

# **POLITECNICO DI TORINO**

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica  
(DISEG)

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile**

Tesi di Laurea Magistrale

**Applicazioni InfraBIM  
nelle Gallerie a Scavo a Meccanizzato**



**Relatrice:**

Chi.ma Prof.ssa Anna Osello

**Correlatrice:**

Dott.ssa Arianna Fonsati

**Candidato:**

Aldo Emanuele Lucente





## Abstract ■ ■

La metodologia BIM risulta particolarmente interessante nell'ambito della realizzazione di opere pubbliche, sia in termini di nuovo paradigma di progettazione che per le recenti disposizioni normative, si veda il DM 560/2017 cosiddetto Decreto BIM.

Nel campo delle infrastrutture, il BIM prende il nome di INFRABIM e racchiude diverse procedure a seconda dell'opera da realizzarsi.

Il lavoro della tesi si focalizza sulla metodologia BIM applicata alle gallerie a scavo meccanizzato: in particolare la realizzazione di un modello digitale del rivestimento di una galleria.

L'impiego del BIM offre diversi vantaggi tra cui la possibilità di VALUTARE diverse alternative progettuali, PIANIFICARE le fasi costruttive e RIDURRE gli errori di progettazione, incidendo sulla qualità e sui costi di realizzazione dell'opera nonché sulla sicurezza degli operatori durante la costruzione.

La prima parte della tesi illustra la modellazione BIM e come viene applicata nell'edilizia e nell'Ingegneria Civile, la seconda parte mostra come si può costruire un modello digitale della galleria impiegando software quali REVIT, INVENTOR e CIVIL 3D e infine nell'ultima parte si sviluppa un'analisi 4D con il software SYNCHRO.

L'intento è mostrare come applicare i processi BIM e la progettazione parametrica nel *Tunneling* piuttosto che una progettazione vera e propria del rivestimento della galleria.

La metodologia BIM nell'ambito infrastrutturale è in continua evoluzione, sebbene vi siano degli standard, tipo ISO 19650, che regolano lo scambio di informazioni e i contenuti di un modello BIM infrastrutturale, tale approccio è più consolidato nel settore edile e nell'Architettura, per cui la ricerca si sviluppa su più ambiti e coinvolge università, pubbliche amministrazioni e tutti gli attori della filiera costruttiva.

## Abstract

The BIM methods are increasing in interest above all for public works, because either its new design approach or several government regulations such as DM 560/2017 so called *Decreto Bim*.

In the field of infrastructure, BIM is called InfraBIM and it contains several procedures related to a specific work to be realized.

The aim of the thesis is to show how BIM methods are applied for mechanized tunnels, in particularly how to draw the digital model of the lining tunnels.

The use of BIM offers many advantages among which EVALUATING several design scenarios, PLANNING construction activities and REDUCING mistakes during design, improving quality and cost reducing of the work as well as the safety of workers during construction.

The first part of the thesis gives information about BIM methods, how is applied in building field and in Civil Engineering, the second part is about the digital model of the tunnel using software such as REVIT, INVENTOR and CIVIL 3D and in the end the in third part a 4D analysis is carried out with SYNCHRO software.

The general purpose is to show how to apply BIM methods and parametric design rather than a real design process of the tunnel lining.

BIM methods in infrastructures systems keep evolving, these are not largely diffused as in the building field, although ISO standards as ISO 19650 outline methods about the exchange format of information and graphical contents of a BIM model of an infrastructure, therefore the research has different aims and it involves universities, public sector and all stakeholders.

---

# Indice

---

<b>Introduzione .....</b>	<b>8</b>
<b>1 Metodologia InfraBIM .....</b>	<b>4</b>
1.1. Building Information Modeling .....	4
1.2. Dal BIM all' InfraBIM.....	9
1.3. Stato dell'arte Tunnel Information Modeling .....	13
<b>2 Modello digitale del rivestimento di una galleria a scavo meccanizzato.....</b>	<b>22</b>
2.1 Il rivestimento di una galleria a scavo meccanizzato .....	22
2.2 Dati di input .....	27
2.3 Modellazione BIM del tracciato .....	28
2.4 Modello parametrico di un anello universale.....	40
2.5 Il Posizionamento dell'anello nello spazio .....	50
2.6 Il Rivestimento definitivo di una galleria .....	52
<b>3 InfraBIM e simulazione 4D.....</b>	<b>62</b>
3.1 Introduzione .....	62
3.2 Modellazione InfraBIM e la Scomposizione WBS .....	63
3.3 Simulazione 4D .....	69
<b>Conclusioni.....</b>	<b>72</b>
<b>Bibliografia .....</b>	<b>73</b>
<b>Ringraziamenti.....</b>	<b>75</b>





---

## Introduzione

---

La realizzazione di grandi infrastrutture è un'operazione molto complessa e molte sono le figure che vi partecipano ognuno con le sue competenze apporta il proprio contributo, dando luogo ad un contesto multidisciplinare.

Con riferimento alle opere in Sotterraneo, la complessità aumenta in relazione al grado di incertezza in cui si opera, tanto da richiedere specifici modelli di gestione delle attività e delle informazioni anche per mitigare il rischio connesso alla realizzazione dell'opera.

Negli ultimi anni il settore *Architecture Engineering and Construction (AEC)* sta vedendo sempre di più adottata la metodologia BIM, riconoscendo a tale metodologia un importante strumento nella realizzazione di opere.

Nel mondo delle infrastrutture, il BIM prende il nome di InfraBIM e ha l'obiettivo di estendere la metodologia alle opere di Ingegneria Civile.

In questo lavoro è stata analizzato l'InfraBIM nell'ambito delle Gallerie a scavo meccanizzato, con l'obiettivo di mostrare le opportunità e le potenzialità che il BIM offre in tale settore.

In tal senso il lavoro è focalizzato sulla realizzazione di un modello digitale informativo di una galleria a scavo meccanizzato senza entrare nel merito della progettazione dell'opera, per cui l'impostazione del lavoro si basa su modelli e casi studi opportunamente semplificati al fine di mostrare le applicazioni del BIM.

Si fa riferimento a 2 applicazioni, la prima nella progettazione, la seconda nell'ambito della pianificazione e programmazione lavori, ispirandosi al senso comune che si ha del BIM: metodo e strumento che accompagna l'opera durante tutto il ciclo di vita della stessa, dalla progettazione, alla gestione e manutenzione, fino alla dismissione.

# 1 Metodologia InfraBIM

## 1.1. Building Information Modeling

Il settore delle costruzioni è in continua evoluzione, i progetti diventano via via più complessi e vi è una maggiore attenzione alla sostenibilità ambientale e alle ricadute che le grandi opere hanno sulla vita dei cittadini e sul territorio.

La tecnologia ha un ruolo fondamentale nel fronteggiare le sfide, quali una maggiore efficienza, riduzione dei costi e degli sprechi di materiali e opere sempre più green: in questo contesto la metodologia BIM diventa importante, basti pensare che le informazioni e, più in generale la grande quantità dei dati prodotta genera valore.

Diversi sono gli studi coinvolti in tal senso, mostrando quali sono i principali processi di innovazione nel settore AEC tra cui figura l'adozione del BIM.

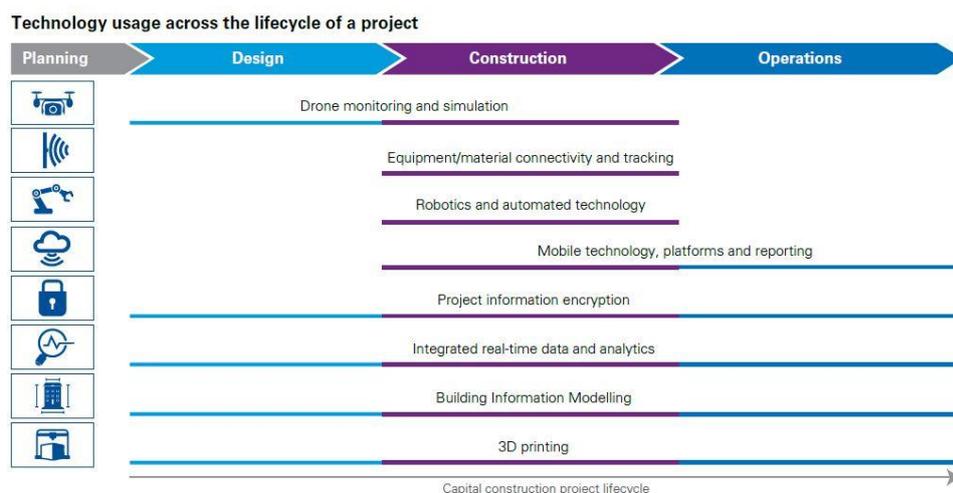


Figura 1.1.1 Innovazione nel settore AEC (Fonte: KPMG[1])

*'Building Information Modelling is digital representation of physical and functional characteristics of a facility creating a shared knowledge resource for information about it forming a reliable basis for decisions during its life cycle, from earliest conception to demolition.'*

Questa è la definizione che il NIBS dà del BIM, ovvero una rappresentazione digitale di caratteristiche fisiche e funzionali di un'opera contenente tutte le informazioni per potere prendere decisioni durante il ciclo completo dell'opera.

La rappresentazione digitale, o modello BIM deve essere concepito uno strumento condiviso con tutti gli attori da cui estrarre informazioni.

Dalla definizione si colgono due aspetti importanti, per primo il BIM non è una semplice rappresentazione 3D di un'opera, secondo, oggetto di tale rappresentazione può essere qualsiasi cosa ovvero un edificio, un impianto o una infrastruttura.

Gli elementi che compongono tale rappresentazione hanno una componente grafica 3D, una componente alfanumerica, costituita dagli attributi ed una componente parametrica che tramite regole ne consente la modifica.

Il *Building Information Modeling* definisce gli oggetti, tramite modellazione parametrica e li inserisce nel *Building Information Model* dell'opera da rappresentare: BIM è acronimo sia della modellazione che dell'output di tale attività ovvero il Building Information Model, ciò comporta che il BIM può essere visto come uno strumento di modellazione parametrica, come una piattaforma collaborativa e come un contenitore di informazioni dell'opera, ovvero una specie di *digital twin* dell'opera.

