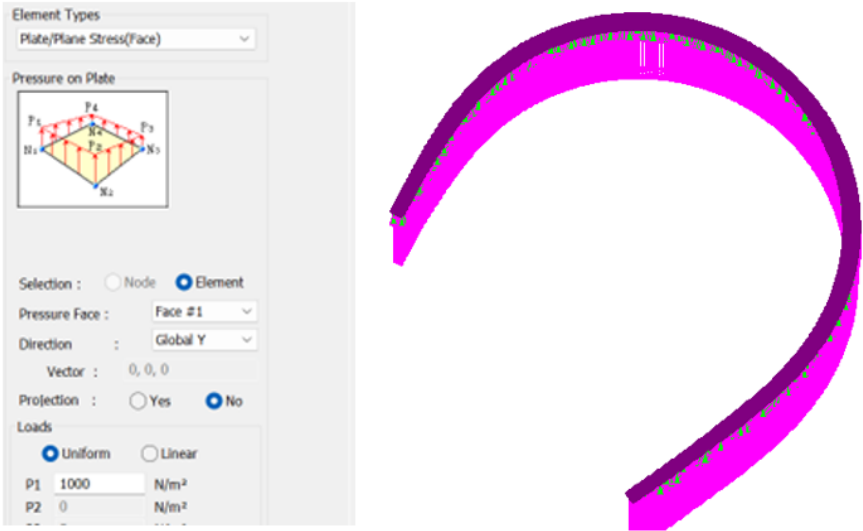


Figura 164: Carico vento Vy.



Figura 165: Carico manutenzione Qm.

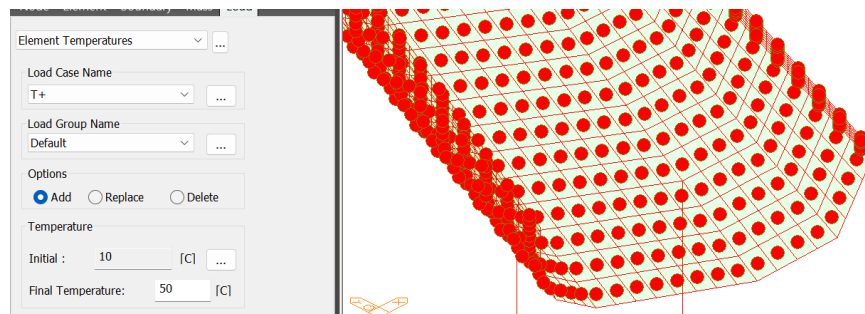


Figura 166: Temperatura T+.

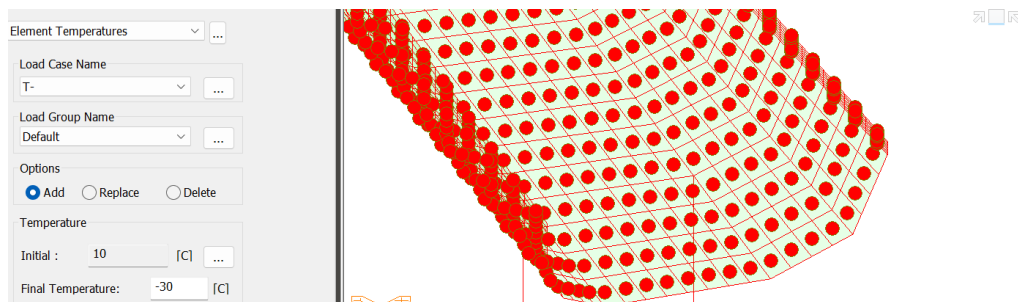


Figura 167: Temperatura T-.

Per fare il confronto con il carico dinamico del Bob è stato inserito anche il **carico Bob statico** come da relazione, ovvero con delle forze concentrate in 10 punti lungo il tracciato. La forza deve avere valore complessivo di 6kN in direzione verticale e 32kN in direzione perpendicolare alla superficie. Per fare questo sono stati scelti 10 plate in corrispondenza della traiettoria e in base alla dimensione dell'elemento è stato riportato il carico come forza distribuita sulla faccia dell'elemento.

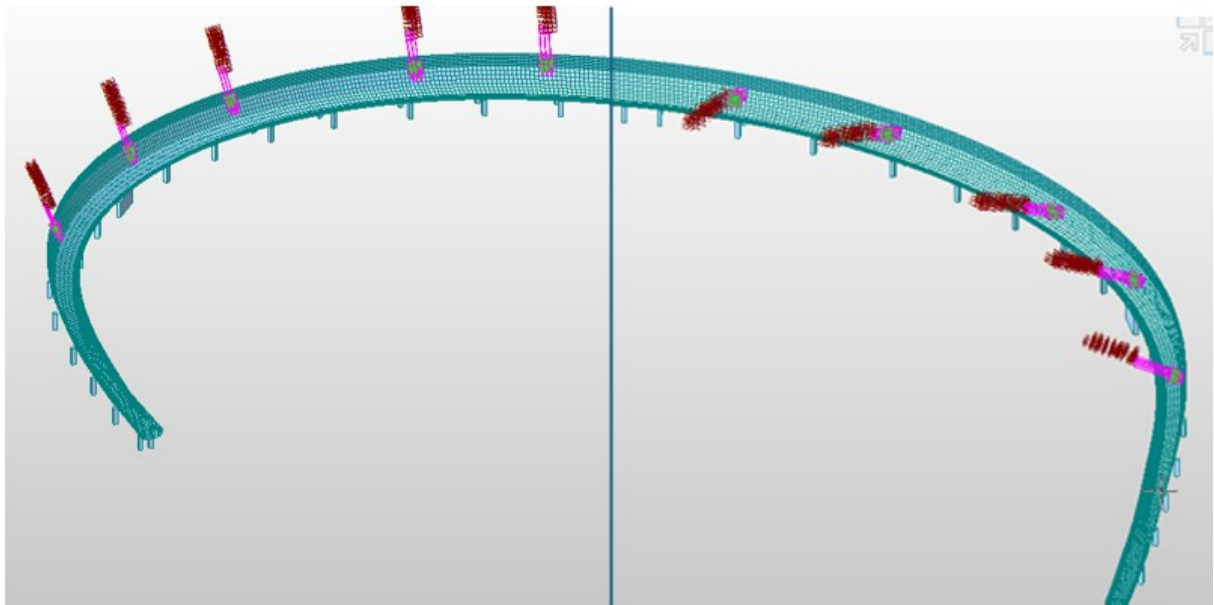


Figura 168: Applicazione del carico stato del Bob (verticale a sinistra e perpendicolare a destra).

3.3.3 Azione Sismica

L'azione sismica è stata applicata solamente al modello con la sottostruttura, per l'azione si è fatto riferimento alla RELAZIONE sismica. Si prende lo spettro di progetto per le coordinate 46.5455, 12.1263 e parametri $V_n=75$ anni, $C_u=1$. Allo stato limite SLV i parametri base sono $a_g=0.093g$, $F_0=2.633$, $T_c^*=0.387$. Con un suolo di tipo B e un fattore di struttura $q=2$ si ottiene lo spettro riportato a Figura 169.

Lo spettro viene convertito in accelerogramma attraverso il programma SIMQKE e applicato al modello nelle direzioni X e Y. La Curva Cristallo ha una struttura irregolare per cui il sisma è stato messo in combinazione $E = 0.45 E_x + 0.45 E_y$. L'accelerogramma utilizzato nelle due direzioni è riportato a Figura 170.

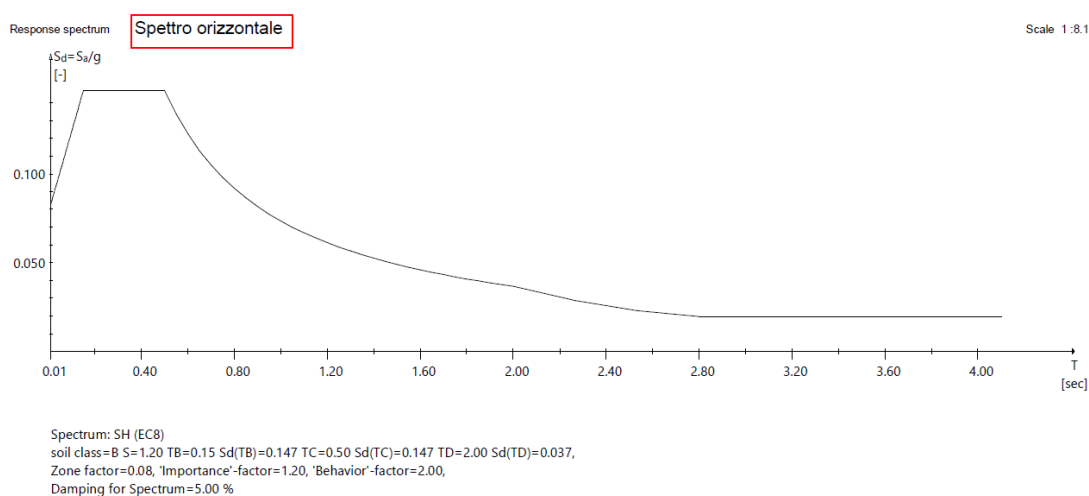


Figura 169: Spettro orizzontale di progetto.

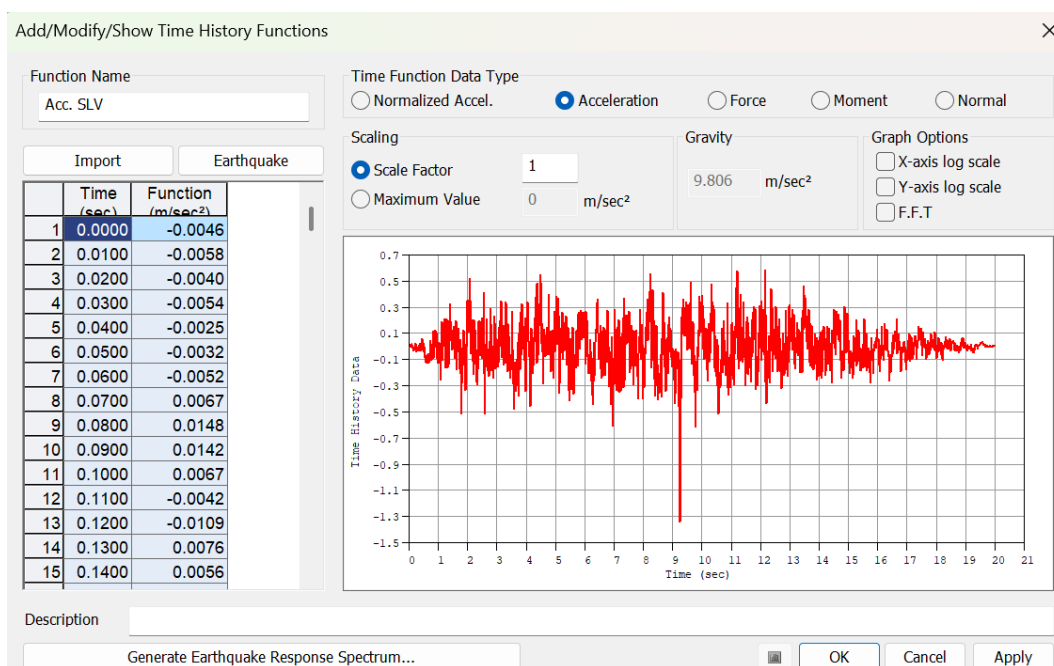


Figura 170: Accelerogramma spettro-compatibile.

3.4 Risultati dell'Analisi FEM

Per analizzare i risultati dell'analisi si è voluto fare delle verifiche di alcune sezioni della pista. Sono stati raccolti i risultati ottenuti con l'applicazione dei vari carichi, messi in combinazione e utilizzati per le verifiche.

Le azioni maggiori si possono ottenere con il carico Bob o con il carico sisma, per capire quale dei due è peggiorativo sono stati messi a confronto. Sono stati estrapolati risultati in termini di spostamento, accelerazione e sollecitazioni ai plate per confrontarli tra i due casi.

Per avere una valutazione complessiva sono state prese da 6 a 9 sezioni della pista e sono stati estrapolati dati nel punto di passaggio del Bob, nella zona inferiore della sezione e nella zona superiore (Figura 171). Le sezioni sono distribuite lungo tutto il tracciato in modo da avere una panoramica delle sollecitazioni complessive.

Di seguito sono riportati grafici dei risultati per le differenti sollecitazioni confrontate tra carico dinamico del Bob e carico del sisma.

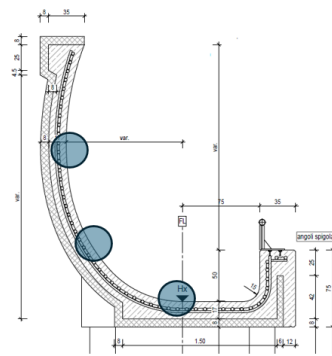


Figura 171: Punti analizzati della pista: zona superiore, centrale e inferiore.

3.4.1 Spostamenti

Di seguito si riportano i grafici di spostamento DXYZ in cm dei nodi lungo il percorso, i nodi sono ordinati lungo il percorso come mostrato alla seguente tabella.

Progressiva [m]	Nodi centrali	Nodi inferiori	Nodi superiori
894.00	100.00	-	-
912.00	88.00	-	-
930.00	76.00	7362	2978
948.00	64.00	21082	11937
966.00	38.00	2207	7025
973.50	27.00	1335	4838
984.00	15.00	886	20453
1002.00	12.00	9163	1169
1020.00	36.00	-	-

Tabella 8: Nodi analizzati per parti della sezione.

A Figura 172 è rappresentato lo spostamento di 9 nodi in cui passa il Bob, a Figura 173 è riportato lo spostamento di 6 nodi nella parte inferiore della sezione e a Figura 174 nella parte superiore. In generale si nota che il picco iniziale si ha nel momento in cui il Bob raggiunge il punto. Dopo il picco si nota un effetto di propagazione e dissipazione dello spostamento lungo il percorso, le curve infatti mostrano oscillazioni con ampiezze e frequenze diverse. Dopo circa 18-20 secondi, tutte le curve sembrano rientrare verso lo zero, indicando un termine del fenomeno dinamico e una stabilizzazione del sistema.