Un'altra caratteristica è dovuta alla condivisione, il modello deve costituire una base di conoscenze o di informazioni che aiutino le parti coinvolte a prendere decisioni sull'opera, per cui un modello BIM è uno strumento di progettazione prima e un contenitore di informazioni durante la costruzione e per la successiva manutenzione.

Nel corso degli anni, si sono consolidate diverse applicazioni che sfruttano la potenzialità del BIM, queste analisi sfruttano la geometria 3D e le caratteristiche fisiche degli oggetti a partire dalle informazioni del modello.

**Analisi 3D e *clash detection*:** attività che sfruttano le informazioni grafiche degli oggetti del modello e in che relazioni stanno fra di loro.

Il modello BIM deve contenere tutta la rappresentazione dell'opera, dalle opere civili fino agli impianti, per cui risulta necessario coordinare tutti le parti fra di loro per evitare conflitti, sovrapposizioni e vuoti.

Le attività di coordinamento e di *clash detection*, in genere sono fatte a partire dall'ambito progettuale, con appositi tool come Autodesk Naviswork, evitando la propagazione di questi errori nella fase di costruzione dell'opera, con evidenti benefici.

**Analisi 4D:** l'analisi consiste nell'aggiungere la variabile temporale a quella spaziale, e analizzare nello spazio e nel tempo tutte le attività di pianificazione e costruzione dell'opera, questo tipo di analisi, viene anche definita come pianificazione visiva, in quanto la pianificazione temporale viene correlata allo spazio e agli oggetti, in questo modo possono emergere ed essere corrette le interferenze tra le varie fasi costruttive e le attività di cantiere già nella fase progettuale.

Questo tipo di analisi diventa uno strumento utile per mostrare al committente la pianificazione delle lavorazioni per l'opera.

**Analisi 5D:** l'analisi si occupa dell'aspetto economico e quantitativo.

Nell'analisi 5D si sfruttano i parametri dimensionali degli oggetti per calcolare i costi e la quantità di manodopera e di materiali, formulando in maniera automatica i computi metrici per la fase di procurement.

**Analisi 6D:** L'analisi che fa riferimento alle fasi di consegna e messa in esercizio dell'opera e la sua manutenzione, in questa analisi il modello BIM raccoglie tutte le informazioni derivanti dalla costruzione dell'opera, agli impianti che possono essere rilevanti per le operazioni di manutenzione.

**Analisi 7D:** attività legata alle prestazioni e alle simulazioni d'uso dell'opera, in questa analisi si misurano tutti i fattori che determinano l'efficienza e la sostenibilità dell'opera tra cui consumi energetici, emissioni di CO<sub>2</sub>, condizioni di uso dell'opera [2].

Un modello BIM deve essere accessibile agli attori del processo, ognuno con le proprie competenze e in base al proprio ruolo estrae le informazioni necessarie dal modello per le proprie analisi e aggiungendone altre. Il requisito dell'interoperabilità ha spinto nel corso di questi anni alla realizzazione di uno schema o linguaggio, per tradurre il modello BIM in un formato di scambio libero, tale schema rappresenta l'*IFC*, *Industry Foundation Class*, che definisce come deve essere compilato un modello BIM in formato *ifc*.

L' *IFC* è uno schema promosso e rilasciato dalla Building Smart, una organizzazione no profit cui aderiscono tutte le principali Software house, soggetti istituzionali e privati che sono interessati alla diffusione del BIM.

Il formato *ifc*<sup>1</sup> è un formato di scambio open , e ad oggi è riconosciuto anche dalle stazioni appaltanti.

Il formato *ifc* consente a software terzi di poter aprire e leggere il modello BIM creato originariamente con software come Autodesk Revit, Graphisoft Archicad, Tekla Structures ecc. Grazie a questo formato di scambio, oggi sono diffusi diversi tool gratuiti, detti *bim viewer*, che consentono l'apertura e la visualizzazione del modello BIM in formato *ifc*, tra i più diffusi si citano la versione base di Solibri Model Viewer e BIMviewer, un visualizzatore completamente online.

Il formato di scambio *IFC* alla versione attuale *IFC 2x3*, può essere rilasciato sia nel formato *EXPRESS* che nel formato *ifcxml* sfruttando lo schema *XML*. L'*IFC* non è l'unico formato di scambio open, un altro standard per la consegna di modelli BIM è il formato *COBie*[2] promosso da Regno Unito e reso obbligatorio per la consegna di modelli BIM tra pubblico e privato.



Figura 1.1.2 Logo formato *ifc* (FONTE: BuildingSMART)

---

<sup>1</sup> Per maggiori informazioni, si visiti il sito [www.buildingsmart.org](http://www.buildingsmart.org)

Il BIM viene adottato in Europa a diversi livelli di maturità, i paesi più avanzati nell'adozione del BIM sono ad esempio quelli scandinavi, La Francia e La Germania che già adotta l'InfraBIM nelle commesse infrastrutturali.

Il Regno unito ha istituito delle commissioni specifiche nel 2015 [2] per delineare delle strategie per l'impiego de BIM, mosse soprattutto da due principali fattori:

- ridurre la spesa pubblica del 20 % nel settore delle costruzioni
- ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub>, in accordo con gli obiettivi sul cambiamento climatico.

Sono stati messi a punto degli standards e delle linee guida, che mostrano i livelli di adozione del BIM e stabiliscono come devono essere concepiti i modelli digitali delle opere, a tal scopo si citano le UNI EN ISO 19650:0, UNI EN ISO 19650:1, UNI EN ISO 19650:2, la cui impostazione viene adottata anche in Italia.

Anche l'Italia si è mossa in questa direzione con le recenti disposizioni normative, quali il DM 560/2017 cosiddetto Decreto Bim e il Codice dei Contratti Pubblici, si prevede l'obbligatorietà del BIM per opere di importo superiore ai 50.000.000 € nel 2020 ed estensione alle opere per tutti gli importi a partire dal 2025.

Ulteriori contributi sono stati apportati da ANAS e ITALFERR per l'adozione dell'InfraBIM in Italia, a tal proposito si cita il Capitolato Speciale BIM posto in allegato ai contratti di gare d'appalto ANAS, tale capitolato prescrive le modalità di restituzione di modelli digitali BIM *As-Built* delle infrastrutture. Alla luce di queste disposizioni, si rende necessaria una maggiore diffusione dell'impiego dell' InfraBIM nel settore AEC ed il mondo accademico, il Politecnico di Torino fra tutti, si sta muovendo per la formazione di figure con tali competenze.

## 1.2. Dal BIM all' InfraBIM

Le normative inerenti al BIM di fatto includono nella definizione del *Building Information Modeling* anche le infrastrutture e più in generale fanno riferimento ad una rappresentazione digitale di asset o di facility, piuttosto che a una determinata categoria.

La metodologia BIM è largamente diffusa nel settore delle costruzioni, mentre l'adozione nel contesto infrastrutturale è più lenta e meno diffusa, per diversi motivi tra cui l'intrinseca complessità delle opere di Ingegneria Civile.

Nel settore delle costruzioni esistono regole e *best practices* molto consolidate nell'industria nonché un'ampia gamma di software a tal scopo, basti pensare ai più popolari Autodesk Revit e Graphisoft Archicad. La metodologia BIM e i relativi software, ad esempio Revit, sono pensati per le opere a sviluppo prevalente verticale anche di notevole complessità, mentre vi sono delle limitazioni nella realizzazione di modelli digitali di opere infrastrutturali lineari.

Nel settore delle costruzioni è relativamente più semplice pianificare e determinare gli elementi e le attività di impiego nelle costruzioni: esistono soluzioni progettuali tipiche, classificazione degli elementi tecnologici, come la UNI 8290 che rendono di fatto più semplice gestire la realizzazione di un modello digitale.

Salvo casi particolari, tutti gli elementi tecnici di un edificio, dal mattone fino agli impianti sono prodotti omologati e standardizzati dalle diverse UNI per cui ben si prestano ad avere una formulazione parametrica.

La rappresentazione digitale di una infrastruttura è un'operazione difficile, sia per l'estensione, sia per gli elementi che la compongono, i quali non hanno forme definite, ma si devono adattare al terreno e all'asse, si pensi ad esempio ai movimenti terra per la formazione di un rilevato o gli scavi per una galleria.

Un'altra difficoltà è legata al territorio che ospita l'opera, per cui un modello InfraBIM deve essere flessibile per contenere gli aspetti morfologici del territorio e la stratigrafia del terreno per le opere in sotterraneo.

La modellazione InfraBIM deve essere in grado di cogliere tutti gli aspetti delle opere civili, anche per questo motivo, sono nate diverse discipline a seconda dell'opera, con l'obiettivo di adattare la metodologia BIM all'opera da realizzare, per cui si avrà BriM che si occupa dei ponti, il TIM *Tunnel Information Modeling* riferito alle gallerie e così via [3].

Ogni disciplina avrà l'obiettivo di formulare le regole per la consegna di un modello BIM completo e condivisibile.

Per quanto i modelli InfraBIM siano più complessi da realizzare rispetto agli analoghi per gli edifici, i vantaggi e i benefici compensano di gran lunga la difficoltà legate alla realizzazione degli stessi, riducendo i costi di una infrastruttura e il rischio ad esso legati: pianificare diversi scenari di costruzione dell'opera già nelle fasi iniziali di progettazione, riduce tutti gli errori che si riflettono nella fase di costruzione e che costringono cambi e rilavorazioni progettuali in corso d'opera.

Il modo di lavorare diventa più snello e agile, si possono offrire soluzioni progettuali più valide e più sostenibili che meglio corrispondono ai requisiti chiesti dal committente perché si ha una maggiore collaborazione tra le parti sin dall'inizio.

Per quanto riguardo i formati di scambio libero, lo schema *IFC* è nato nel settore delle costruzioni ed è diventato il formato di scambio più diffuso e accettato dagli enti pubblici, tuttavia allo stato attuale non è in grado di supportare completamente le opere di Ingegneria Civile.

Per le opere di Ingegneria civile vi sono già degli specifici schemi di formato libero, il più importante e più popolare per le opere lineari è il formato *LandXML*, mentre *CityGML* per il territorio [3].

Per questo motivo la ricerca sta lavorando su metodi per passare dagli oggetti rappresentati in formato *LandXML* a oggetti in formato *ifc*, in questo modo si potranno sfruttare tutte le applicazioni della modellazione BIM al mondo infrastrutturale, tra cui le più importanti: *clash detection* e pianificazione 4D. La Smart Building sta lavorando su specifici progetti di ricerca per formulare e rilasciare standards sui singoli schemi *IFC* per ogni opera di Ingegneria Civile.

Per le infrastrutture lineari, nei progetti di ricerca si stanno mettendo a punto delle proposte su come deve essere rappresentato l'asse stradale in formato IFC, da cui dipendono tutte le entità e le informazioni che compongono l'opera lineare, qualunque essa sia.

I traguardi significativi in termini di rilascio di standards sono prevalentemente pubblicazioni rilasciate sottoforma di bozze dal British Standard Institution, tra cui si citano *IFC-road* e *IFC-bridge*.

Fin qui si è detto, quali sono le problematiche relative all'InfraBIM e perché la diffusione è indietro rispetto alle costruzioni e quali sono le tematiche di ricerca aperte, per poter rappresentare le opere civili in ambiente BIM e sfruttarne le potenzialità.

Quello che si fa oggi in ambito professionale è di trasferire un progetto infrastrutturale in piattaforma BIM.

La software house Autodesk, ad esempio, ha 2 software di punta: Revit per la modellazione BIM e Civil3d per la progettazione infrastrutturale. Il passaggio diretto da una piattaforma all'altra è praticamente impossibile: Revit non riconosce ciò che è stato progettato in Civil3d, poiché non sono implementate le regole per definire gli oggetti infrastrutturali in entità BIM.

Per questo motivo, per non rinunciare alla modellazione BIM e poter sfruttare tutte le applicazioni e i tool dell'universo BIM, bisogna ricostruire il modello infrastrutturale in ambiente BIM.

La conseguenza è che tutti gli attributi di un oggetto infrastrutturale in Revit perde di significato, ad esempio una curva progettata con un software

stradale, diventa un'entità geometrica in Revit, perdendo la sua caratteristica funzionale che prima aveva: essere una curva stradale.

Il discorso non vale per tutte le opere, vi sono ad esempio alcune opere di Ingegneria Civile che possono essere progettate con un sistema ibrido, software di modellazione BIM e software progettazione infrastrutturale: ponti e viadotti costituiti da elementi prefabbricati o elementi strutturali di acciaio, si prestano bene ad una modellazione parametrica beneficiandone pure, perché già nella fase di progettazione si possono prevenire errori ed omissioni e conflitti tra le parti.

Un ulteriore beneficio si ha nel momento in cui l'opera è costituita da elementi standardizzati, che si ripetono uguali nello spazio o quando le operazioni ripetitive da fare sono molte: l'impostazione di regole parametriche rende il flusso di progettazione più efficiente riducendo gli errori di progettazione.

Un altro vantaggio è quello di poter creare più viste e tavole di un manufatto rendendo di fatto più semplice la comprensione del progetto dell'opera soprattutto se è in cemento armato.

### 1.3. Stato dell'arte Tunnel Information Modeling

L'uso del BIM nel settore delle gallerie a scavo meccanizzato è finalizzato a migliorare la fruizione dei dati per la progettazione e la gestione dell'opera. Vi sono già delle applicazioni nella progettazione e realizzazione dei lavori metropolitani dove la metodologia BIM viene impiegata principalmente per la modellazione di stazioni metropolitane e nella fase di progettazione e pianificazione dei lavori.

Il governo tedesco tramite il Ministero dei Trasporti e delle Infrastrutture Digitali ha lanciato dei progetti pilota per la graduale adozione del BIM nelle infrastrutture nella fase di progettazione e di esecuzione lavori: il primo progetto pilota è stato la *Galleria di Rastatt*, in cui il BIM è stato usato per la fase di progettazione e pianificazione[4].

L'InfraBIM nel contesto delle opere in sotterraneo, prende il nome di *Tunnel Information Modeling*.

Questa disciplina è riferita all'applicazione della metodologia BIM alle gallerie, più nel dettaglio si vuole definire in che modo si possa realizzare un modello digitale della galleria in grado di contenere le informazioni durante tutto il ciclo di vita dell'opera.

La modellazione BIM delle gallerie spazia dalla progettazione parametrica dell'opera alla organizzazione e gestione informatica di tutti gli oggetti e dati relativi ad una galleria, per cui la ricerca abbraccia settori per capire come il BIM può essere implementato per le gallerie a scavo meccanizzato.

I principali fronti di ricerca sono 3:

- modellazione BIM a supporto della progettazione
- Strategie e frameworks per la gestione del modello digitale delle gallerie
- interoperabilità e *IFC-tunnel*.

Ad oggi non esiste una procedura standard per realizzare un modello BIM del tunnel.

La ricerca in ambito BIM vuole dare una risposta alla seguente domanda: *Cosa deve contenere un modello BIM che sia rappresentativo delle gallerie?*

Le gallerie sono opere che coinvolgono diverse discipline per cui il modello BIM deve essere in grado contenere informazioni di tipo geotecnico strutturale, geologico, geometrico e in ambito impiantistico.

Nelle gallerie a scavo meccanizzato il processo costruttivo avviene tramite impiego di TBM e comporta un certo livello di rischio che viene monitorato con apposite metodologie di mitigazione.

La costruzione coinvolge team ultraspecialisti nella progettazione e costruzione del tunnel e professionalità generiche che si occupano di rilievo, indagini geognostiche, monitoraggio dell'opera e dell'ambiente, logistica di cantiere procurement e sicurezza.

Tutti i team collaborano in maniera intensiva di conseguenza si ottiene una grande quantità di dati nella fase di progettazione e altrettanto nelle misurazioni durante l'avanzamento della TBM nel sottosuolo.

I dati provenienti dall'attività della TBM, sono di qualunque tipo: comportamento strutturale della TBM, misurazioni del terreno, dello stato del rivestimento e dati relativi all'interazione macchina-terreno e relativi all'approvvigionamento materiale e vanno costituire il dataset della galleria a supporto dei team.

Per questo motivo esistono dei sistemi di Data Management interni ai team coinvolti nella costruzione.

In questo contesto la modellazione InfraBIM si pone l'obiettivo di mappare tutti i dati nello spazio, al fine di creare una connessione tra gli oggetti del *Tunnel Information Model* e i relativi dati.

Si cita un framework di come deve essere costruito e organizzato un modello BIM per le gallerie a scavo meccanizzato proposto da C. Koch, A. Vonthron ed M. Konig[4].

Secondo gli autori il TIM, tunnel information model, deve essere concepito come un *contenitore multilivello* in cui tutti i dati e gli oggetti sono ordinati e collegati tra di loro.

Il TIM è suddiviso in 4 sottodomini:

- Modello del rivestimento
- Modello del terreno
- Modello dell'ambiente costruito (su scala urbana) o del territorio
- Modello della TBM

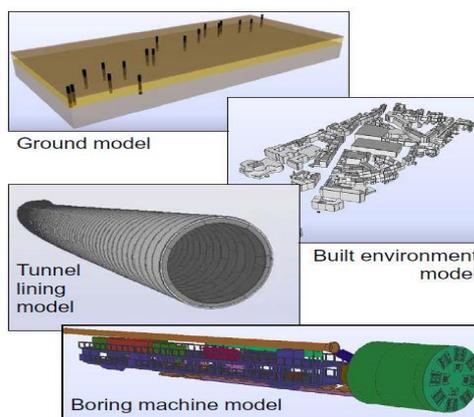


Figura 1.3.1 Tunnel Information Model (FONTE DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.07.006>)

Ogni sottodominio interagisce con gli altri e deve essere realizzato in modo da poter accedere ai dati raccolti nelle varie fasi.

Ad esempio, il Modello del rivestimento deve contenere tutti gli oggetti rappresentativi dei segmenti e le relative informazioni: posizionamento, stato fisico e strutturale dei conci ecc.

A differenza di un modello BIM, il TIM deve avere l'opportunità di acquisire i dati che via via vengono acquisiti soprattutto dalla TBM.

Un framework così organizzato prevede un approccio open che sfrutta le classi *IFC-tunnel* per poter navigare all'interno del modello, inoltre bisogna dotarsi di appositi *Model viewer* ovvero template che acquisiscano degli oggetti piuttosto che altri.

**• Il rivestimento della galleria**

Un aspetto fondamentale che rende difficoltosa la realizzazione di un modello BIM per il tunnel, è il grado di incertezza in cui si opera.

La sola fase di progettazione non è in grado di definire in maniera esaustiva i volumi di scavo e il successivo rivestimento: occorrono dei dati che vengono misurati al fronte di scavo man mano che la TBM avanza, per cui un modello di rivestimento non può essere realizzato in fase progettuale, ma durante la costruzione tramite acquisizione dinamica dei dati.

Nella fase progettuale, si indica la tipologia dell'anello e procede con un dimensionamento strutturale che tenga conto dell'interazione macchina-struttura e struttura-terreno.

Il posizionamento dei conci prefabbricati avviene in tempo reale sul retro della TBM che calcola una posizione ottimale in modo che il centro si discosti il meno possibile dall'asse teorico del tunnel.

Quindi il modello BIM del tunnel nella fase progettuale è una rappresentazione dello spazio che il rivestimento occupa nel sottosuolo ad un livello di dettaglio basso.

Il modello BIM del rivestimento viene via via raffinato, solo nella fase di restituzione dell'*As-Built*.

**• Il modello del terreno**

Il modello BIM deve essere in grado di rappresentare l'ammasso di terreno.

Una modellazione completa richiede una campagna di indagini geognostiche e geologiche sia per la caratterizzazione del terreno e per i parametri geomeccanici.