Nella zona centrale della sezione i valori più alti sono raggiunti per i nodi 88 e 12 che si trovano alle estremità della curva, seguiti dai nodi 38, 27 e 15 che sono più nella parte centrale della curva; questo potrebbe essere dovuto al fatto che all'estremità della curva il Bob ricade principalmente in questa porzione della sezione. Lo stesso vale per la parte inferiore della sezione, che è sollecitata di più nelle zone di estremità della curva (2978, 1169), seguita poi dalla parte centrale (20453, 4838, 7025). Nella parte superiore della sezione il contributo maggiore si ha nella zona centrale del tracciato in cui l'inclinazione è maggiore.

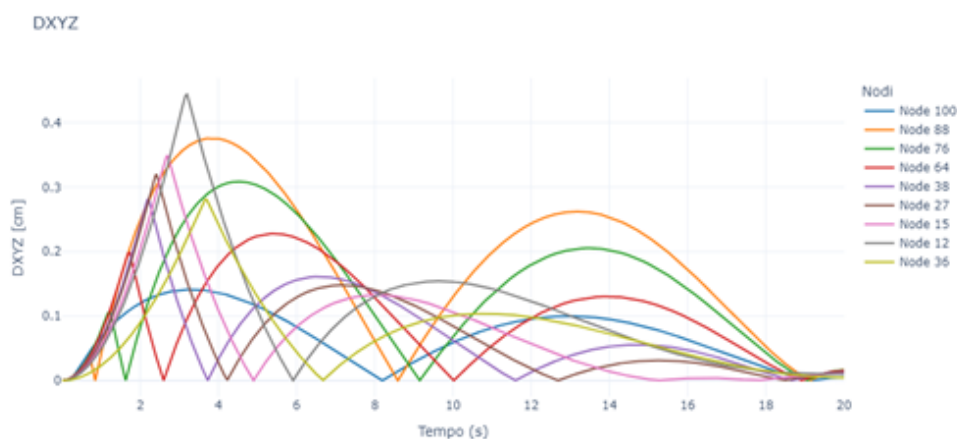


Figura 172: Carico Bob, spostamento DXYZ in corrispondenza del passaggio del Bob.

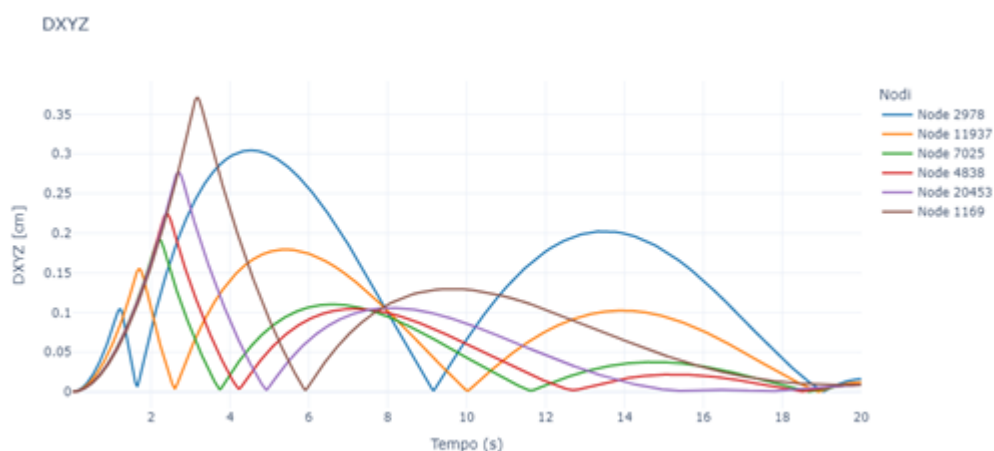


Figura 173: Carico Bob, spostamento DXYZ nella parte inferiore della sezione.

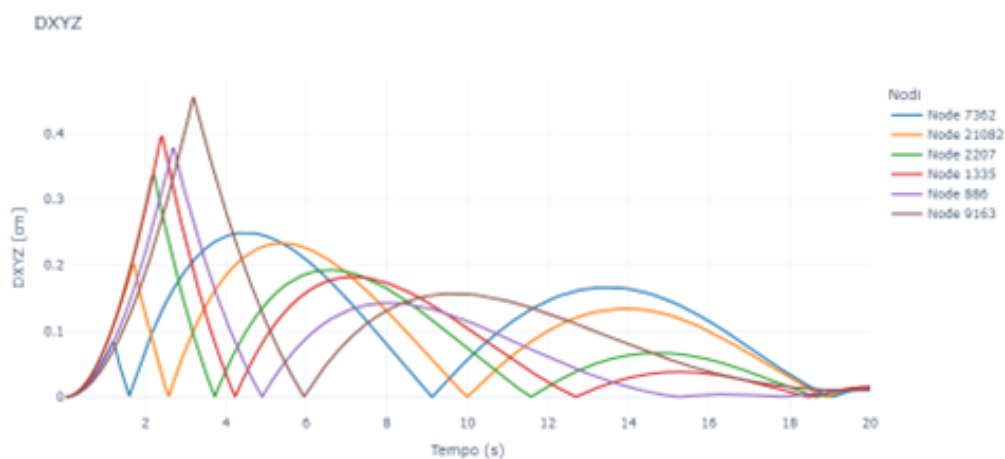


Figura 174: Carico Bob, spostamento DXYZ nella parte superiore della sezione.

Volendo fare un confronto con i valori ottenuti dal sisma si può notare, dalla Figura 175 a Figura 177, che gli spostamenti ottenuti sono nettamente inferiori rispetto a quelli dovuti al passaggio del Bob. In questo caso i valori più alti sono raggiunti nella porzione centrale della curva in tutti e tre i casi. Potrebbe essere dovuto alla conformazione della curva, che essendo più alta in questa zona, porta a movimentare una quantità di massa maggiore rispetto al tratto in rettilineo in cui la sezione è più compatta.

Mentre con il carico Bob si raggiungono picchi intorno agli 0.5 cm, con il sisma lo spostamento non supera i 3.5×10^{-6} cm.

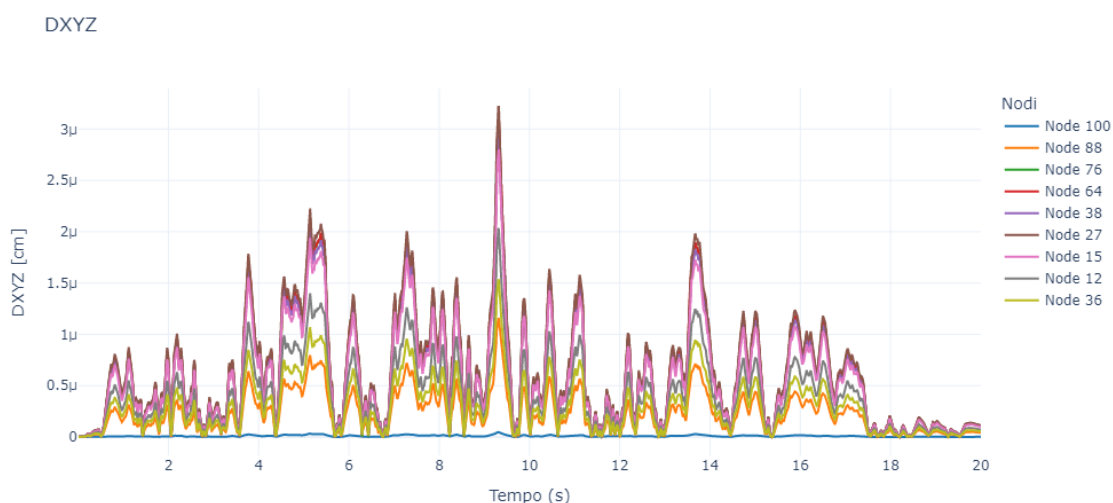


Figura 175: Sisma, spostamento DXYZ nella parte centrale della sezione.

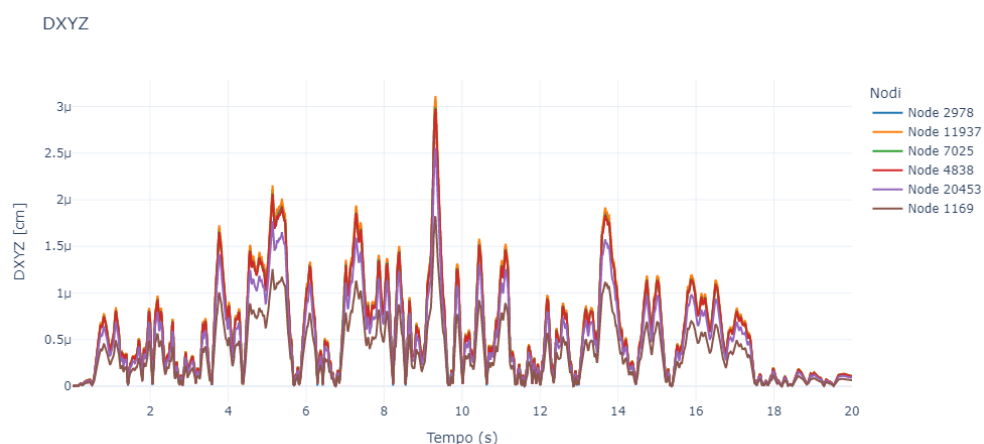


Figura 176: Sisma, spostamento DXYZ nella parte inferiore della sezione.

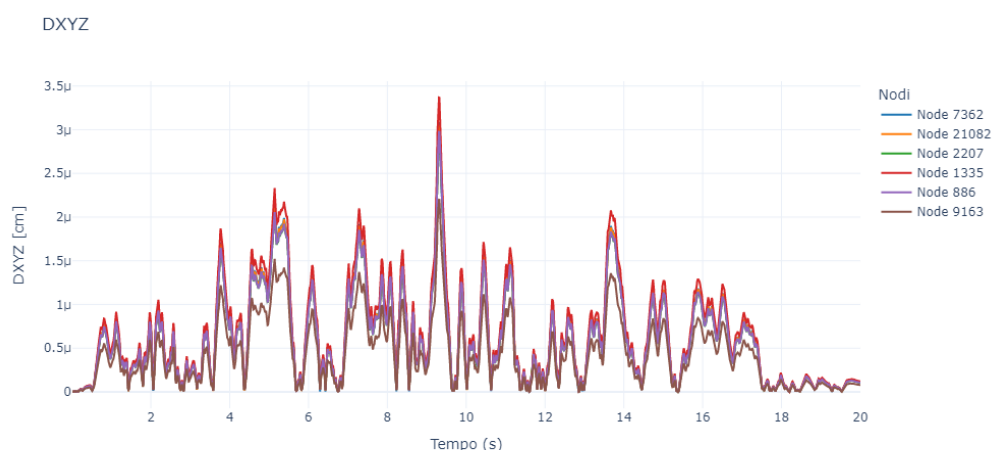


Figura 177: Sisma, spostamento DXYZ nella parte superiore della sezione.

3.4.2 Accelerazioni

Alle figure seguenti sono riportati i valori di accelerazione nelle tre parti della sezione. I grafici rispecchiano quando ricavato dai calcoli, ovvero delle accelerazioni maggiori in corrispondenza della zona centrale del tracciato in cui il Bob raggiunge una velocità maggiore.

La parte della sezione più sollecitata in generale è la parte superiore della sezione che raggiunge i 25 m/s^2 circa, mentre la parte centrale arriva a $22\text{-}23 \text{ m/s}^2$ e la parte inferiore i $8\text{-}9 \text{ m/s}^2$.

L'andamento a Figura 178 rispecchia il carico dinamico applicato costituito da due picchi consecutivi, alla Figura 179 e Figura 180 è mostrata una sollecitazione più prolungata del tempo che poi va a dissiparsi rapidamente.

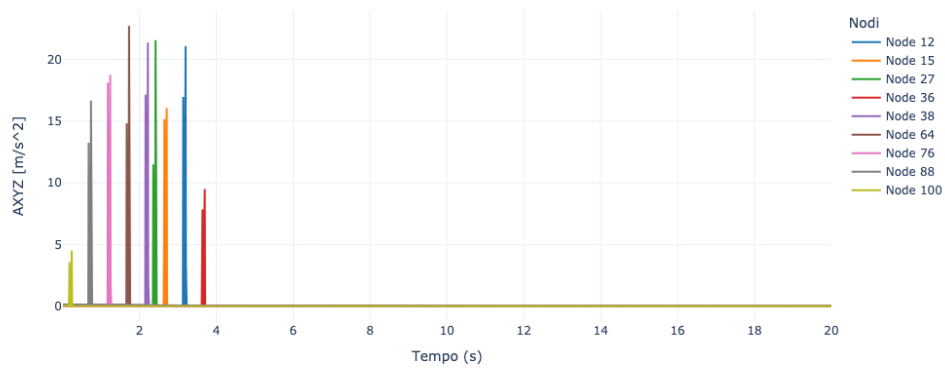


Figura 178: Carico Bob, accelerazione XYZ in corrispondenza del passaggio del Bob.

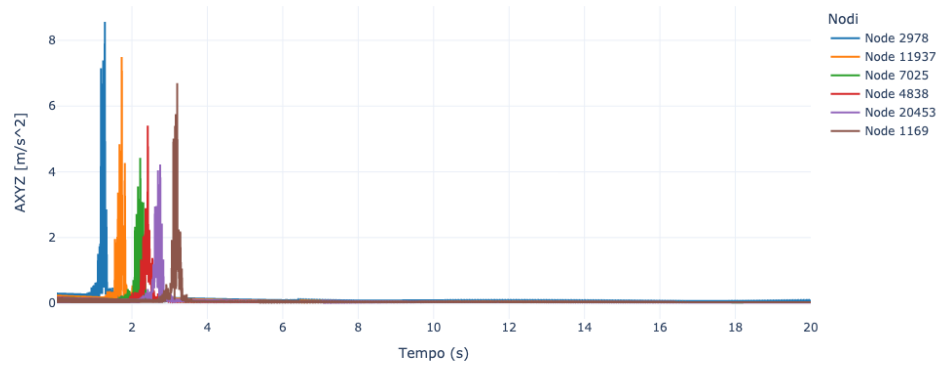


Figura 179: Carico Bob, accelerazione XYZ nella parte inferiore della sezione.