Il modello del terreno della sezione di scavo viene realizzato in corso d'opera durante l'avanzamento della TBM misurando i parametri tipici dello scavo. La restituzione del modello avviene in forma puntuale e in forma di superfici per rappresentare gli strati del suolo, insieme agli attributi che rappresentano i parametri geomeccanici.

### • Il modello TBM

Anche la fresa meccanica deve essere rappresentata e deve contenere tutti i parametri di controllo, ad esempio forza di spinta, coppia, tempo di scavo, di fermo nonché i dati di posizionamento (coordinate GPS),

Il sistema di monitoraggio delle pressioni e il sistema di trasporto del materiale scavato.

Il modello TBM diventa utile nella fase di simulazione delle sequenze di avanzamento, per la stima dei costi di mantenimento durante l'azionamento e nella fase iniziale di montaggio e di lancio della TBM.

### • Il modello del territorio

Il modello è una rappresentazione su scala urbana dell'ambiente costruito, tramite applicazioni GIS, il modello viene restituito in formato CityGML.

Il fine di questo modello è quello di geo-referenziare l'opera e le attività durante la costruzione della Galleria, inoltre può fungere da supporto per il monitoraggio per i cedimenti del terreno e degli edifici influenzati dallo scavo.

Un altro aspetto legato alla costruzione di un modello BIM delle Gallerie a scavo meccanizzato è la scelta dei giusti parametri e oggetti informatici che devono costituire il modello e i diversi livelli di dettaglio e sviluppo LOD che devono essere raggiunti.

Il modello BIM deve contenere tutte le informazioni utili e significative che non siano ridondanti.

Nella fase di pianificazione dei lavori e di logistica di cantiere il modello BIM può avere un livello di rappresentazione sufficiente a cogliere gli spazi e i volumi in gioco, per cui un modello molto raffinato potrebbe essere inutile allo scopo.

Ciò comporta che devono essere stabilite a monte delle regole di rappresentazione degli oggetti e fissare il livello di dettaglio più idoneo in base all'output che si vuole ottenere e al tipo di analisi che si vuole effettuare.

Oppure, se si deve eseguire un'analisi *clash detection* tra le interferenze e le attività di una galleria, è sufficiente conoscere la posizione e l'ingombro dei conci prefabbricati, mentre se si deve simulare l'accostamento dei conci

prefabbricati sono necessarie perfino le posizioni relative dei connettori e verificare che le tolleranze siano rispettate.

La scelta del livello di dettaglio LOD non è unica per un oggetto, per cui il modello BIM può avere più livelli di sviluppo

Questi due esempi, mostrano che un oggetto del BIM può avere diversi LOD a seconda dell'analisi e che occorre quindi un modello multi-scala.

La rappresentazione multi-scala viene applicata alla restituzione digitale del territorio in modelli GIS e consiste nel realizzare oggetti a più scale o livelli di sviluppo LOD e memorizzarli in maniera separata nel GIS [ 6].

L'idea del modello multi-scala viene adattato nel settore delle infrastrutture così da avere diversi livelli di visualizzazione dello stesso oggetto a seconda dell'applicazione.

La memorizzazione di entità di diversi livelli di dettaglio non è idonea per le infrastrutture, in quanto gli oggetti non sono statici, ma si modificano o se ne acquisiscono ulteriori durante le varie fasi, per cui le modifiche ad un oggetto non si riflettono in automatico a tutte le scale di rappresentazione.

La modellazione BIM infrastrutturale consente un approccio multi-scala degli oggetti preservando le loro caratteristiche a tutti i livelli di dettaglio, ciò si ottiene costruendo e salvando le relazioni logiche che vi sono tra una rappresentazione ad un determinato LOD e la sua successiva.

Il vantaggio di un modello multi-scala, può essere quello di propagare le modifiche lungo i livelli di dettaglio: se ad esempio nella fase di progettazione definitiva si varia la posizione del tracciato, questa variazione viene aggiornata a tutti gli altri livelli, consentendo una maggiore flessibilità nelle fasi decisionali della progettazione.

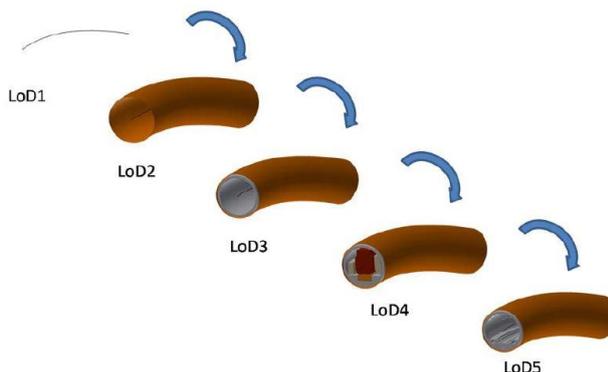


Figura1.3.2 Modellazione Multi-scala lungo i LOD (FONTE DOI:  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2014.07.005>)

Borromann e Jubier [7] hanno proposto che un modello BIM oltre all'oggetto finale, si dovessero avere anche le sequenze delle procedure geometriche per ottenerlo: gli oggetti vengono concepiti secondo delle regole di geometria procedurale e di modellazione parametrica.

I modelli vengono detti procedurali, in quanto oltre all'output si conserva la storia di costruzione dell'oggetto stesso.

Se si deve rappresentare una porzione di rivestimento, oltre al componente stesso si salvano tutte le procedure geometriche ordinate per ricostruire il componente: il piano contenente lo sketch della sezione, la linea d'asse e l'operazione geometrica di *Sweep* dello sketch sulla linea d'asse.

Si può usare il software Autodesk Inventor per la modellazione parametrica e procedurale dei componenti impostando successive lavorazioni geometriche di superfici, linee e volumi.

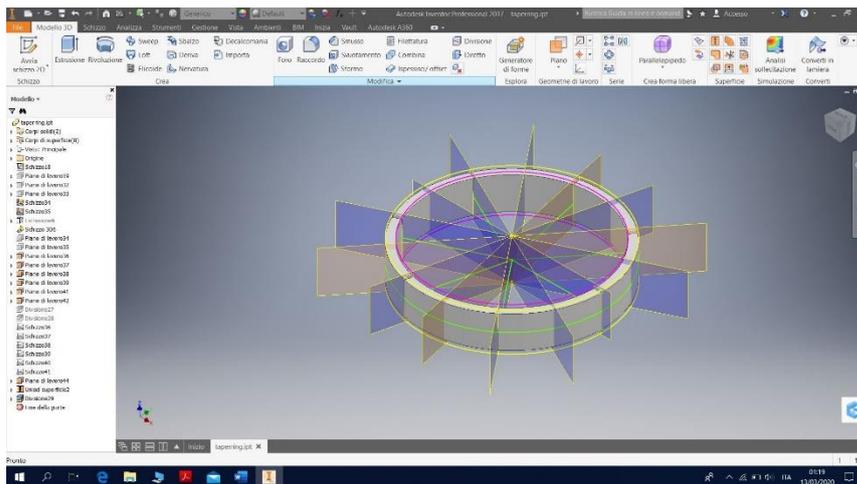


Figura 1.3.3 Modellazione Parametrica e procedurale su INVENTOR

Le proposte di modellazione BIM delle gallerie fanno uso di un livello di BIM avanzato e secondo un approccio open di interoperabilità.

Il Tunnel information model di gallerie a scavo meccanizzato è concepito per immagazzinare e gestire una grande quantità di oggetti da richiedere l'impiego di database tipo BIMServer e un formato di scambio libero, tipo IFC-tunnel.

In questo modo gli utenti, si connettono al Server, tramite applicazioni Server/Client e visualizzano gli oggetti con apposite *Model View Definition*.



Figura 1.3.6: BIM Server (FONTE: BIMServer.org)



---

## 2 Modello digitale del rivestimento di una galleria a scavo meccanizzato

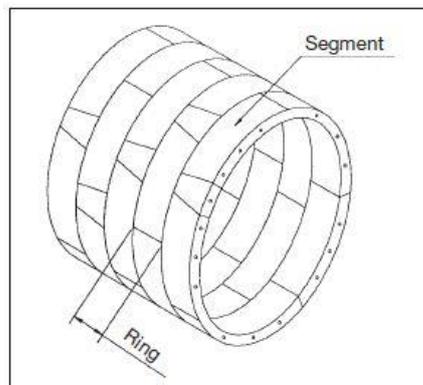
---

### 2.1 Il rivestimento di una galleria a scavo meccanizzato

Obiettivo di questo lavoro è quello di simulare un processo BIM per costruire un modello digitale del rivestimento di una galleria a scavo meccanizzato.

Qui di seguito una introduzione sulla geometria degli anelli e il loro impiego che hanno influito sulla modellazione BIM.

Il rivestimento di una galleria a scavo meccanizzato con TBM è costituito da anelli messi in sequenza, generalmente si impiegano anelli ottenuti assemblando conci prefabbricati in cemento armato.



*Figura 2.1.1 Rivestimento definitivo di anelli prefabbricati (FONTE: AFTES Recommendations for the design, sizing and construction of precast concrete segments installed at the rear of a tunnel boring machine TBM)*

Gli standards costruttivi [8] prevedono l'impiego di tre tipologie di anelli:

- Anelli dritti
- Anelli trapezoidali, sistema *left and right*
- Anelli conici universali (*universal tapered ring*)

Nel primo caso gli anelli hanno le facce trasversali piane e parallele, formando un tronco di cilindro, questi anelli hanno la lunghezza di 2 m, vengono impiegati per traiettorie rettilinee.

L'anello trapezoidale ha una faccia ortogonale all'asse, l'altra faccia è inclinata e forma un angolo  $\alpha$  con la prima, ve ne sono due tipi che viaggiano in coppia, anello destro e anello sinistro a seconda della faccia inclinata.

Per formare una traiettoria rettilinea, si accostano alternativamente anello destro e sinistro.

Per seguire l'asse del tunnel, occorrono sia anelli dritti sia anelli trapezoidali a seconda delle curve da seguire lungo il tracciato col vantaggio di avere la posizione del concio di chiave sempre in alto o in basso.

Gli anelli universali hanno entrambe le facce inclinate rispetto all'asse dell'anello formando un angolo  $\alpha$ , la forma dell'anello è tronco-conica, l'angolo alfa è legato al parametro conicità, *taper*, pari alla differenza tra la base minore e maggiore.

La geometria dell'anello universale consente di adattarsi alla curvatura planimetrica e verticale del tracciato che si vuole costruire, per cui è sufficiente un solo tipo di anello per tutto il tracciato del tunnel, impiegando uno solo tipo di stampo.

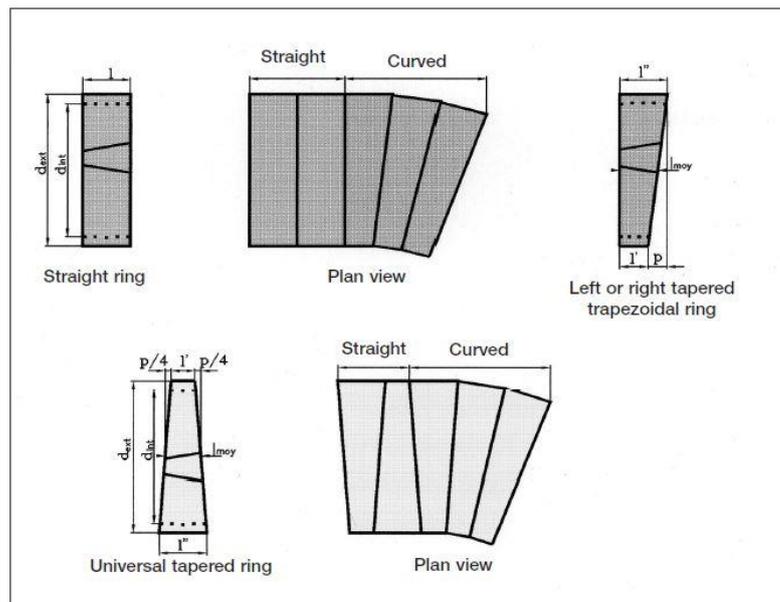


Figura 2.1.2 Anelli prefabbricati per il rivestimento (FONTE: AFTES Recommendations for the design, sizing and construction of precast concrete segments installed at the rear of a tunnel boring machine TMB)

Il parametro *taper* si calcola in base al raggio di curvatura minimo che si vuole raggiungere, che dipende dall'asse teorico del tunnel [9].

$$k = \frac{D_{out} b_m}{0.8R_{min}}$$

- k parametro *taper*
- $D_{out}$  diametro esterno dell'anello
- $b_{min}$  larghezza media dell'anello
- $R_{min}$  raggio di curvatura minimo del tracciato

Per avere una traiettoria rettilinea, si ruota di 180 ° un anello rispetto al precedente, lo svantaggio del sistema universale è che lungo il tracciato il concio di chiave può essere disposto in qualunque posizione angolare.

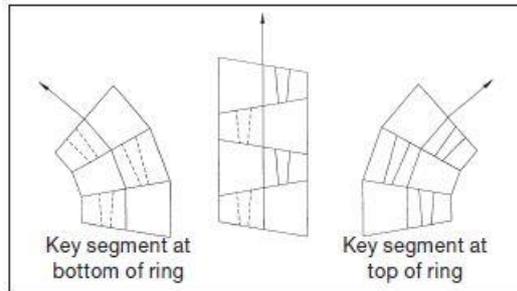


Figura 2.1.3 Sequenza di anelli universali (FONTE: AFTES Recommendations for the design, sizing and construction of precast concrete segments installed at the rear of a tunnel boring machine TMB)

La scelta del tipo di anello e il dimensionamento geometrico ricade sull'impresa, sulla base di progetti precedenti o test su tronchi di tracciato.

L'anello è composto da conci, di cui uno è il concio di chiave che viene inserito per ultimo per chiudere l'anello.

Il collegamento tra un anello e il successivo, avviene tramite connettori, disposti lungo la circonferenza media dell'anello, generalmente 2 o 3 per ogni concio.

Le configurazioni angolari  $\theta$  dell'anello attorno al proprio asse è pari a:

$$\theta = i \frac{360}{n} \quad i = 0 \dots n, \quad n = \text{numero connettori}$$

al fine di evitare che dei giunti longitudinali tra due anelli consecutivi siano allineati, le rotazioni seguono la matrice di posizione, che indica i collegamenti compatibili tra i connettori

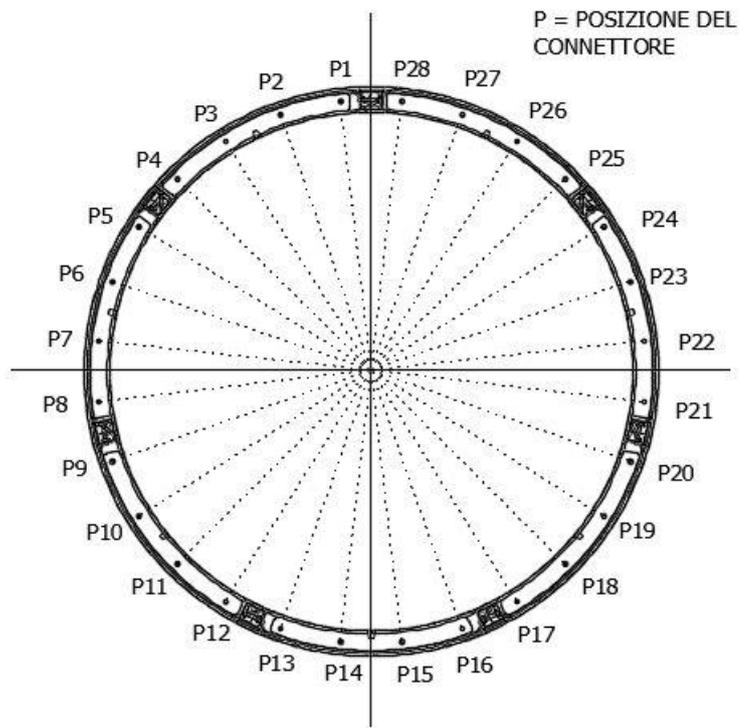


Figura 2.1.4 Anello Prefabbricato (FONTE [10])

Con riferimento alla figura, per la posizione P1 sono compatibili le seguenti posizioni

$$P1 = \{P2, P3, P4, P6, P7, P8...\}$$

e così via per ogni altra posizione.

Il montaggio degli anelli lungo il tracciato della galleria avviene sul retro della fresa, che calcola la posizione ottimale in tempo reale.

Il rivestimento costruito anello per anello segue una sua traiettoria il più possibile vicina al tracciato teorico del tunnel.

La TBM elabora tutte le misure al fronte di scavo e calcola delle traiettorie da seguire ed eventuali correzioni dovute a cedimenti e posizionamento macchina.

Avere un modello BIM del rivestimento, in maniera preliminare permette di simulare la sequenza degli anelli, mentre nella fase di costruzione costituisce un punto di riferimento per tutti i processi di *quality control* e *quality assurance* durante il montaggio degli anelli, ad esempio, si possono ricostruire tutte le variazioni, lo stato fisico degli anelli, gestire le non conformità, prescrivere interventi e riparazioni in corso d'opera dei conci.

L'obiettivo del seguente lavoro di tesi ha visto la definizione di un confronto tra tracciato teorico e reale, al fine di calcolare, fin dalla fase di progettazione, il tracciato più verosimile per il posizionamento dei conci da parte della TBM.

Per la costruzione del tracciato si è fatto uso dei seguenti software:

- REVIT: software per la modellazione BIM, per la realizzazione del modello;
- DYNAMO: plug in di REVIT per la programmazione visiva, consente la lettura di file, esecuzione degli script ed eseguire operazioni automatiche su Revit.
- CIVIL 3D: Software per l'estrazione del tracciato del tunnel;
- INVENTOR: software di modellazione parametrica di oggetti di dettaglio;
- PYCHARM: Ambiente di programmazione per esecuzioni di script Python.

L'implementazione della metodologia segue gli step mostrati nel workflow:

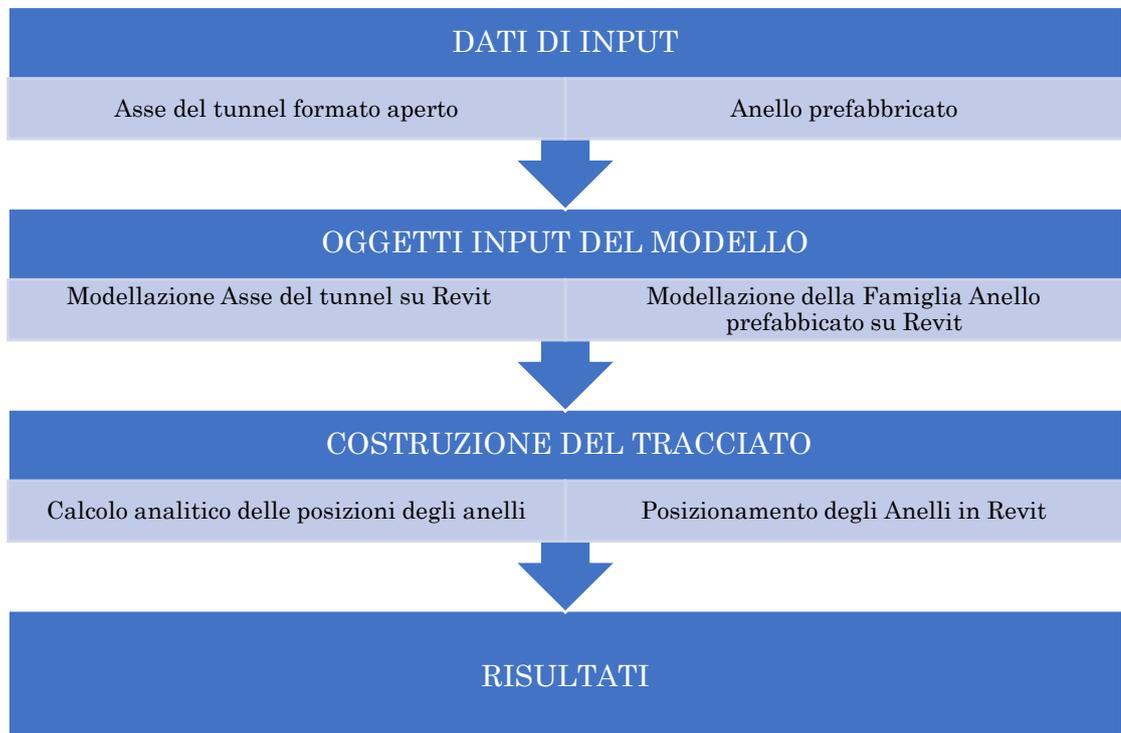


Figura 2.1.5 Workflow

## 2.2 Dati di input

Per costruire il modello del rivestimento digitale, i dati di input sono rappresentati da: un asse del tunnel generico e la sezione di un anello standard.

```
- <Curve length="1282.36061845951" radius="1500.0" crvType="arc" chord="1243.66442385178" rot="ccw">
  <Start>6573038.09620066 145037.126864105</Start>
  <Center>6573379.68141261 143576.538098237</Center>
  <End>6574257.53166123 144792.835323832</End>
</Curve>
```