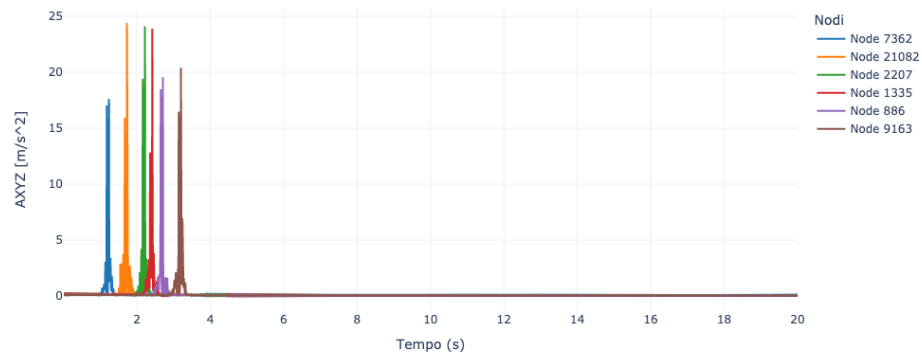


Figura 180: Carico Bob, accelerazione XYZ nella parte superiore della sezione.

Anche in questo caso volendola confrontare con le accelerazioni ottenute dal sisma, è possibile vedere un contributo nettamente inferiore (Figura 181, Figura 182, Figura 183). I valori massimi raggiunti sono di circa 0.6 m/s^2 . Ciò dimostra che il contributo del sisma in termini di spostamento e accelerazioni è meno importante rispetto a quelli del carico Bob.

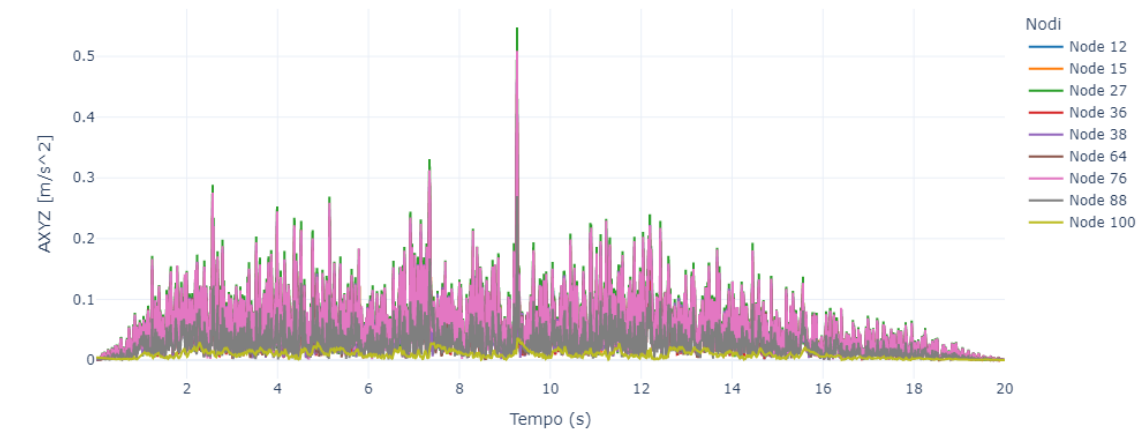


Figura 181: Sisma, accelerazione XYZ nella parte centrale della sezione.

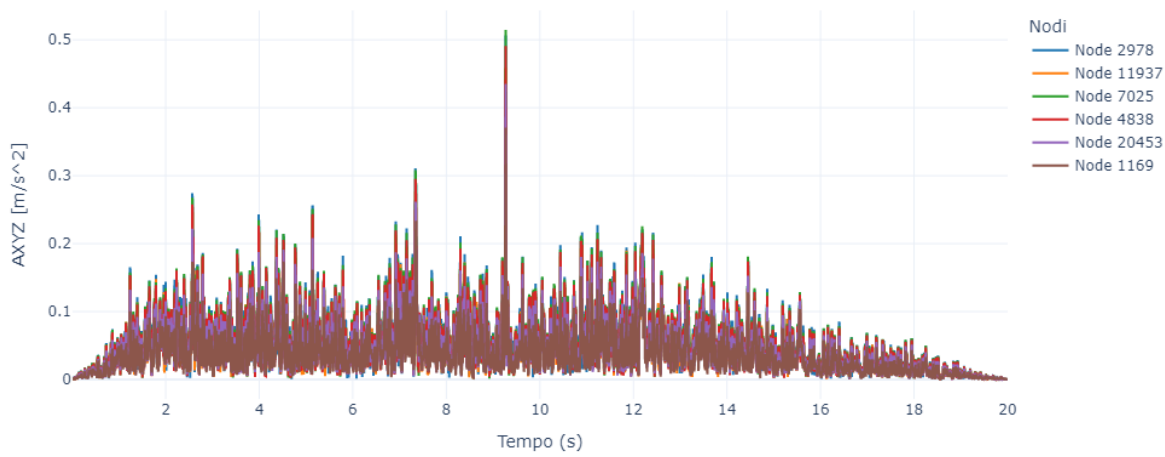


Figura 182: Sisma, accelerazione XYZ nella parte inferiore della sezione.

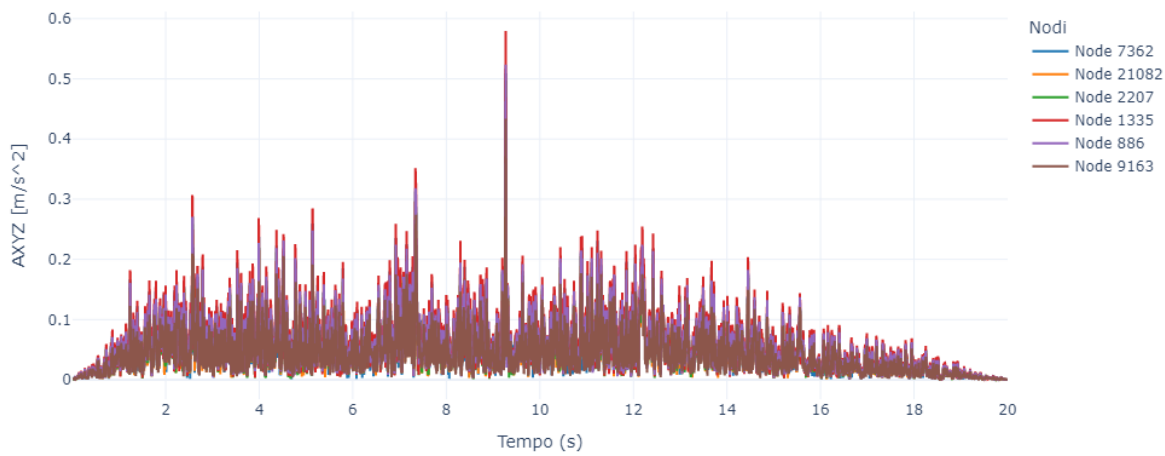


Figura 183: Sisma, accelerazione XYZ nella parte superiore della sezione.

3.4.3 Sollecitazioni

Come sollecitazioni si vanno a considerare lo sforzo normale F_{xx} e F_{yy} e i momenti flettenti M_{xx} e M_{yy} . Anche questi vengono plottati per alcuni plate lungo il tracciato, distribuiti nella parte superiore, centrale e inferiore della sezione.

Progressiva	Elem. centrali	Elem. sup.	Elem. inf.
930.00	34963	18747	34165
948.00	35049	15887	21718
966.00	18577	17433	18544
973.50	36289	16673	19635
984.00	31313	27566	30781
1002.00	12223	19856	14594

Tabella 9: elementi analizzati per parti della sezione.

Lo sforzo normale F_{xx} ha un picco al momento del passaggio del Bob per poi dissiparsi lentamente (Figura 184, Figura 185, Figura 186). Nella parte centrale della sezione ha valori più alti nella zona centrale del tracciato, per la parte inferiore e superiore invece gli andamenti sono molto simili, maggiori per le zone in estremità della curva.

Il valore più alto con il passaggio del Bob è raggiunto per l'elemento 36289 con $1.22e+6$ Nm che si trova nella parte centrale della curva. Con il sisma si ottengono dei valori massimi di circa 4000 Nm (Figura 187), per cui anche in questo caso il carico del Bob è peggiorativo.

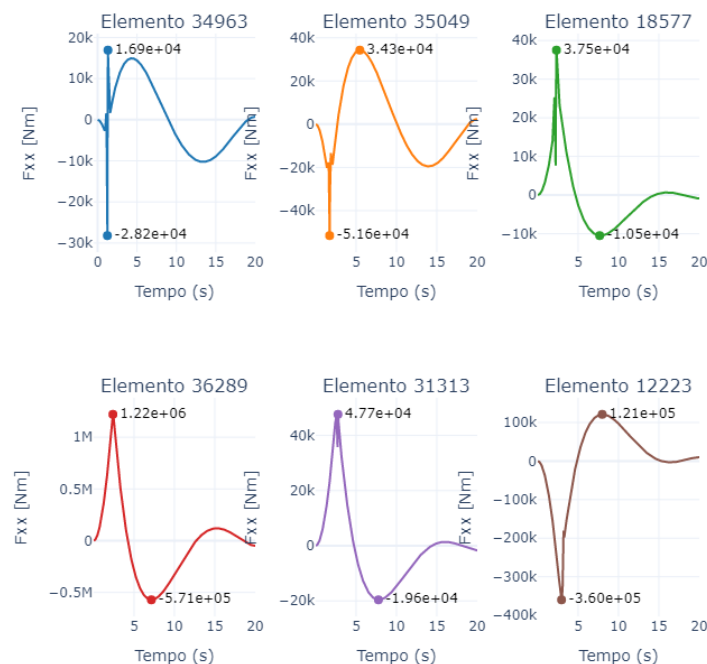


Figura 184: Carico Bob, sforzo normale F_{xx} in corrispondenza del passaggio del Bob.

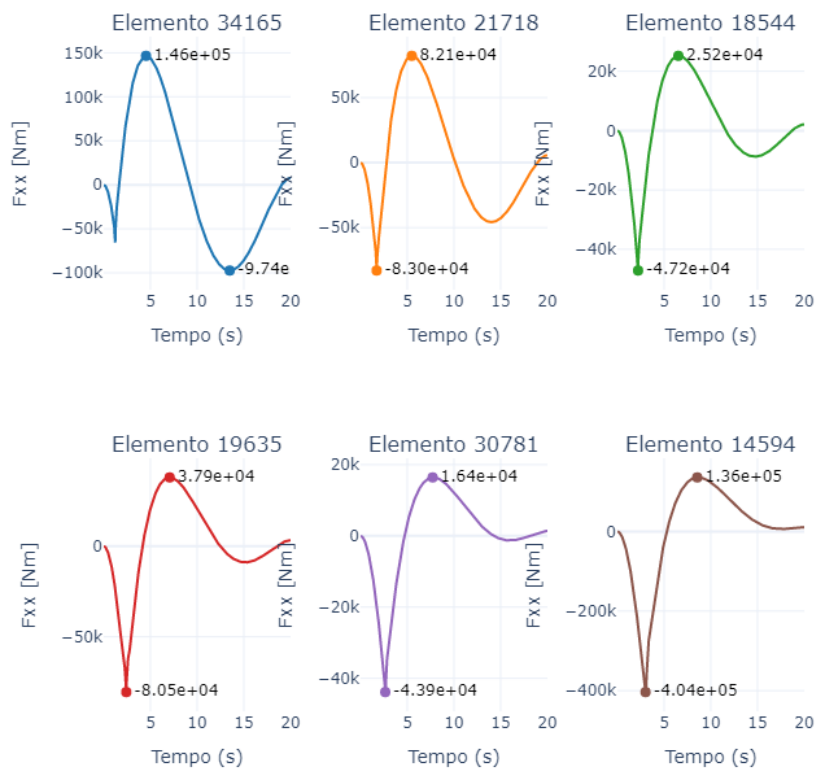


Figura 185: Carico Bob, sforzo normale F_{xx} nella parte inferiore della sezione.

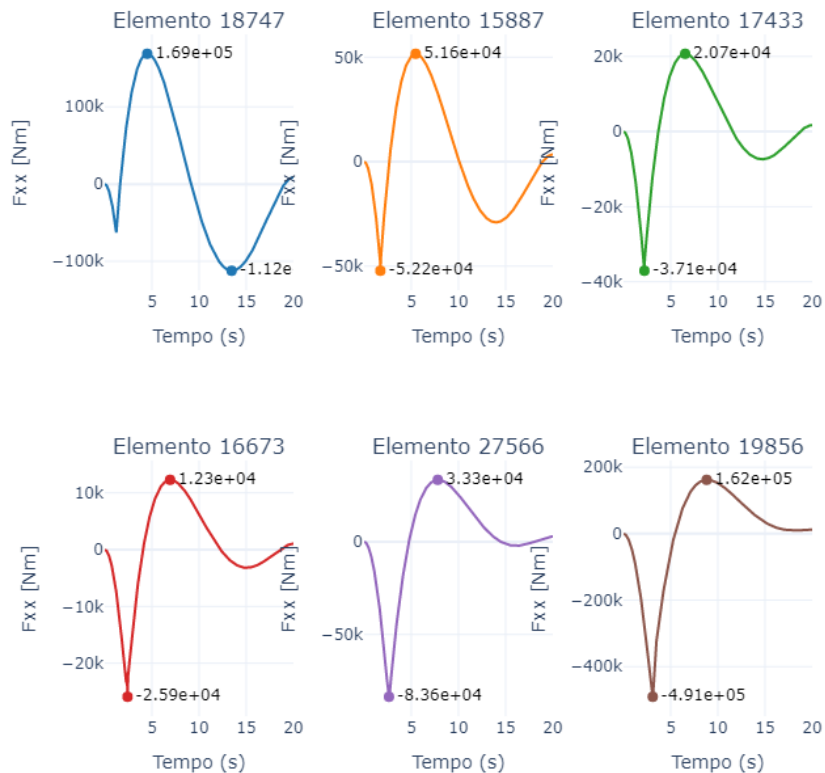


Figura 186: Carico Bob, sforzo normale F_{xx} nella parte superiore della sezione.