Figura 2.2.1: Estratto di un tracciato in input, formato file LandXML

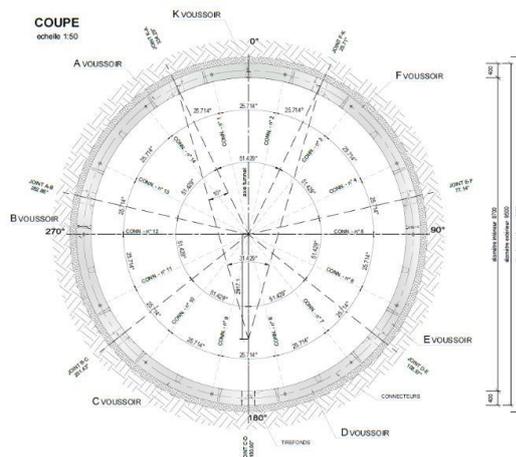


Figura 2.2.2: Sezione standard

Come è stato detto nel primo capitolo l'asse viene progettato con dei software di progettazione stradale, come Civil3D e successivamente viene riportato sul software di modellazione BIM Revit, non essendoci un passaggio diretto da Revit a Civil3d, bisogna ricostruirlo.

Una volta ricostruito il tracciato, si crea il modello dell'anello sulla base della sezione della galleria.

Si farà uso di Dynamo per collegare Revit a Civil3D e Inventor per la costruzione dell'anello.

## 2.3 Modellazione BIM del tracciato

Per modellare un tracciato occorre questo che sia leggibile in un formato libero, per questo motivo il primo passo è convertire il tracciato in formato *LandXML*.

Il formato *LandXML* è il formato libero di scambio per le opere infrastrutturali,

Il file è a tutti gli effetti un file *xml*, per cui può essere aperto con un qualsiasi Browser tipo Internet Explorer.

Il tracciato si presenta, non più nel formato proprietario del software, ma un file contenente tutte le entità che vanno a comporre il tracciato.

Tali entità rappresentano le tipologie di elementi stradali che compongono l'asse:

rettifili, curve a raggio costante, curve di transizione, livellette e raccordi verticali.

Ogni elemento contiene tutte le informazioni necessarie per poterlo ricostruire geometricamente.

La struttura del tracciato è ad albero e ogni nodo contiene altri elementi detti *children*, si individuano 3 parti:

- Tipo di file, versione dello schema
- Dati di identificazione, tipo nome dell'opera, unità di misura, autore
- *Alignments*

Gli *alignments* sono i nodi contenenti i tracciati, da una progressiva chilometrica ad un'altra, ciascun alignment, tradotto in allineamento, a suo volta è suddiviso in una struttura ad albero di cui si riporta uno schema.

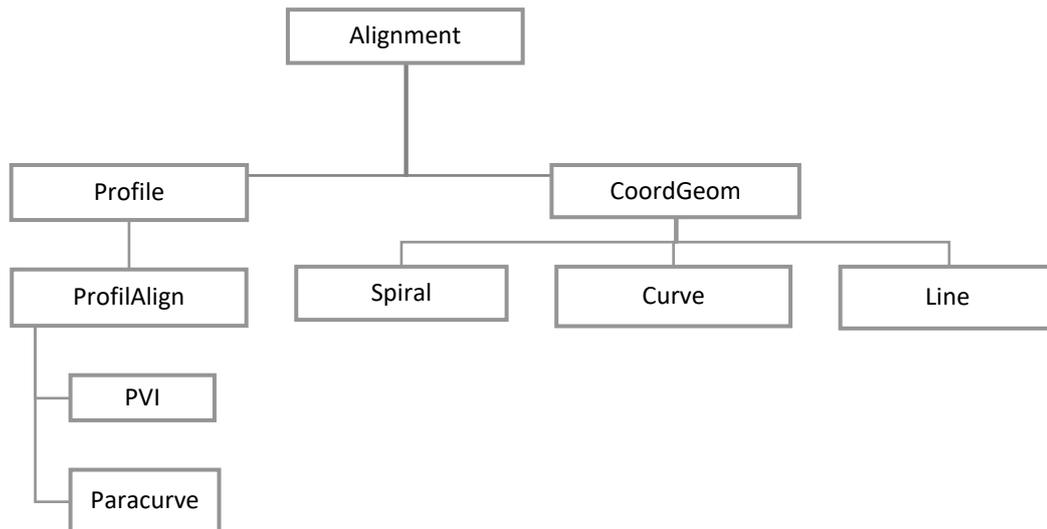


Figura 2.3.1 Struttura ad albero di un alignment e i relativi nodi

L'asse viene diviso nel tracciato planimetrico e profilo longitudinale.

Sotto il nodo *<CoordGeom>* vi sono i rettifili, le curve e le clotoidi che compongono il tracciato e analogamente sotto il nodo *<ProfilAlign>*, vi sono i punti per inserire le livellette e i raccordi verticali.

Un qualsiasi software di progettazione stradale estrae gli oggetti dall'Alignment e tramite un algoritmo ricostruisce il tracciato ricomponendo gli oggetti.

Revit non implementa gli algoritmi per ricostruire il tracciato, per cui bisogna importare la geometria tramite punti.

Gli elementi nel formato *LandXML* sono delle stringhe contenenti informazioni: ogni oggetto è costruito semanticamente tramite un tag e degli attributi numerici per le dimensioni, per questo motivo Revit non è in grado di ricostruire il tracciato, poiché non ha questa associazione oggetto/ tag:

```

<Curve length="38.8052669913268" radius="869.998804881993" crvType="arc"
chord="38.8020502756723" rot="ccw">
  <Start>6572913.375947 145000.227981</Start>
  <Center>6573217.6490726 144185.172286257</Center>
  <End>6572950.02111379 145012.984581503</End>
</Curve>
  
```

Figura 2.3.2 Rappresentazione semantica di un arco di curva

Un software stradale tramite il tag <Curve>, riconosce che deve costruire una curva circolare di determinata lunghezza e raggio R, passante per i punti di inizio e fine ed avente un determinato centro e così via per gli altri elementi. Per la rappresentazione del tracciato, vi sono due alternative: si costruisce analiticamente il tracciato calcolando i punti, oppure tramite Civil3D si calcolano i punti sul tracciato e successivamente si importano come coordinate di punti su Revit.

Qualunque sia il metodo, il risultato è che su Revit il tracciato viene rappresentato come una nuvola di punti uniti da *splines* o da *polilinee*.

Estrazione dei punti da Civil3D:



Figura 2.3.3 Procedura di esportazione da Civil3D a Revit

Si importa il tracciato in CIVIL3D, come rappresentato qui sotto:

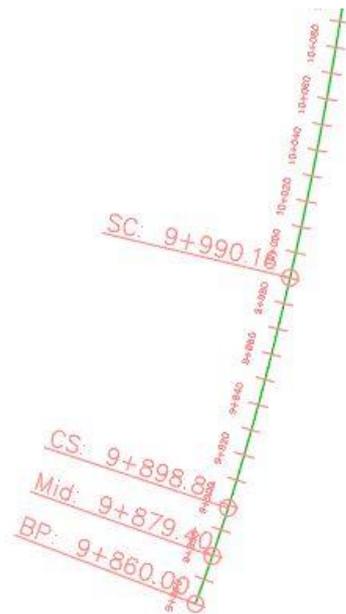


Figura 2.3.4 Stralcio planimetria del tracciato

Si suddivide il tracciato in punti ad un passo costante e pari a 2 m



Figura 2.3.5 Stralcio planimetrico con i punti calcolati automaticamente

A questo punto si esportano i punti in un file *LandXML*, in cui si riportano le coordinate del punto all' interno del tag *<CGPoint>* numerato in ordine crescente in base alla progressiva:

```
<CGPoint name="1">6572913.375947000459 145000.227981000004 </CGPoint>
<CGPoint name="7">6572915.250443182886 145000.92530612374</CGPoint>
<CGPoint name="8">6572917.126537458971 145001.618320216134</CGPoint>
<CGPoint name="9">6572919.004219913855 145002.307019614789</CGPoint>
<CGPoint name="10">6572920.883480625227 145002.991400680097</CGPoint>
<CGPoint name="11">6572922.764309662394 145003.671459795325</CGPoint>
```

Figura 2.3.6 Punti del tracciato in formato *LandXML*

Il file contenente i punti viene letto da *Dynamo* che importa i punti su *Revit*. Ed una polilinea che li unisce