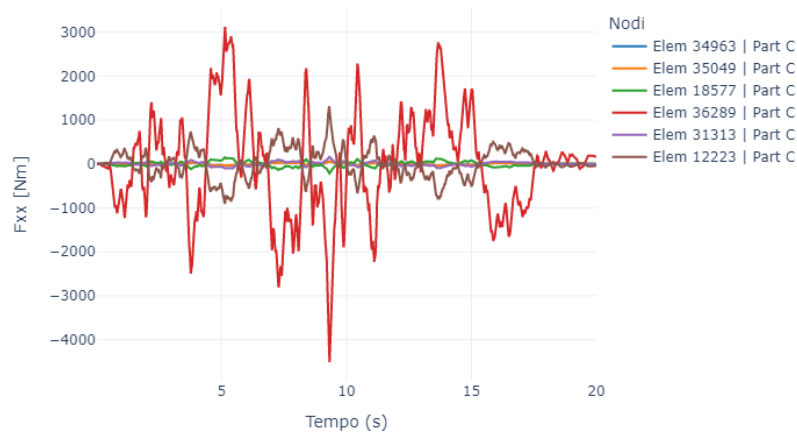


Figura 187: Sisma, sforzo normale Fxx parte centrale della sezione.

La sollecitazione **Fyy** è riportata alla Figura 188 per la parte centrale, Figura 189 per la parte inferiore e Figura 190 per quella superiore. Nella parte centrale della sezione ha valori più alti negli elementi iniziali del tracciato per poi diminuire con la progressiva, così come per la parte inferiore. Nella parte superiore i valori sono della stessa grandezza per tutti gli elementi tranne per l'ultimo. I valori sono alti per la parte centrale e inferiore, vanno a diminuire nella parte superiore.

Il valore più alto con il passaggio del Bob è raggiunto per l'elemento 34963 con $4.42e+5$ Nm che si trova nella parte iniziale della curva. Con il sisma si ottengono dei valori massimi di circa 7000 Nm (Figura 187), per cui anche in questo caso il carico del Bob è peggiorativo.

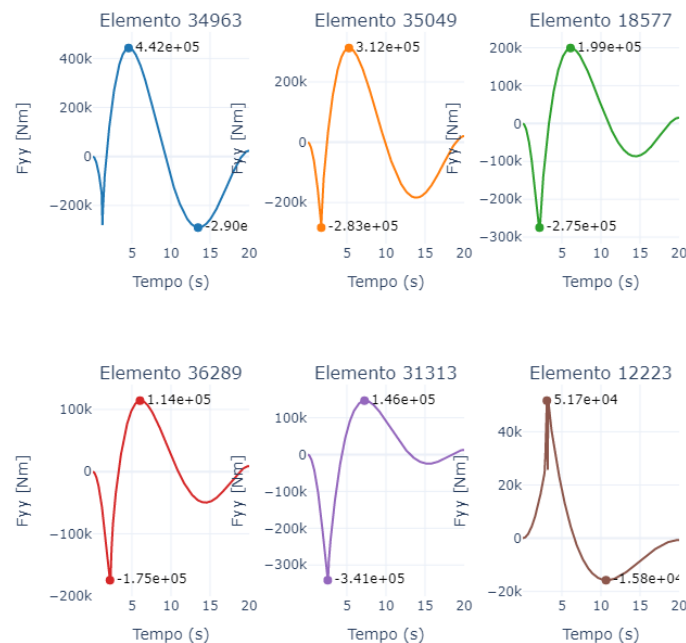


Figura 188: Carico Bob, sforzo normale Fyy in corrispondenza del passaggio del Bob.

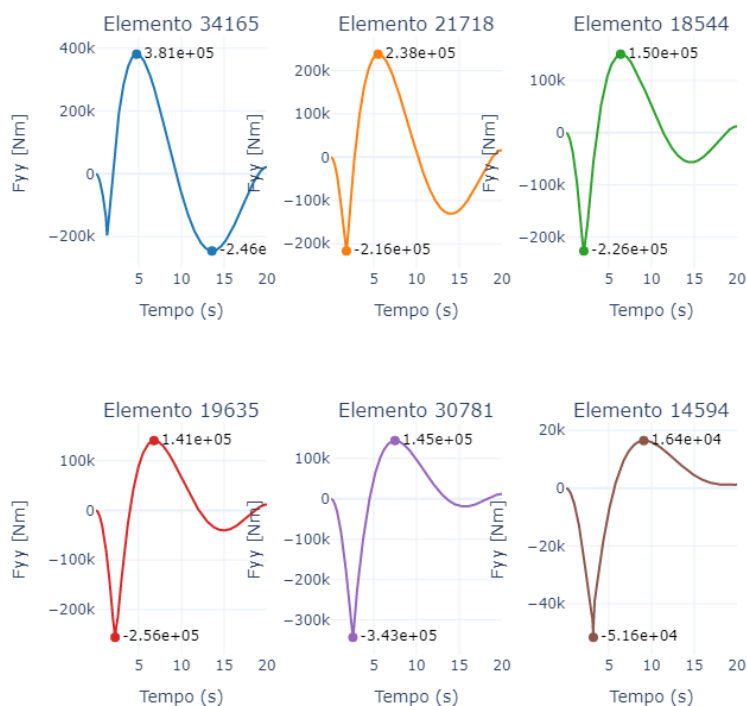


Figura 189: Carico Bob, sforzo normale F_{yy} nella parte inferiore della sezione.

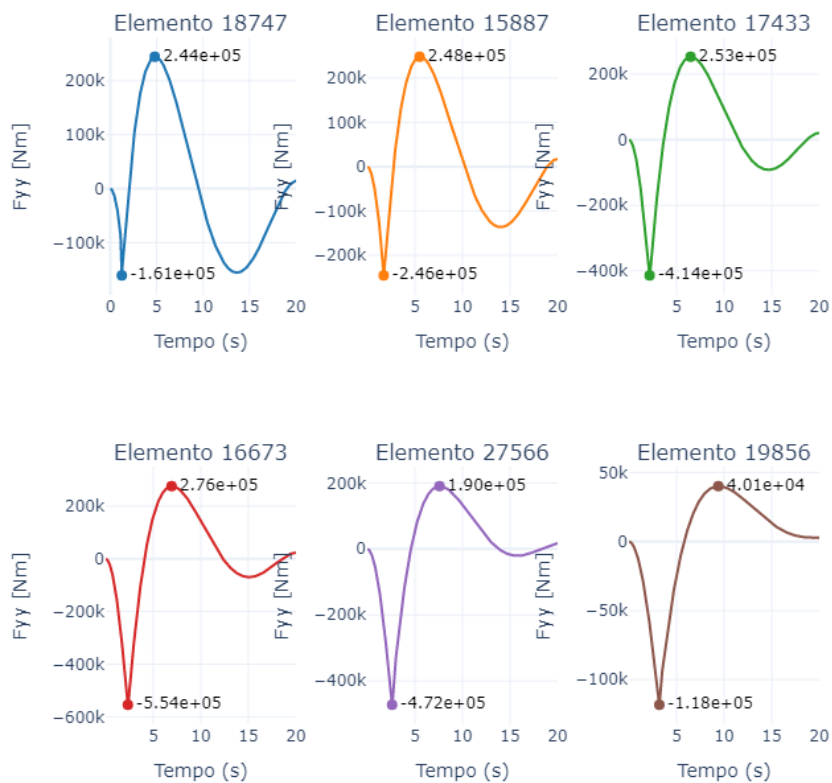


Figura 190: Carico Bob, sforzo normale F_{yy} nella parte superiore della sezione.

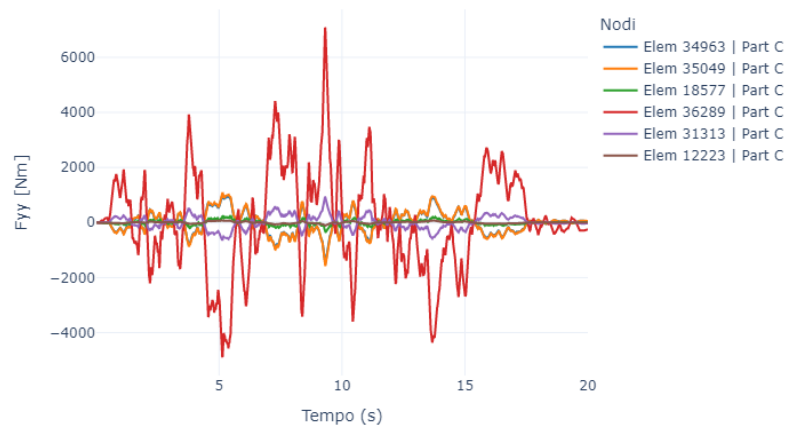


Figura 191: Sisma, sforzo normale Fyy nella parte centrale della sezione.

La sollecitazione **Mxx** è riportata alla Figura 192 per la parte centrale, Figura 193 per la parte inferiore e Figura 190 per quella superiore. Nella parte centrale e superiore della sezione i valori più alti sono raggiunti per i primi elementi della curva e dall'elemento nella zona centrale. Nella parte inferiore il valore più alto è raggiunto all'inizio della curva, andando poi a calare. I valori sono alti per la parte centrale e inferiore, raggiungendo 30k e 10k Nm/m. Sono più bassi invece per la parte superiore che arrivano a 3000Nm/m.

Il valore più alto con il passaggio del Bob è raggiunto per l'elemento 34963 con 3.32×10^4 Nm/m che si trova nella parte iniziale della curva. Con il sisma si ottengono dei valori massimi di circa 300 Nm/m (Figura 195).

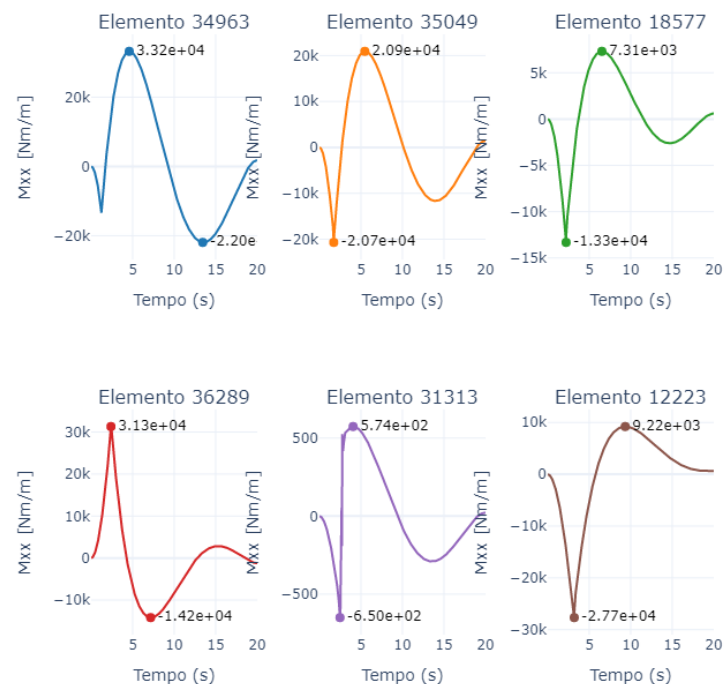


Figura 192: Carico Bob, momento flettente Mxx in corrispondenza del passaggio del Bob.

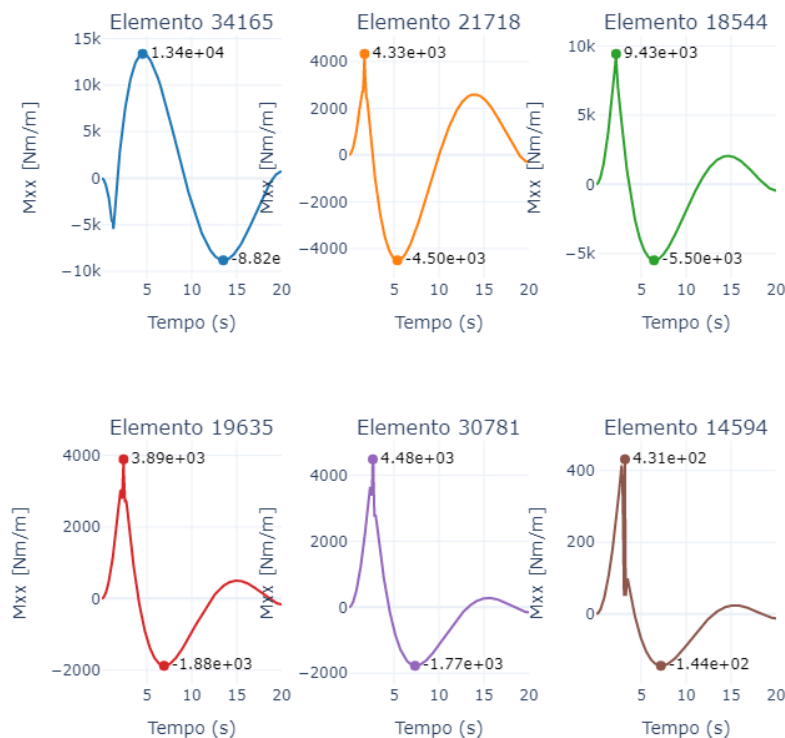


Figura 193: Carico Bob, momento flettente M_{xx} nella parte inferiore della sezione.

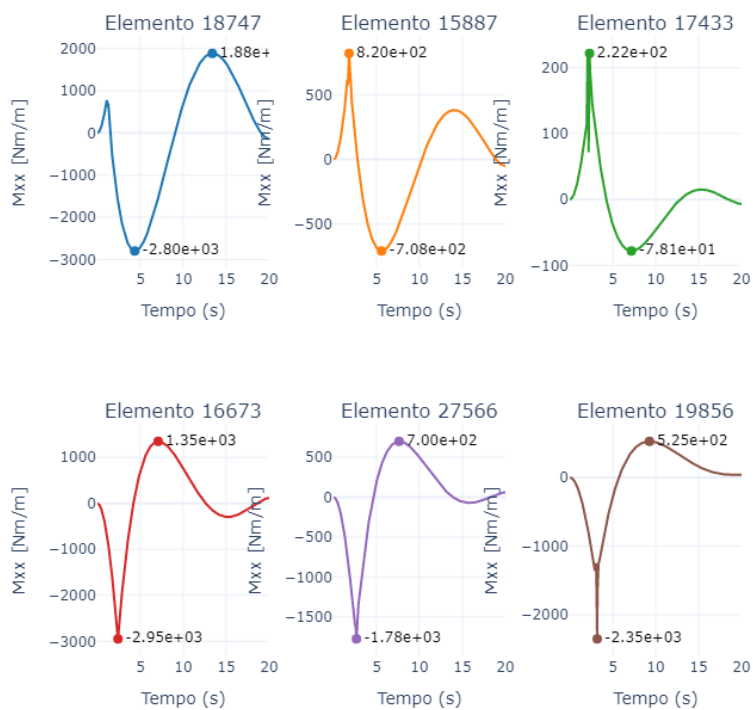


Figura 194: Carico Bob, momento flettente M_{xx} nella parte superiore della sezione.