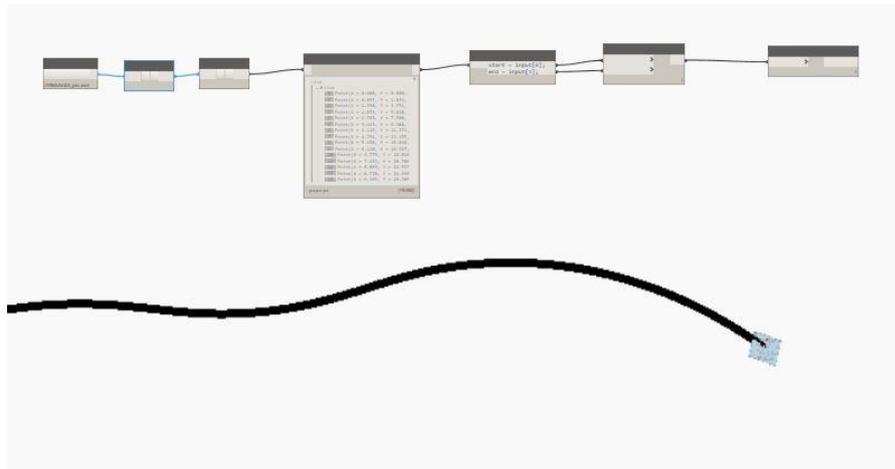


Figura 2.3.7 Lettura punti in Dynamo

Il metodo proposto presenta dei limiti, in primo luogo dal punto di vista concettuale: si passa da un asse ad un tracciato rappresentato per segmenti. In secondo luogo, il software ha dei limiti di rappresentazione, dovuto all'estensione e l'elevato numero di oggetti, per cui non si possono rappresentare tutti i punti, ma solo una porzione del tracciato:

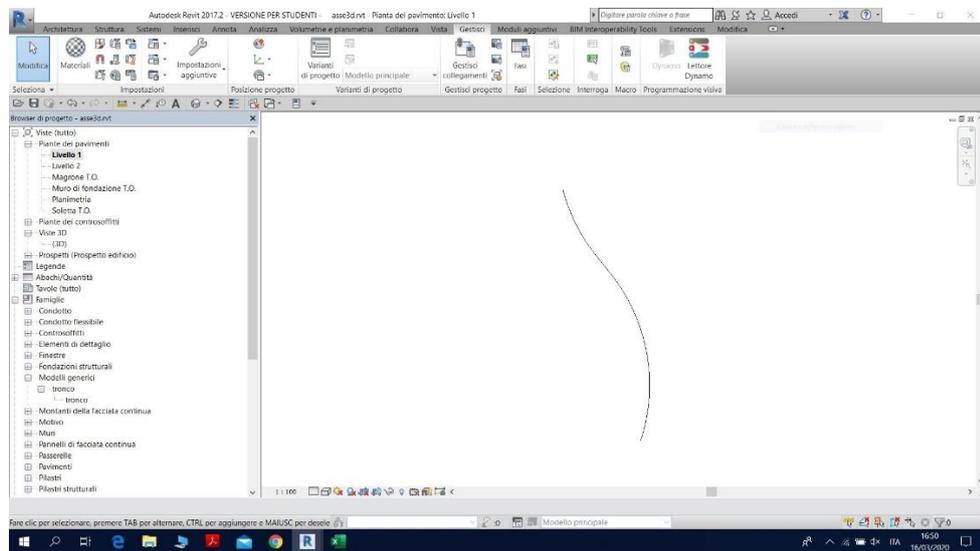


Figura 2.3.8 Rappresentazione di un tronco di asse

Questi limiti possono essere superati creando un apposito database contenente i punti del tracciato e collegarli agli altri oggetti tramite la progressiva.

Un ulteriore passo avanti, consiste nello sviluppare una API che consenta la costruzione del tracciato importandolo da un software di progettazione stradale tramite il formato *LandXML*, a tal proposito Autodesk ha messo in commercio un kit per lo sviluppo di terze parti *Revit SDK*.

Per fare questo tipo di applicazione, bisogna sviluppare un metodo analitico per il calcolo dei punti e successivamente scegliere delle splines che approssimino il tracciato.

Una seconda strategia prevede di calcolare i punti in maniera analitica: il vantaggio è che si hanno virtualmente tutti i possibili punti e ciò può essere utile per il dimensionamento geometrico di impalcati di ponti che ben si prestano ad una modellazione parametrica.

Per questo scopo, sono state implementate tutte le formule su Dynamo per ogni tipologia di tracciato: rettilineo archi e clotoidi.

I punti calcolati sono stati importati su Civil3D per una verifica visiva della correttezza delle formule.



Figura 2.3.9 Procedura per il calcolo analitico dei punti

Estrazione dei singoli oggetti, avviene tramite uno script Python in cui si usa un metodo per estrazione dei contenuti tramite la classe:

```
xml.etree.ElementTree
```

il metodo restituisce il nodo *<Alignment>* e tutti i nodi ad esso subordinati a cui si accede tramite i tag *<Lines>*, *<Curve>* e *<Spiral>* quindi si cercano tutti i rettifili, tutti gli archi di curve e infine tutte le curve di transizione.

Una volta estratto l'oggetto si calcolano i punti tramite delle formule parametriche

#### • Rettifilo

```
<Linedir="329.232595609745" length="135.616202990191">
  <Start>6038599.916439295746 628128.765567156719</Start>
  <End>6038530.541412034072 628245.293933256646</End>
</Line>
```

Figura 2.3.10 Estrazione di un rettifilo

Si estraggono tutti dati per la costruzione del rettifilo, lunghezza, punto di inizio e punto di fine.

In seguito vengono calcolano le coordinate in forma parametrica:

$$x = x_{Start} + at \quad a = \frac{x_{End} - x_{Start}}{l}$$

$$y = y_{Start} + bt \quad b = \frac{y_{End} - y_{Start}}{l}$$

Dove  $l$  è la lunghezza del rettifilo,  $t$  è il parametro normalizzato della curva. In pratica, si fissa il numero dei punti che si vuole calcolare in base alla distanza che si vuole ottenere, dal numero dei punti si ricava il valore del parametro e quindi si calcolano le coordinate.

- **Arco**

```
<Curve length="429.594007123329" tangent="220.111906474112"
radius="799.999999999842" midOrd="28.663277790766"
external="29.728420250673" dirStart="329.232595609644" dirEnd="0."
delta="30.767404390356" crvType="arc" chord="424.450991147414"
rot="ccw">
  <Start>6038530.541412034072 628245.293933256646</Start>
  <Center>6039217.942259605043 628654.537228569272</Center>
  <End>6038417.942259605043628654.537228569272</End>
</Curve>
```

Figura 2.3.11 Estrazione di un arco

Si estraggono tutti i dati per la costruzione dell'arco: lunghezza, punto di inizio e punto di fine e centro e raggio

Si individua il parametro angolare  $\varphi$  come angolo misurato a partire dal punto iniziale e le coordinate in forma parametrica:

$$x = x_{Center} + R\cos(\varphi)$$

$$y = y_{Center} + R\sin(\varphi)$$

Gli incrementi di angolo sono calcolati in base al numero dei punti che si vogliono ottenere.

- **Clotoide**

Nel caso della clotoide bisogna distinguere due casi:

- Entrambi i raggi di curvatura hanno valore finito
- Un raggio di curvatura ha un valore infinito

Il primo caso:

```
<Spiral length="91.3502987799129" chord="91.3239877357894" rot="ccw"
spiType="clothoid" radiusStart="869.998804881993" radiusEnd="1500.0">
  <Start>6572950.02111379 145012.984581503</Start>
  <PI>6572989.65469146 145025.797937323</PI>
  <End>6573038.09620066 145037.126864105</End>
</Spiral>
```

Figura 2.3.12 Estrazione clotoide

Si calcola dapprima il parametro  $\varphi$  in funzione del numero dei punti e successivamente le coordinate geometriche, ponendo:

$$A = \sqrt{\frac{l}{\frac{1}{R_{End}} - \frac{1}{R_{Start}}}}$$

Si calcola l'ascissa curvilinea della clotoide, sulla base del parametro che varia lungo la curva:

$$S = lt + \frac{A^2}{R_{Start}}$$

$$\varphi = \frac{S^2}{2A^2}$$

Si possono quindi valutare le coordinate del punto:

$$x = A\sqrt{2\varphi} \left(1 - \frac{\varphi^2}{10} + \frac{\varphi^4}{216}\right)$$

$$y = A\sqrt{2\varphi} \left(\frac{\varphi}{3} - \frac{\varphi^3}{42} + \frac{\varphi^5}{1320}\right)$$

Il secondo caso:

```
<Spiral length="91.3502987799129" chord="91.3239877357894" rot="ccw"
spiType="clothoid" radiusStart="869.998804881993" radiusEnd="1500.0">
  <Start>6572950.02111379 145012.984581503</Start>
  <PI>6572989.65469146 145025.797937323</PI>
  <End>6573038.09620066 145037.126864105</End>
</Spiral>
```

Figura 2.3.13 Estrazione della clotoide

Si calcola dapprima il parametro  $\varphi$  e successivamente le coordinate geometriche, ponendo:

$$A = \sqrt{lR_{Start}}$$

Si calcola l'ascissa curvilinea della clotoide, sulla base del parametro che varia lungo la curva:

$$S = lt$$

$$\varphi = \frac{S^2}{2A^2}$$

Si possono quindi valutare le coordinate del punto:

$$x = A\sqrt{2\varphi} \left(1 - \frac{\varphi^2}{10} + \frac{\varphi^4}{216}\right)$$

$$y = A\sqrt{2\varphi} \left(\frac{\varphi}{3} - \frac{\varphi^3}{42} + \frac{\varphi^5}{1320}\right)$$

Per una verifica, sono stati calcolati 50 punti e importati su Civil3D

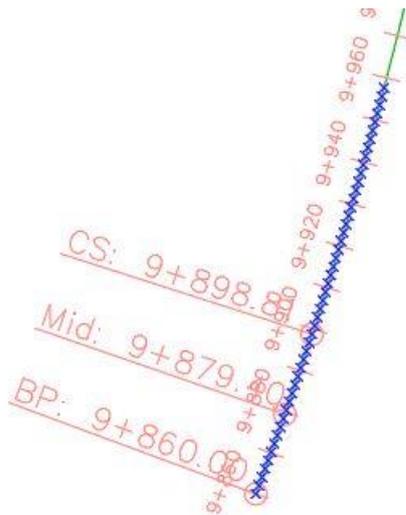


Figura 2.3.14: Stralcio punti calcolati planimetricamente



**Proprietà** ✕


tronco

Modelli generici (1) ✎ Modifica tipo

**Testo** ^

Pk Inizio	9+860.00	
Pk Fine	9+880.00	
Est Inizio	145000.2280	
Est Fine	145007.0068	
Nord Inizio	6572913.3759	
Nord fine	6572932.1916	
Lotto	da pk : 9+860.00 a pk: 9+880.00	

**Dimensioni** ^

Volume		
--------	--	--

**Dati identità** ^

Immagine		
Commenti		
Contrassegno		

**Fasi** ^

Fase di creazione	Fase 1	
Fase di demolizione	Nessuno	

**Componente adattivo** ^

Inverti	<input type="checkbox"/>	
---------	--------------------------	--

Figura 2.3.17 Parametri di un tronco

## 2.4 Modello parametrico di un anello universale

Una volta definito il modello Asse, si passa alla modellazione di un anello universale che sarà successivamente montato lungo il tracciato per simulare la costruzione del rivestimento definitivo.