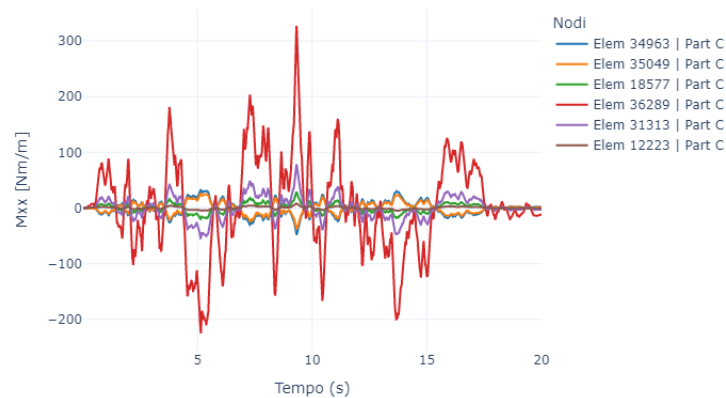


Figura 195: Sisma, momento flettente Mxx nella parte centrale della sezione.

La sollecitazione **Myy** è riportata alla Figura 196 per la parte centrale, Figura 197 per la parte inferiore e Figura 198 per quella superiore. Nella parte centrale della sezione i valori più alti sono raggiunti per il primo e ultimo elemento della curva, verso la parte centrale vanno a diminuire. Nella parte inferiore e superiore i valori sono molto inferiori e il valore più alto è sempre raggiunto all'inizio della curva.

Il valore più alto con il passaggio del Bob è raggiunto per l'elemento 34963 con $2.71e+4$ Nm/m che si trova nella parte iniziale della curva. Con il sisma si ottengono dei valori massimi di circa 100 Nm/m (Figura 199).

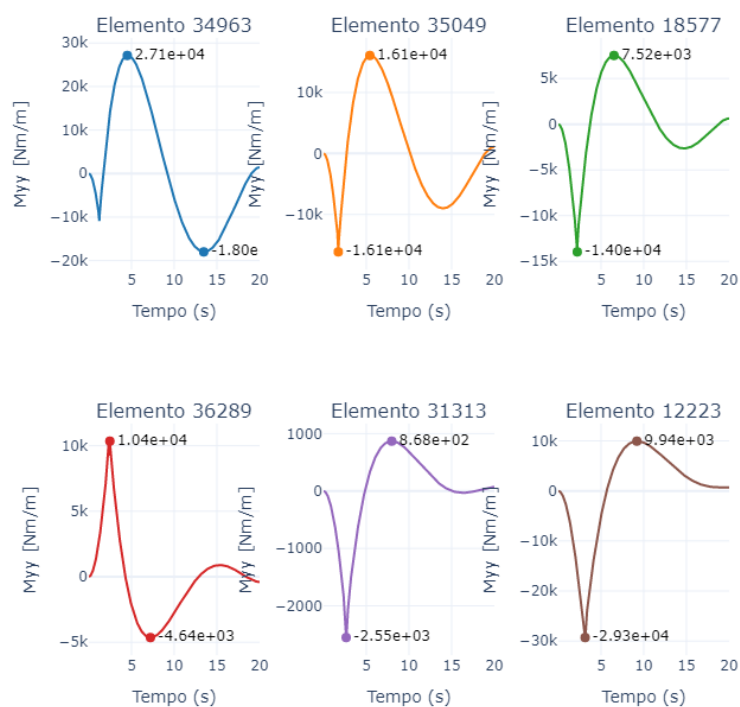


Figura 196: Carico Bob, momento flettente Myy in corrispondenza del passaggio del Bob.

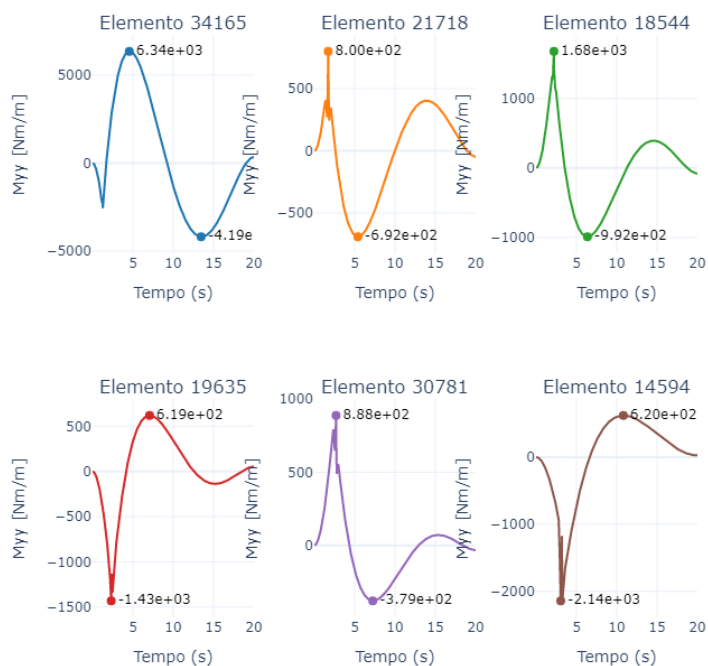


Figura 197: Carico Bob, momento flettente M_{yy} nella parte inferiore della sezione.

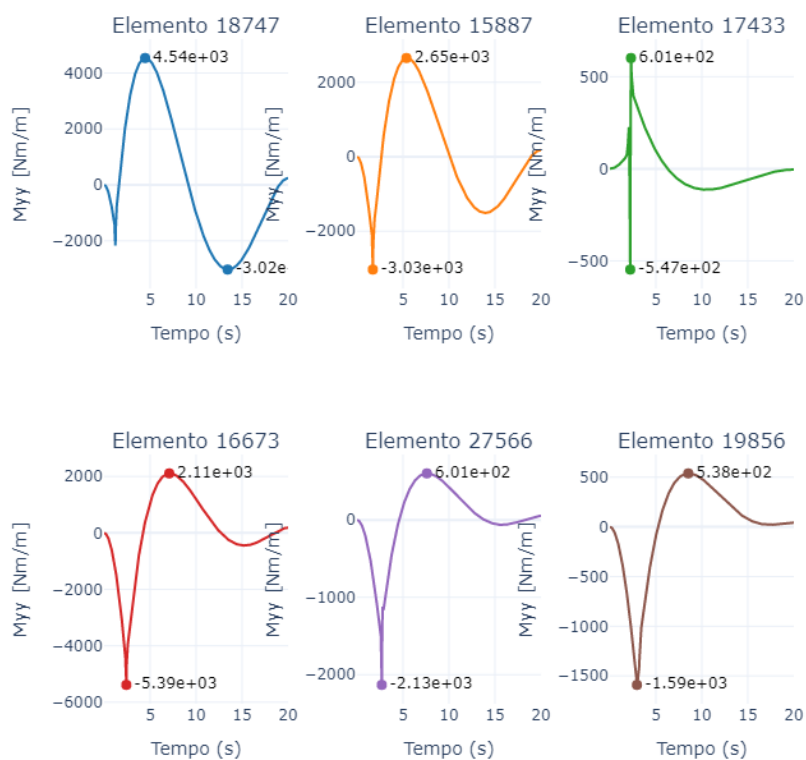


Figura 198 Carico Bob, momento flettente M_{yy} nella parte superiore della sezione.

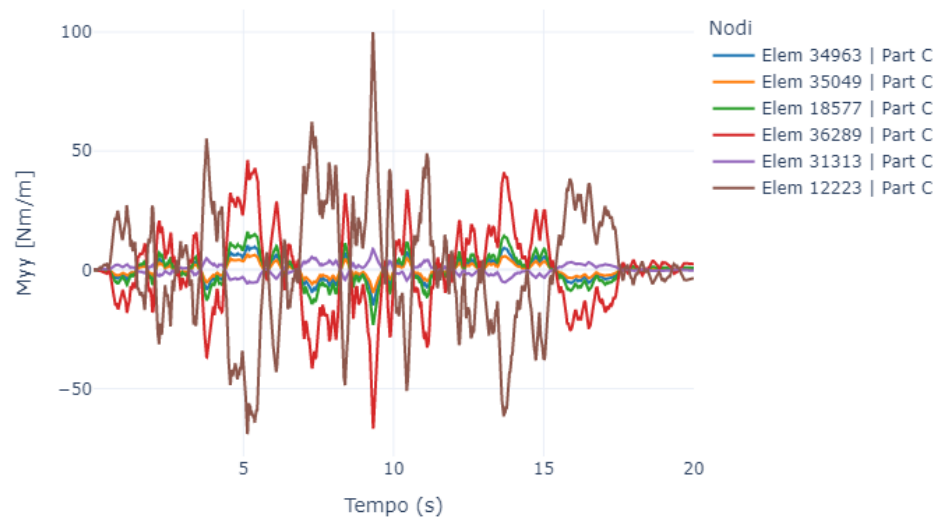


Figura 199: Sisma, momento flettente Myy nella parte centrale della sezione.

3.4.4 Verifica delle sezioni

Appurato che il passaggio del Bob porta alle sollecitazioni maggiori, si va a considerare la combinazione di carico in cui questo è il carico predominante. Per i diversi carichi si vanno a considerare i coefficienti riportati a Tabella 10.

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G_j} \cdot G_{K,j} + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Coefficienti di combinazione				
Azione	Tipo carico	Coefficiente g	Coefficiente y	coeff. totale
Qbob	accidentale prevalente	1.5	-	1.5
G1	permanente proprio	1.3	-	1.3
Vx	accidentale	1.5	0.6	0.9
Vy	accidentale	1.5	0.6	0.9
Qm	accidentale	1.5	0.7	1.05
Qg	permanente portato	1.5	-	1.5
T+	accidentale	1.5	0.6	0.9
T-	accidentale	1.5	0.6	0.9

Tabella 10: Coefficienti di combinazione di carico.

Le verifiche sono state eseguite per le sei sezioni da cui sono stati estrapolati i dati di sollecitazione per il carico Bob. Per i carichi statici sono stati presi per tutta la sezione i valori maggiori. Lo stesso vale per i risultati del carico Bob.

I valori sono stati presi per unità di lunghezza per cui anche la verifica è stata eseguita per 1 m di sezione. Alla Tabella 11 sono riportate le sollecitazioni massime in combinazione ottenute dai carichi statici per gli elementi nella zona centrale della sezione, nella Tabella 12

per la zona superiore e in Tabella 13 per la zona inferiore. I risultati sono riportati tutti in Nm/m e sono stati estrapolati dal modello del corpo pista.

A Tabella 14 sono riportati i risultati in kNm/m per le sei sezioni considerando il massimo delle tre tabelle descritte e l'aggiunta del carico Bob con i risultati riportati dai grafici precedenti.

Elem. centrali	Fxx [Nm]	Fyy [Nm]	Mxx [Nm/m]	Myy [Nm/m]
34963	6009.19	-20358.11	-878.50	510.35
35049	9430.62	-604.69	-1187.53	45.63
18577	8388.38	-17026.99	-1399.78	13.13
36289	-96839.34	-47035.54	-3075.71	-3662.94
31313	-5615.81	-19171.61	-2729.72	545.35
12223	-9954.31	5797.89	589.33	-1141.05

Tabella 11: Sollecitazioni carichi stati elementi parte centrale della sezione.

Elem. sup.	Fxx [Nm]	Fyy [Nm]	Mxx [Nm/m]	Myy [Nm/m]
18747.00	-3048.91	-1026.86	-655.86	22.70
15887.00	-2037.50	5090.21	-413.57	-145.08
17433.00	-1659.03	2443.88	-216.80	-247.87
16673.00	-15942.62	38682.75	357.24	302.65
27566.00	88.98	13649.17	-97.10	-55.21
19856.00	-1261.31	-1286.50	36.84	-150.84

Tabella 12: Sollecitazioni carichi stati elementi parte superiore della sezione.

Elem. inf.	Fxx [Nm]	Fyy [Nm]	Mxx [Nm/m]	Myy [Nm/m]
34165	4760.86	-21361.62	1623.85	284.50
21718	13216.70	-7363.62	495.59	181.63
18544	13369.78	-15045.29	190.43	63.24
19635	-20113.20	-25944.90	3407.60	935.87
30781	5374.30	-20501.72	1147.64	249.07
14594	-11196.07	663.51	276.59	1596.75

Tabella 13: Sollecitazioni carichi stati elementi parte inferiore della sezione.

Progressiva	Fxx,max [kNm]	Fyy,max [kNm]	Mxx,max [kNm/m]	Myy,max [kNm/m]
930	169.06	442.01	33.22	27.11
948	82.23	312.05	20.90	16.10
966	47.33	275.02	13.30	14.00
973.5	1220.16	554.39	31.33	10.41
984	83.65	472.14	4.49	2.56
1002	491.01	118.06	27.71	29.32

Tabella 14: Risultati della combinazione SLV.

Per eseguire la verifica si è scelto di prendere le sezioni trasversali e longitudinali. Per la sezione trasversale è stata presa 1 m di sezione curva, per quella longitudinale invece 1 m di sezione rettangolare.

Come azioni sono state prese le sollecitazioni F_{xx} e M_{xx} per la sezione trasversale, F_{yy} e M_{yy} per la sezione longitudinale. A Figura 200 e Figura 201 è riportata la verifica della sezione trasversale, mentre a Figura 202 e Figura 203 è riportata la verifica della sezione longitudinale.

Titolo: Verifica al metro sezione trasversale della pista

N° Vertici: 18 Zoom N° barre: 19 Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	-57,035	4,905
2	-43,338	-0,934
3	-29,053	-5,142
4	-14,381	-7,689
5	0,487	-8,542
6	15,354	-7,689

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	0,79	-53,4	7,6
2	0,79	-42,7	3,1
3	0,79	-31,6	-0,4
4	0,79	-20,2	-2,8
5	0,79	-8,7	-4,2
6	0,79	2,9	-4,5

Sollecitazioni
S.L.U. Metodo n

N_{Ed} 1220 0 kN
M_{xEd} 33,21 0 kNm
M_{yEd} 0 0

P.to applicazione N
☒ Centro ☐ Baricentro cls
☐ Coord.[cm] xN 0 yN 0

Tipo rottura
Lato calcestruzzo - Acciaio elastico

Materiali
B450C C32/38
ε_{su} 67,5 ‰ ε_{c2} 2 ‰
f_{yd} 391,3 N/mm² ε_{cu} 3,5 ‰
E_s 200.000 N/mm² f_{cd} 18,13 N/mm²
E_s/E_c 15 f_{cc}/f_{cd} 0,8
ε_{syd} 1,957 ‰ σ_{c,adm} 11,75 N/mm²
σ_{s,adm} 255 N/mm² τ_{co} 0,7067
τ_{c1} 2,057

M_{xRd} 73,91 kN m
σ_c -18,13 N/mm²
σ_s 341,9 N/mm²
ε_c 3,5 ‰
ε_s 1,71 ‰
d 24,65 cm
x 16,56 x/d 0,6718
δ 1

Tipo Sezione
☐ Rettan.re ☐ Trapezi
☐ a T ☐ Circolare
☐ Rettangoli ☒ Coord.
☐ DXF

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

Tipo flessione
☒ Retta ☐ Deviata

N° rett. 100
Calcola MRd Dominio M-N
L₀ 0 cm Col. modello
M-curvatura
☐ Precompresso

Figura 200: Verifica sezione trasversale.

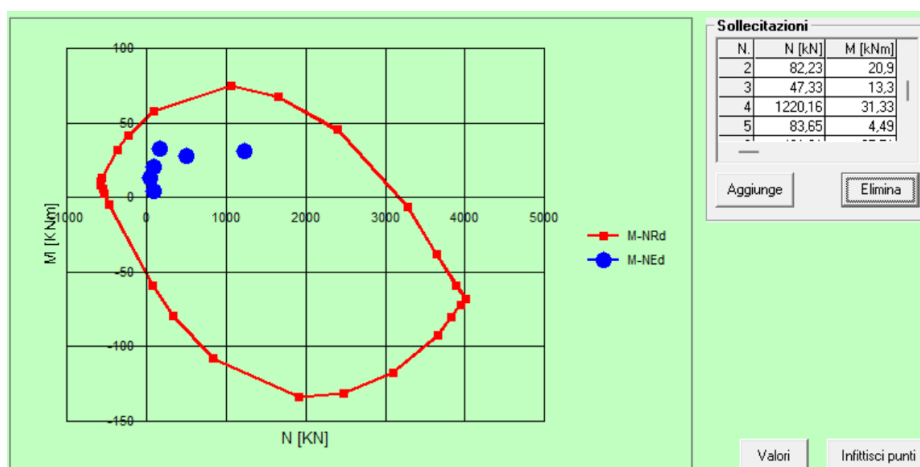


Figura 201: Verifica sezione trasversale, dominio M-N.

TITOLO : Verifica al metro sezione longitudinale della pista

N° Vertici4Zoom

N° barre16Zoom

N°	x [cm]	y [cm]
1	-50	8,5
2	50	8,5
3	50	-8,5
4	-50	-8,5

N°	As [cm²]	x [cm]	y [cm]
1	0,79	-46	4,5
2	0,79	-33,5	4,5
3	0,79	-21	4,5
4	0,79	-8,5	4,5
5	0,79	4	4,5
6	0,79	16,5	4,5

Sollecitazioni

S.L.U.

Metodo n

N_{Ed}442,01

M_{Ed}27,11

M_{yEd}0

0

0

0

Materiali

B450C

C32/38

ϵ_{su} 67,5‰

f_{yd} 391,3 N/mm²

E_s 200.000 N/mm²

E_s/E_c 15

ϵ_{syd} 1,957‰

$\sigma_{s,adm}$ 255 N/mm²

ϵ_{c2} 2‰

ϵ_{cu} 3,5

f_{cd} 18,13

f_{cc}/f_{cd} 0,8

$\sigma_{c,adm}$ 11,75

τ_{co} 0,7067

τ_{c1} 2,057

P.to applicazione N

Centro

Baricentro cls

Coord.[cm]

xN0

yN0

Tipo rottura

Lato calcestruzzo - Acciaio snervato

Metodo di calcolo

S.L.U.+

S.L.U.-

Metodo n

Tipo flessione

Retta

Deviate

N° rett.100

Calcola MRd

Domino M-N

L₀0 cm

Col. modello

M-curvatura

Precompresso

M_{xRd}56,16 kN m

σ_c -18,13 N/mm²

σ_s 391,3 N/mm²

ϵ_c 3,5‰

ϵ_s 6,81‰

d13 cm

x4,413

x/d0,3395

δ 0,8643

Diagramma

Figura 202: Verifica sezione longitudinale.

Sollecitazioni

N.	N [kN]	M [kNm]
1	442,01	27,11
2	312,05	16,1
3	275,02	14
4	472,14	2,56

Aggiunge

Valori

Infiltrisci punti

Figura 203: Verifica sezione longitudinale, dominio M-N.

142

ANALISI CRITICA DEI RISULTATI OTTENUTI DALLA

PARAMETRIZZAZIONE DEI MODELLI

Nel presente capitolo vengono analizzati i risultati ottenuti dal processo di parametrizzazione dei modelli BIM e FEM, descritto nel Capitolo Terzo. L'obiettivo dell'indagine è valutare l'efficacia e l'affidabilità del flusso di lavoro automatizzato sviluppato per la modellazione parametrica e l'analisi strutturale, applicato a una struttura caratterizzata da una superficie complessa: la pista da bob.

Durante lo svolgimento del lavoro sono stati approfonditi i seguenti aspetti chiave:

- **Individuazione dei dati di input:** per garantire un flusso di lavoro flessibile e adattabile a diversi progetti, è stato fondamentale selezionare un numero limitato ma significativo di parametri, privilegiando quelli in grado di rappresentare più varianti progettuali con semplici modifiche dei valori.
- **Efficienza del processo di modellazione automatica:** al fine di ridurre il lavoro manuale e ottimizzare i tempi di modellazione, il modello è stato concepito in modo da poter essere riutilizzato in contesti progettuali simili, evitando una struttura eccessivamente rigida legata al solo caso studio.
- **Conversione del modello BIM in modello FEM:** uno degli aspetti più critici riguarda l'interoperabilità tra modellazione BIM e analisi FEM. È stato pertanto esplorato un metodo che permettesse la trasformazione automatica della superficie curva in una mesh strutturale compatibile con software FEM, mantenendo una buona approssimazione della geometria reale.
- **Validità dei risultati ottenuti:** si è infine voluto verificare se i modelli generati automaticamente potessero essere considerati affidabili, coerenti e utilizzabili in modo flessibile rispetto al progetto reale.

Il punto di partenza del lavoro è stata l'individuazione e codifica dei principali parametri geometrici e tipologici che descrivono il tracciato della pista. Per semplificare l'analisi, si è scelto di lavorare su una porzione significativa del tracciato, studiandone nel dettaglio: la forma delle sezioni geometriche, la composizione delle componenti, la disposizione degli elementi costruttivi. Sono stati individuati i parametri comuni a tutta la pista, tali da poter rappresentare in modo efficace e coerente ogni punto del tracciato semplicemente modificandone i valori.

I **dati** così strutturati sono stati raccolti in formati tabellari (Excel o CSV), così da permettere anche a utenti esterni, non coinvolti direttamente nella scrittura degli script, di

fornire input ordinati e corretti. L'utilizzo di file Excel è risultato particolarmente efficace, grazie alla compatibilità diretta con Dynamo, che ne consente una lettura agevole tramite nodi dedicati.

L'estrazione dei dati è stata impostata in modo da fornire a Dynamo tutte le informazioni progettuali necessarie per la costruzione del modello. Il database dei parametri è stato importato tramite nodi di lettura file e utilizzato come input per la generazione automatica degli oggetti BIM. Questo approccio ha permesso un controllo centralizzato delle variabili progettuali, rendendo il modello completamente aggiornabile con la sola modifica dei dati di input.

La creazione degli **script** è stata organizzata per ambiti disciplinari, così da evitare la generazione di un unico modello troppo pesante e complesso, e garantire invece un controllo modulare ed efficiente.

Il primo script sviluppato ha consentito la generazione della geometria della pista, partendo dalla definizione del tracciato mediante curve guida e punti di riferimento. Da questi sono state costruite le sezioni trasversali, coerenti in termini di spessore, larghezza, altezza e curvatura, sia nei tratti rettilinei sia nelle curve. Il risultato è stato un modello fedele alla forma reale, ma parametrico e flessibile.

Per il posizionamento delle armature, sono stati sviluppati due script distinti, ciascuno riferito a una tipologia di sezione strutturale. A partire dalle forme individuate nei disegni progettuali, sono stati definiti i bordi e le leggi che regolano le proprietà delle armature (diametri, spaziature, copriferro, numero di barre, ecc.). Il procedimento è stato reso replicabile: una volta definito il primo elemento della serie, lo script è in grado di generare automaticamente tutte le armature simili, con possibilità di aggiornamento puntuale.

La parte impiantistica è stata modellata con un approccio simile a quello utilizzato per le armature, definendo regole di posizionamento, estensione e dimensionamento dei condotti tecnici. Anche in questo caso, la parametrizzazione ha garantito uniformità e facilità di aggiornamento.

Dall'applicazione di questo workflow sono emersi diversi vantaggi significativi:

- **Riduzione dei tempi di modellazione:** sebbene la scrittura degli script richieda una fase iniziale impegnativa, una volta sviluppato, il sistema consente di risparmiare tempo prezioso nelle fasi successive di aggiornamento e verifica.
- **Flessibilità progettuale:** grazie alla strutturazione modulare, alcuni elementi del modello sono stati facilmente riutilizzati in altri progetti o adattati a diverse situazioni con minime modifiche.
- **Aggiornamento automatizzato:** una delle principali criticità della modellazione manuale è la gestione delle modifiche. In questo caso, è stato possibile apportare cambiamenti globali semplicemente aggiornando i parametri iniziali e rieseguendo lo script, con un notevole risparmio di tempo ed errori

Tramite un ulteriore script Dynamo è stato possibile generare automaticamente un modello FEM a partire dalla geometria BIM della pista. Il procedimento si è basato su: l'estrazione automatica della superficie media del tracciato, la sua discretizzazione controllata in una mesh di elementi piani.

La generazione della mesh è stata governata da leggi geometriche personalizzabili, che permettono di calibrare il grado di dettaglio a seconda delle esigenze dell'analisi strutturale. Questo processo è particolarmente utile per strutture complesse, difficili da ricostruire manualmente: una volta modificata la geometria BIM, è possibile rigenerare in pochi istanti il modello FEM aggiornato.

Nonostante i risultati positivi, permangono alcune **criticità**:

- L'interoperabilità dal modello FEM verso il modello BIM non è stata affrontata nel presente studio. Il flusso è stato pensato in direzione unidirezionale (da BIM a FEM), ipotizzando che l'analisi strutturale venga effettuata solo su un modello già consolidato.
- Alcune informazioni, come materiali compositi o dettagli non strutturali, non vengono trasferite automaticamente, richiedendo semplificazioni o interventi manuali.

Tuttavia, la possibilità di evitare semplificazioni eccessive della geometria consente di ottenere risultati FEM più coerenti con il comportamento reale della struttura, migliorando l'affidabilità delle analisi.

In questo caso, il vantaggio, è quello di poter evitare una semplificazione eccessiva della superficie curva, e ottenere quindi dei risultati strutturali più coerenti con il caso reale.

L'automazione dei modelli BIM e FEM per la pista da bob ha mostrato risultati soddisfacenti in termini di:

- **Efficienza** nella generazione del modello;
- **Flessibilità** nella gestione delle varianti progettuali;
- **Aderenza ai dati strutturali** e fedeltà nell'analisi FEM.

Il workflow proposto rappresenta una base solida per ulteriori sviluppi in ambito infrastrutturale, in particolare per strutture complesse o a geometria variabile.

Modellazione parametrica in ambiente BIM integrato con analisi FEM di superfici complesse: test sul progetto di una Pista da Bob
Cicioni Benedetta

1 CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha avuto come obiettivo la sperimentazione di un flusso di lavoro automatizzato per la modellazione parametrica BIM e l'analisi strutturale FEM, applicato a una struttura complessa come la pista da bob. La metodologia adottata ha dimostrato come l'automazione, se ben pianificata, consenta di migliorare l'efficienza, la precisione e la flessibilità del processo progettuale, ponendo solide basi per futuri sviluppi in ambito infrastrutturale.

L'analisi si è concentrata su una porzione significativa del tracciato, individuando un insieme ridotto ma rappresentativo di parametri geometrici, strutturali e impiantistici. Questa selezione ha permesso di costruire uno script modulare e riutilizzabile, capace di adattarsi all'intero sviluppo della pista. Geometrie, armature e impianti sono stati vincolati in modo intelligente, così da aggiornarsi automaticamente a fronte di modifiche progettuali, garantendo sempre coerenza tra le varie discipline.

La modellazione automatica, basata su input da file Excel, ha consentito un controllo centralizzato del progetto, riducendo drasticamente i tempi di aggiornamento e la possibilità di errore. La costruzione di script dedicati per ciascuna componente del modello – geometria, armature, impianti – ha assicurato un approccio ordinato e flessibile, facilmente espandibile in funzione delle esigenze future. Ciò ha permesso di testare varianti progettuali con rapidità, simulare scenari alternativi e ottenere un livello di controllo che sarebbe stato difficilmente raggiungibile con una modellazione manuale.

Un ulteriore contributo è stato l'automatismo nella generazione del modello FEM, ottenuto a partire dalla superficie media della pista. Grazie alla definizione di regole geometriche e parametriche per la creazione della mesh, è stato possibile generare modelli strutturali affidabili e coerenti con la geometria reale, evitando eccessive semplificazioni. Questo ha portato a una maggiore attendibilità delle analisi dinamiche, rese possibili anche dalla significativa riduzione dei tempi di modellazione FEM.

I risultati delle simulazioni hanno mostrato come il carico dinamico indotto dal passaggio del bob possa in alcuni casi superare le sollecitazioni sismiche, mettendo in evidenza l'importanza di un'analisi dettagliata del comportamento strutturale. Il confronto tra queste due tipologie di carico ha offerto spunti interessanti per il dimensionamento e la verifica di sicurezza della struttura.

Nel complesso, il workflow proposto ha mostrato la validità dell'approccio basato

sull'automazione completa del modello BIM, non solo nella parte geometrica ma anche nelle armature, negli impianti e nell'esportazione verso l'analisi strutturale. Questa metodologia costituisce una base efficace per affrontare progetti infrastrutturali complessi, garantendo maggiore efficienza, qualità e capacità di adattamento. Le potenzialità espresse aprono la strada a future applicazioni, con possibilità di ampliamento del sistema a più tratti, discipline e strumenti, nell'ottica di una progettazione sempre più integrata, dinamica e digitale.

2 SVILUPPI FUTURI

Il lavoro svolto ha evidenziato diversi margini di miglioramento e possibili sviluppi futuri, tra cui:

- **Interoperabilità avanzata tra ambienti BIM e FEM**, con la possibilità di gestire un flusso bidirezionale: alle modifiche effettuate nel modello BIM corrisponderebbe un aggiornamento automatico del modello FEM, mantenendo vincoli e leggi di carico preimpostate. Allo stesso modo, eventuali variazioni nella definizione delle sezioni FEM potrebbero riflettersi direttamente sul modello BIM, garantendo una coerenza completa tra le due rappresentazioni.
- **Analisi termiche più dettagliate**, con la possibilità di integrare l'influenza delle variazioni di temperatura sulla struttura, nonché l'aggiunta di elementi specifici, come porzioni più articolate di sottostruttura o dettagli locali con comportamento non lineare.
- **Modellazione di armature più complesse**, includendo elementi costruttivi realistici come ganci, giunzioni, coperture in calcestruzzo e particolari di ancoraggio, con uno script parametrico capace di adattare anche questi dettagli ai cambiamenti geometrici.
- **Verifiche strutturali dirette** sul modello FEM generate sulla base della presenza effettiva delle armature modellate. Ciò permetterebbe di condurre controlli più realistici e mirati, integrando direttamente i risultati delle analisi nella fase di progettazione e dimensionamento.

Questi sviluppi renderebbero il flusso di lavoro ancora più potente e completo, rafforzando ulteriormente il legame tra modellazione digitale e verifica ingegneristica, in un'ottica di progettazione integrata e prestazionale.

- Autodesk. 2002. "Autodesk Building Industry Solutions – White Paper. Building Information Modeling."
- Autodesk. 2009. *Building Information Modeling for Mechanical, Electrical, and Plumbing Engineering*.
- Beach, Thomas, Ioan Petri, Yacine Rezgui, and Omer Rana. 2017. "Management of Collaborative BIM Data by Federating Distributed BIM Models." *Journal of Computing in Civil Engineering* 31(4):04017009. doi:10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000657/ASSET/0AE220E0-12FB-4F3A-8B3E-EF4E622148CC/ASSETS/IMAGES/LARGE/FIGURE8.JPG.
- Borkowski, Andrzej Szymon. 2023. "EVOLUTION OF BIM: EPISTEMOLOGY, GENESIS AND DIVISION INTO PERIODS." *Journal of Information Technology in Construction* 28:646–61. doi:10.36680/J.ITCON.2023.034.
- Braghin, Francesco, Federico Cheli, Mauro Donzelli, Stefano Melzi, and Edoardo Sabbioni. 2011. "Multi-Body Model of a Bobsleigh: Comparison with Experimental Data." *Multibody System Dynamics* 25(2):185–201. doi:10.1007/s11044-010-9218-7.
- Braghin, Francesco, Mauro Donzelli, Stefano Melzi, and Edoardo Sabbioni. 2011. "A Driver Model of a Two-Man Bobsleigh." *Sports Engineering* 13(4):181–93. doi:10.1007/s12283-011-0066-3.
- BS 8666. n.d. *BS 8666 - 2000*.
- Building SMART International. 2012. "Open BIM Program for Improved AEC Collaboration."
- Cheng, Jack C. P., Qiqi Lu, and M. Phil Student. 2015. *A REVIEW OF THE EFFORTS AND ROLES OF THE PUBLIC SECTOR FOR BIM ADOPTION WORLDWIDE/27* EDITOR: Ruikar K. *A Review of the Efforts and Roles of the Public Sector for BIM Adoption Worldwide*. Vol. 20.
- Computer and Design Services Limited. 2023. *GLOBAL CONSTRUCTION SOFTWARE AND SERVICES CADS REBAR EXTENSIONS for Revit® User Manual CADS Rebar Extensions for Revit®-Features CADS Rebar Extensions for Revit®-Features*.
- Eastman C. M., Eastman C. ., Teicholz P. ., Sacks R. ., Liston K. 2011. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. edited by John Wiley & Sons.
- FIBT. 2014. *International Bobsleigh Rules 2014*.
- Habte, Bedilu, and Eyosias Guyo. 2021. "APPLICATION of BIM for STRUCTURAL ENGINEERING: A CASE STUDY USING REVIT and CUSTOMARY STRUCTURAL ANALYSIS and DESIGN SOFTWARE." *Journal of Information Technology in Construction* 26:1009–22. doi:10.36680/j.itcon.2021.053.

- Januszkiewicz, Krystyna, and Karol G. Kowalski. 2020. "Modelowanie Informacji Budowlanych w Technologii BIM – Rola Modelu Parametrycznego." *Architecturae et Artibus* Vol. 12(4). doi:10.24427/AEA-2020-VOL12-NO4-02.
- Jayasena, Himal Suranga, Niraj Thurairajah, B. A. K. S. Perera, and Mohan Siriwardena. 2023. "Affordance-Led Framework of Understanding of BIM Adoption." *International Journal of Architectural Research: Archnet-IJAR*. doi:10.1108/ARCH-02-2023-0028.
- Jiang, Yishuo, Ming Li, Daqiang Guo, Wei Wu, Ray Y. Zhong, and George Q. Huang. 2022. "Digital Twin-Enabled Smart Modular Integrated Construction System for on-Site Assembly." *Computers in Industry* 136:103594. doi:10.1016/J.COMPIND.2021.103594.
- Khan, Ayaz, Samad Sepasgozar, Tingting Liu, and Rongrong Yu. 2021. "Integration of Bim and Immersive Technologies for Aec: A Scientometric-swot Analysis and Critical Content Review." *Buildings* 11(3).
- Kocatürk, Tuba, and Benachir Medjdoub. 2011. "The Effects of Integrated BIM in Processes and Business Models." *Distributed Intelligence in Design*. doi:10.1002/9781444392395.
- Komarova, Mariya. 2018. "World Bobsleigh Tracks: From Geometry to the Architecture of Sports Facilities." *Nexus Network Journal* 20(1):235–49. doi:10.1007/s00004-017-0348-6.
- Linderoth, Henrik C. J. 2010. "Understanding Adoption and Use of BIM as the Creation of Actor Networks." *Automation in Construction* 19(1):66–72. doi:10.1016/J.AUTCON.2009.09.003.
- MIDAS Information Technology Co., Ltd. 2023. "Midas Civil, On-Line Manual, Civil Structure Design System."
- Mössner, Martin, Michael Hasler, Kurt Schindelwig, Peter Kaps, and Werner Nachbauer. 2011. "An Approximate Simulation Model for Initial Luge Track Design." *Journal of Biomechanics* 44(5):892–96. doi:10.1016/j.jbiomech.2010.12.001.
- van Nederveen, G. A., and F. P. Tolman. 1992. "Modelling Multiple Views on Buildings." *Automation in Construction* 1(3):215–24. doi:10.1016/0926-5805(92)90014-B.
- Rotta, Stefano. 2010. "Rosso Ghiaccio : Eugenio Monti, Dietro La Leggenda." 168.
- Sharag-Eldin, Adil, and Nawari O. Nawari. 2010. "BIM in AEC Education." *Structures Congress 2010* 1676–88. doi:10.1061/41130(369)153.
- SmartCAE. 2025. "Analisi Strutturale Agli Elementi Finiti FEM."
- Turk, Žiga, Muammer Semih Sonkor, and Robert Klinc. 2022. "Cybersecurity Assessment of BIM/CDE Design Environment Using Cyber Assessment Framework." *Journal of Civil Engineering and Management* 28(5):349–364–349–364. doi:10.3846/JCEM.2022.16682.

Adhox S.r.l. 2025. "I 10 Principali Software Di BIM Authoring." <https://adhox.it/bim-authoring-software/>.

Anafyo Sagl. 2025. "Implementazione - Anafyo | BIM | Progettazione, Modellazione, Formazione | Ticino." <https://www.anafyo.com/implementazione/>.

Andrea Tognina. 2009. "La Pista Di Bob e Il Suo Mastro Costruttore." <https://www.swissinfo.ch/ita/vivere-in-svizzera/la-pista-di-bob-e-il-suo-mastro-costruttore/8174922>.

Autodesk. 2022. "Concetti Chiave Di Revit." <https://www.autodesk.com/support/technical/article/caas/tsarticles/ts/2FW860oEkPERJW7H7AnHdE.html>.

Autodesk Inc. 2014. "Help: Associating Family Parameters." <https://help.autodesk.com/view/RVT/2014/ENU/?guid=GUID-E2E6B19B-E47F-4F35-9F6D-1273A3248A50>.

Autodesk Inc. 2019. "Guida | Posizionamento Di Un'armatura | Autodesk." <https://help.autodesk.com/view/RVT/2019/ITA/?guid=GUID-7275163F-54C6-4684-99A5-7A61D7B1D061>.

Autodesk Inc. 2022. "Help | Families - Essential Skill | Autodesk." <https://help.autodesk.com/view/RVT/2022/ENU/?guid=GUID-7AEC5D66-C2E0-40E2-9504-3CC13781B87A>.

Autodesk Inc. 2023. "Help | Associate Family Parameters | Autodesk." <https://help.autodesk.com/view/RVT/2023/ENU/?guid=GUID-E2E6B19B-E47F-4F35-9F6D-1273A3248A50>.

Autodesk Inc. 2024. "Revit 2024 Help Documentation." <https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/ENU/?guid=GUID-03565843-BB48-4707-B54C-39D6E8E51880>.

Autodesk Inc. 2025a. "Help | Flex Pipe | Autodesk." <https://help.autodesk.com/view/RVT/2024/ENU/?guid=GUID-DA98A929-459F-4683-8F0D-A8FBE63BEA95>.

Autodesk Inc. 2025b. "Help | MEP Systems | Autodesk." https://help.autodesk.com/view/RVT/2025/ESP/?guid=Revit_API_Revit_API_Developers_Guide_Discipline_Specific_Functionality_MEP_Engineering_MEP_Systems_html.

Autodesk Inc. 2025c. "Help | Piping Systems | Autodesk."

<https://help.autodesk.com/view/RVT/2025/ENU/?guid=GUID-088920AF-95A0-4E0C-B53C-CA0B65E15D09>.

Autodesk Support. 2018. "Suggerimenti per La Creazione Di Famiglie Generiche."

<https://www.autodesk.com/it/support/technical/article/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ITA/Generic-Family-Creation-Tips.html>.

BetterPors. 2023. "Autodesk Revit MEP: Boost Your Design Workflow Careers."

<https://betterpros.com/careers/autodesk-revit-mep/>.

BIM Me Up. 2023. "Phases in Revit - BIM Me UP!" <https://bim-me-up.com/en/phases-in-revit/>.

Bugge, Jan Tore. 2019. "Description of Elements in Reinforcement - Settings, Rounding and Numbers." <https://blog.naviate.com/description-of-elements-in-reinforcement-settings-rounding-and-numbers>.

CSPFea. 2025a. "Caratteristiche Midas CIVIL - CSPFea - Progettazione Ponti e Infrastrutture."

<https://www.cspfea.net/prodotti/midas-civil/caratteristiche-midas-civil/>.

CSPFea. 2025b. "Midas CIVIL - CSPFea - Progettazione Civile Infrastrutturale."

<https://www.cspfea.net/prodotti/midas-civil/>.

Dynamo Development Team. 2024. "About | Dynamo." <https://primer2.dynamobim.org/>.

FISI, Federazione Italiana Sport Invernali. 2025. "Bob - FISI | Federazione Italiana Sport Invernali."

<https://www.fisi.org/bob>.

Guida Olimpiadi. 2011. "Bob – Regole."

http://www.guidaolimpiadi.it/index.php?option=com_content&view=article&id=341%3Abob-regole&catid=42&Itemid=277.

IBSF, International Bobsleigh & Skeleton Federation. 2025. "IBSF | International Bobsleigh & Skeleton Federation: About IBSF." <https://www.ibsf.org/en/inside-ibsf/about-ibsf>.

Modelical. 2023. "Revit Architecture - Modelical." <https://www.modelical.com/en/gdocs/revit-arc-best-practices/>.

Modelical. 2024. "Worksharing & Collaborative Work."

<https://www.modelical.com/en/gdocs/worksharing-collaborative-work/>.

Modelical. 2025a. "Adaptive Components - Modelical."

<https://www.modelical.com/en/gdocs/adaptive-components/>.

Modelical. 2025b. "Complex Families in Revit - Modelical."

<https://www.modelical.com/en/gdocs/complex-families/>.

Novatr. 2023. "Revit for Structure Design: A Complete Guide."

<https://www.novatr.com/blog/guide-on-revit-for-structure-design>.

Orbyta. 2023. "L'impatto Dell'Intelligenza Artificiale Sulla Progettazione BIM."

<https://orbyta.it/insights/limpatto-dellintelligenza-artificiale-sulla-progettazione-bim/>.

Stefano Antonelli. 2019. "Il Razionale Del BIM - Strumenti Authoring BIM Diversi Dai CAD Precedenti?" <https://www.iicbim.org/il-razionale-del-bim/>.

Today.it. 2024. "Sport: Come Funziona Il Bob." <https://www.today.it/benessere/fitness/bob-come-funziona.html>.

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 2: Posizioni e forme armature tratti rettilinei Curva Cristallo.....	66
Tabella 3: Posizioni e forme armature tratti in curva della Curva Cristallo.	67
Tabella 4: Dimensioni punti di contatto slitta-pista.	112
Tabella 5: Dati moto del 4-Men-Bob.....	113
Tabella 6: Altezza traiettoria Bob su 8 sezioni della Curva Cristallo.	115
Tabella 7: Inclinazione della perpendicolare alla superficie con asse x.....	119
Tabella 8: Nodi analizzati per parti della sezione.	125
Tabella 9: elementi analizzati per parti della sezione.	131
Tabella 10: Coefficienti di combinazione di carico.....	139
Tabella 11: Sollecitazioni carichi stati elementi parte centrale della sezione.	140
Tabella 12: Sollecitazioni carichi stati elementi parte superiore della sezione.....	140
Tabella 13: Sollecitazioni carichi stati elementi parte inferiore della sezione.	140
Tabella 14: Risultati della combinazione SLV.	140

INDICE ICONOGRAFICO

Figura 1: Eventi significativi nello sviluppo del BIM (Borkowski 2023).....	7
Figura 2: Periodizzazione del BIM per idea (Borkowski 2023).	8
Figura 3: Periodizzazione del BIM per approccio (Borkowski 2023).	9
Figura 4: Periodizzazione del BIM per cultura organizzativa (Borkowski 2023).....	10
Figura 5: Schematizzazione delle tipologie di elementi in Revit (Autodesk Inc. 2024). 12	
Figura 6: Gerarchia degli oggetti di Revit: categoria delle Structural Framing (Habte and Guyo 2021).....	13
Figura 7: Adaptive points.	17
Figura 8: Spline Through Points.	18
Figura 9: Solido da curva e sezioni.	18
Figura 10: Posizionamento armature.....	19
Figura 11: Free Form Rebar.	20
Figura 12: Esempio di Flex Pipe.....	22
Figura 13: Squadra svizzera di Bob da Davos, 1910 (Komarova 2018).....	50
Figura 14: Schema assi di rotazione del Bob (FIBT 2014).....	50
Figura 15: Dimensioni della slitta da regolamento (FIBT 2014).	51
Figura 16: Pista di bob di Altenberg, di Koenigssee, di Winterberg e di St. Moritz.	52
Figura 22: Rappresentazione planimetrica di un tratto di pista con indicazione della FL, della CL, delle Sx e delle Hx.	57
Figura 23: Rappresentazione in profilo di un tratto di pista con progressive e quote. .	58
Figura 24: Tipologie di sottostrutture.	58
Figura 26: Sezione tipologica in rettilineo (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.SZ.028_D).	59
Figura 27: Sezione tipologica in curva (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.SZ.028_D).	60
Figura 30: Planimetria della Curva Cristallo (CSC.S2.PE_PB.00_X.00_GN.PL.005_D)....	62
Figura 31: Profilo longitudinale - C11.1 (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.PR.001_D).	64
Figura 32: Profilo longitudinale - C11.2 (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.PR.002_D).....	64
Figura 33: Variazione graduale della sezione del corpo pista della curva	

(CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.SZ.001-012_D).....	65
Figura 34: Posizione dell'armatura per i tratti in rettilineo Curva Cristallo (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.SZ.028_D).....	66
Figura 35: Posizione dell'armatura per i tratti in curva Curva Cristallo (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_TR.SZ.028_D).....	67
Figura 36: Dettaglio costruttivo delle tubazioni secondarie (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_IR.SZ.001_D).....	68
Figura 37: Tipologico impianto refrigerante sezione (CSC.S2.PE_PB.00_X.00_IR.DT.001_D).....	69
Figura 38: Variazione graduale con impianti refrigerazione (CSC.S2.PE_PB.03_K.17_IR.SZ.001-012_D).....	69
Figura 39: Sezioni sottostruttura C11.1 a Sx=889m e Sx=891m (CSC.S2.PE_PB.01_H.02_ST.SZ.002_E).....	70
Figura 40: Viste 3D della sottostruttura C11.1 (CSC.S2.PE_PB.01_H.02_ST.PR.001_E).....	71
Figura 41: Vista 3D curva C11.2 (CSC.S2.PE_PB.01_I.04_ST.PR.001_E).....	71
Figura 42: Sezione impalcato C11.2 (CSC.S2.PE_PB.01_I.04_ST.PL.003_D).....	72
Figura 43: Prospetto e sezione di una pila generica C11.2 (CSC.S2.PE_PB.01_I.04_ST.SZ.001_D).....	72
Figura 44: Planimetria spalle dell'impalcato C11.2 (CSC.S2.PE_PB.01_I.04_ST.PL.002_D).....	73
Figura 45: Profilo longitudinale dell'impalcato C11.2 (CSC.S2.PE_PB.01_I.04_ST.PL.003_D).....	73
Figura 46: Famiglia adattiva del Profilo del concio in rettilineo.....	75
Figura 47: Parametri della famiglia del Profilo del concio rettilineo.	76
Figura 48: Famiglia adattiva concio rettilineo: a sinistra per P1 (inizio) e destra per P2 (fine).....	77
Figura 49: Creazione della famiglia adattiva del concio in rettilineo.	77
Figura 50: Parametri della famiglia del Concio in rettilineo.	78
Figura 51: Famiglia adattiva del Profilo del concio in curva.	79
Figura 52: Parametri della famiglia adattiva del Profilo del concio in curva.....	79
Figura 53: Famiglia adattiva concio in curva: a sinistra per P1 (inizio) e destra per P2 (fine).....	80
Figura 54: Creazione della famiglia adattiva del concio in curva.	80

Figura 55: Parametri della famiglia del Concio in curva.	80
Figura 56: Script Dynamo per la generazione della geometria del guscio.	81
Figura 57: Importazione delle coordinate della Curva Cristallo.	81
Figura 58: Suddivisione della curva in parti uguali.	82
Figura 59: Posizionamento dei conci rettilinei e in curva.....	82
Figura 60: Esportazione dei codici dei conci e importazione delle proprietà.	83
Figura 61: Proprietà geometriche dei conci.....	83
Figura 62: Assegnazione delle proprietà geometriche.....	83
Figura 63: Esempio concio in rettilineo e in curva.	84
Figura 64: Vista 3D dei conci rettilinei e in curva.	84
Figura 65: Vista 3D della geometria.	84
Figura 66: Script per armature longitudinali e trasversali dei conci in rettilineo.	85
Figura 67: Script per armature longitudinali e trasversali dei conci in curva.	85
Figura 68: Importazione del tracciato, dei conci e loro esplosione in facce.	86
Figura 69: Individuazione profili delle sezioni in P1, Pm e P2 conci in rettilineo.	86
Figura 70: Offset dei profili delle sezioni in P1, Pm e P2 conci in rettilineo.	87
Figura 71: Offset bordo faccia iniziale concio in rettilineo.....	87
Figura 72: Bordi con passo 10cm a sinistra, passo 12,5cm a destra conci rettilinei.	88
Figura 73: Curve per armatura longitudinale conci in rettilineo, parte 1.....	88
Figura 74: Curve per armatura longitudinale conci in rettilineo, parte 2.....	88
Figura 75: Curve per armature con spaziatura 10cm e 12,5cm, concio in rettilineo.	89
Figura 76: Curve per armature 10 Φ 10, concio in rettilineo.....	89
Figura 77: Posizionamento armature longitudinali conci in rettilineo.	89
Figura 78: Armatura longitudinale concio in rettilineo.	90
Figura 79: Offset bordo faccia iniziale concio in curva.....	90
Figura 80: Punti di applicazione delle curve.....	91
Figura 81: Vista 3D armature longitudinali concio in curva.	91
Figura 82: Creazione linea per Pos.2 e copia lungo il bordo concio in rettilineo.	92
Figura 83: Creazione curva per Pos.9 concio in rettilineo.....	92

Figura 84: Creazione Pos.3 destra e sinistra concio in rettilineo.	93
Figura 85: Creazione Pos.4 destra e sinistra concio in rettilineo.	93
Figura 86: Creazione Pos.5 destra e sinistra concio in rettilineo.	94
Figura 87: Creazione Pos.6 destra e sinistra concio in rettilineo.	94
Figura 88: Dettaglio armature concio in rettilineo.	95
Figura 89: Concio in rettilineo con armature trasversali.	95
Figura 90: Concio in rettilineo con armatura completa.	95
Figura 91: Creazione Pos.4 concio in curva.	96
Figura 92: Creazione Pos.5 concio in curva.	96
Figura 93: Creazione Pos.6 concio in curva.	97
Figura 94: Creazione Pos.8 concio in curva.	97
Figura 95: Creazione Pos.10 concio in curva.	98
Figura 96: Creazione Pos.11 concio in curva.	98
Figura 97: Creazione Pos.16 concio in curva.	98
Figura 98: Dettagli armatura trasversale concio in curva.	99
Figura 99 Concio in curva con armatura completa.	99
Figura 100: Script per posizionamento degli impianti di refrigerazione.	100
Figura 101: Individuazione bordi delle facce iniziale, finale e in mezzzeria.	101
Figura 102: Offset dei bordi delle tre facce.	101
Figura 103: Individuazione dei punti lungo i tre profili del concio.	102
Figura 104: Creazione dei punti di passaggio delle tubazioni.	102
Figura 105: Creazione delle tubazioni secondarie e dei collettori.	103
Figura 106: Vista 3D delle tubazioni, parte in curva, zona iniziale.	103
Figura 107: Vista 3D delle tubazioni, parte in curva, cona centrale.	104
Figura 108: Vista 3D delle tubazioni, parte in curva, zona finale.	104
Figura 109: Script per realizzazione mesh corpo pista.	106
Figura 110: Discretizzazione facce medie corpo pista.	106
Figura 111: Importazione del corpo pista.	107
Figura 112: Modello FEM del corpo pista.	107
Figura 113: Script per mesh della fondazione della sottostruttura.	108

Figura 114: Mesh fondazione sottostruttura C11.1 e impalcato C11.2.	108
Figura 115: Modello delle pile della sottostruttura.	109
Figura 116: Modello della pila, con sezione della pila e della testa.	109
Figura 117: Appoggi elastomerici e proprietà per l'impalcato in C11.2.	110
Figura 118: Molle alla Winkler per la curva C11.1.	110
Figura 119: Modello completo Corpo Pista e Sottostruttura.	110
Figura 120: Vincoli modello con sottostruttura.	111
Figura 121: Superficie di contatto slitta-pista (Braghin et al. 2011).	111
Figura 123: Inclinazione del Bob da risultante delle forze (Braghin, Cheli, et al. 2011).	113
Figura 124: Valori di velocità V lungo la Curva Cristallo.	114
Figura 125: Valori del Raggio di Curvatura R della Curva Cristallo.	114
Figura 126: Ciclo per ricerca angolo α	114
Figura 127: Altezza traiettoria su tutta la Curva Cristallo.	115
Figura 128: Calcoli per traiettoria e forza applicata alla pista.	116
Figura 129: Forza applicata alla Curva Cristallo.	116
Figura 130: Accelerazione normale in g applicata alla Curva Cristallo.	116
Figura 131: Accelerazione normale in m/s^2 applicata alla Curva Cristallo.	116
Figura 132: Esempio di azione dinamico alla progressiva x generica.	117
Figura 133: Risultante carico dinamico per quattro punti consecutivi.	117
Figura 134: Posizione 100 di applicazione del carico Bob.	118
Figura 135: Inclinazione β per tutta la Curva Cristallo.	119
Figura 136: Esempio di forza dinamica, componente y per il punto 44.	119
Figura 137: Applicazione del carico Bob dinamico ai 100 punti della traiettoria.	120
Figura 138: Time history load case.	120
Figura 139: Peso proprio $G1$	121
Figura 140: Peso ghiaccio Qg	121
Figura 141: Carico vento Vx	122
Figura 142: Carico vento Vy	122
Figura 143: Carico manutenzione Qm	122

Figura 144: Temperatura T+.....	123
Figura 145: Temperatura T-.....	123
Figura 146: Applicazione del carico stato del Bob (verticale a sinistra e perpendicolare a destra).	123
Figura 147: Spettro orizzontale di progetto.	124
Figura 148: Accelerogramma spettro-compatibile.....	124
Figura 149: Punti analizzati della pista: zona superiore, centrale e inferiore.	125
Figura 150: Carico Bob, spostamento DXYZ in corrispondenza del passaggio del Bob.	126
Figura 151: Carico Bob, spostamento DXYZ nella parte inferiore della sezione.	126
Figura 152: Carico Bob, spostamento DXYZ nella parte superiore della sezione.	127
Figura 153: Sisma, spostamento DXYZ nella parte centrale della sezione.....	127
Figura 154: Sisma, spostamento DXYZ nella parte inferiore della sezione.	128
Figura 155: Sisma, spostamento DXYZ nella parte superiore della sezione.	128
Figura 156: Carico Bob, accelerazione AXYZ in corrispondenza del passaggio del Bob.	129
Figura 157: Carico Bob, accelerazione AXYZ nella parte inferiore della sezione.	129
Figura 158: Carico Bob, accelerazione AXYZ nella parte superiore della sezione.....	129
Figura 159: Sisma, accelerazione AXYZ nella parte centrale della sezione.	130
Figura 160: Sisma, accelerazione AXYZ nella parte inferiore della sezione.	130
Figura 161: Sisma, accelerazione AXYZ nella parte superiore della sezione.....	130
Figura 162: Carico Bob, sforzo normale Fxx in corrispondenza del passaggio del Bob.	131
Figura 163: Carico Bob, sforzo normale Fxx nella parte inferiore della sezione.....	132
Figura 164: Carico Bob, sforzo normale Fxx nella parte superiore della sezione.	132
Figura 165: Sisma, sforzo normale Fxx parte centrale della sezione.	133
Figura 166: Carico Bob, sforzo normale Fyy in corrispondenza del passaggio del Bob.	133
Figura 167: Carico Bob, sforzo normale Fyy nella parte inferiore della sezione.....	134
Figura 168: Carico Bob, sforzo normale Fyy nella parte superiore della sezione.	134
Figura 169: Sisma, sforzo normale Fyy nella parte centrale della sezione.	135

Figura 170: Carico Bob, momento flettente M_{xx} in corrispondenza del passaggio del Bob.....	135
Figura 171: Carico Bob, momento flettente M_{xx} nella parte inferiore della sezione.	136
Figura 172: Carico Bob, momento flettente M_{xx} nella parte superiore della sezione.	136
Figura 173: Sisma, momento flettente M_{xx} nella parte centrale della sezione.....	137
Figura 174: Carico Bob, momento flettente M_{yy} in corrispondenza del passaggio del Bob.....	137
Figura 175: Carico Bob, momento flettente M_{yy} nella parte inferiore della sezione.	138
Figura 176 Carico Bob, momento flettente M_{yy} nella parte superiore della sezione.	138
Figura 177: Sisma, momento flettente M_{yy} nella parte centrale della sezione.....	139
Figura 178: Verifica sezione trasversale.....	141
Figura 179: Verifica sezione trasversale, dominio M-N.....	141
Figura 180: Verifica sezione longitudinale.	142
Figura 181: Verifica sezione longitudinale, dominio M-N.	142