Il modello BIM dell'anello ha una rappresentazione grafica e una parametrica e viene costruito come una famiglia del tipo *modello generico metrico adattivo*, di seguito vengono illustrati i passi per la costruzione:



Figura 2.4.1 Workflow famiglia anello universale

Le dimensioni dell'anello sono riportate di seguito:

- Diametro esterno,  $D_{OUT} = 10660$  mm
- Spessore,  $t = 380$  mm
- Larghezza media,  $L_{MED} = 2000$  mm
- Larghezza minima,  $L_{MIN} = 1951.5$  mm
- Larghezza massima,  $L_{MAX} = 2048.5$  mm
- Raggio di curvatura minimo raggiungibile,  $R_{MIN} = 220$  m
- Numero di conci,  $n = 8 + 1$
- Numero di Connettori,  $P = 27$

L'anello è stato costruito ad un livello di sviluppo LOD C [11], tale da consentire l'identificazione dei segmenti evitando di rappresentare sono stati connettori e le sole per il sollevamento dei conci.

La costruzione su Inventor avviene tramite le lavorazioni, che sono delle procedure geometriche che vengono eseguite in sequenza partendo da sketch elementari si ottiene un modello parametrico, in cui la geometria si adatta a seconda dei parametri.

All' interno di Inventor vi sono implementate tutte i comandi tipici della geometria computazionale per la realizzazione di forme solide, per questo motivo si presta meglio di Revit per la creazione di dettagli geometrici.

Di seguito si riportano delle figure che illustrano i passi per la costruzione dell'anello.

Si fissano le dimensioni geometriche e i parametri quali Diametro esterno, diametro interno, angoli dei conci, larghezza media del segmento, larghezza minima e massima, tali parametri saranno poi riportati nella piattaforma BIM Autodesk Revit.

Parametri

Nome parametro	Incorporat	Unità/tipo	Equazione	Valore nomin	Toll.	Valore model	Chiave	Es	Commento
d82	SupSwee...	gr	0 gr	0.000000	●	0.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
d83	SupSwee...	gr	0 gr	0.000000	●	0.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Parametri di rife...									
d26		gr	40.00 gr	40.000000	●	40.000000	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
Parametri utente									
Din	d0	mm	9900 mm	9900.0000...	●	9900.0000...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Dout	d1	mm	10660 mm	10660.000...	●	10660.000...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
L	d29, d6, ...	mm	2000 mm	2000.0000...	●	2000.0000...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Lmax	d9	mm	2048.5 mm	2048.5000...	●	2048.5000...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Lmin	d12	mm	1951.5 mm	1951.5000...	●	1951.5000...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
Dm	d2	mm	10280 mm	10280.000...	●	10280.000...	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
n	su	su	9 su	9.000000	●	9.000000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
ang	d25, d24...	gr	360 gr / 9 su	40.000000	●	40.000000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	
beta	d35, d34	gr	10 gr	10.000000	●	10.000000	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	

Collegamento
  Aggiornamento immediato

Reimposta tolleranza:

Figura 2.4.2 Parametri geometrici dell'anello

Si parte dallo Sketch iniziale:

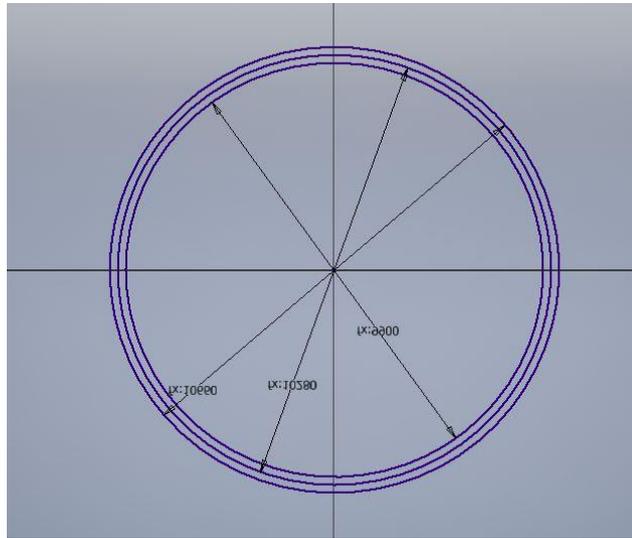


Figura 2.4.3 Sketch della Sezione

I conci dell'anello sono 9 e si sviluppano su archi di  $40^\circ$

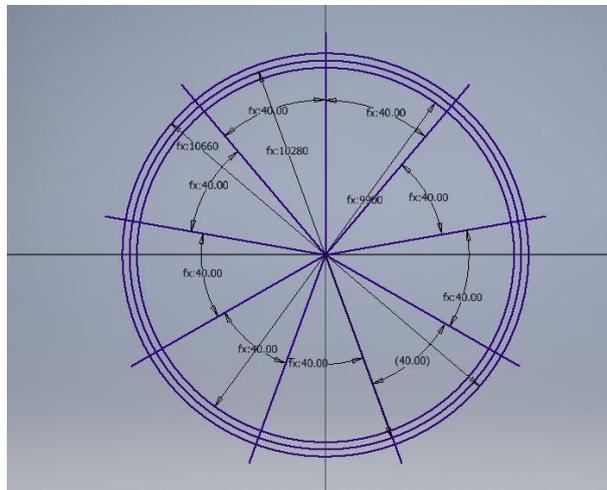


Figura 2.4.4 Suddivisione per i conci

Si ottiene il volume dell'anello tramite estrusione

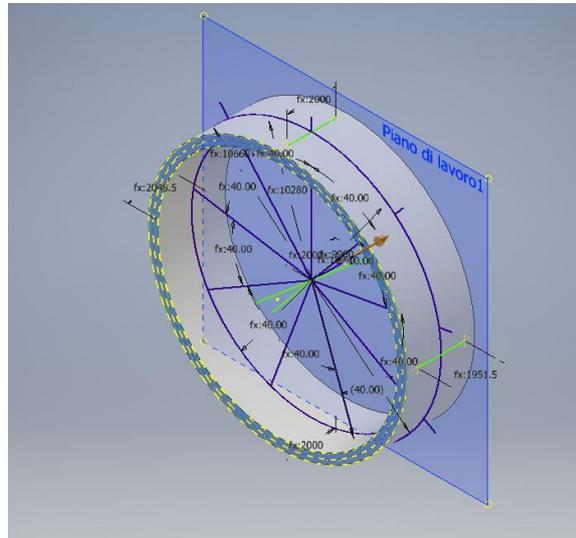


Figura 2.4.5 Volume estruso

Per dare la forma troncoconica si costruiscono dei piani obliqui che andranno a tagliare il volume estruso:

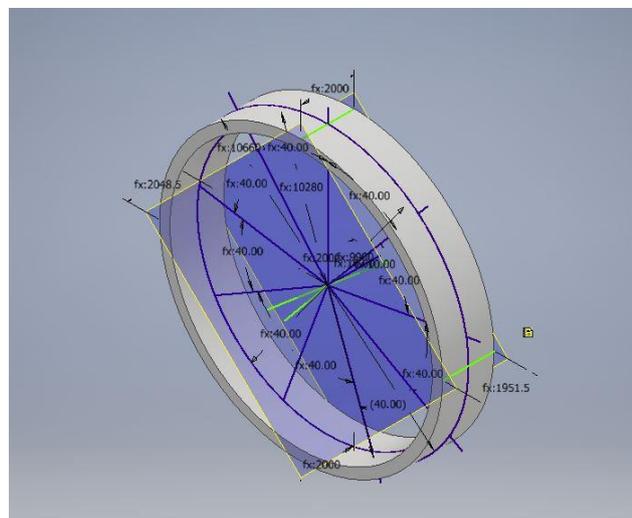


Figura 2.4.6 Piani di taglio del volume

Si taglia il solido per dare la forma conica:

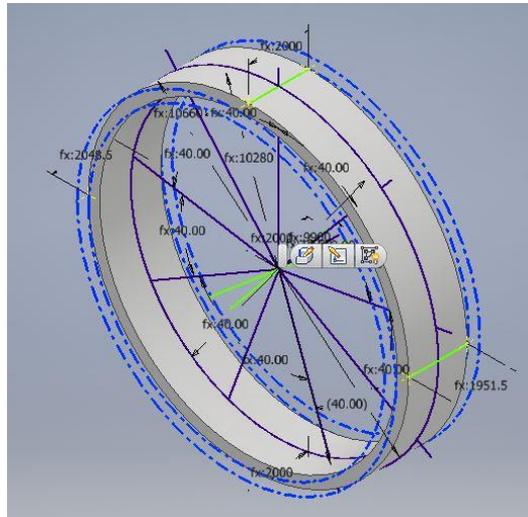


Figura 2.4.7 Sagoma finale

Si individuano i piani di suddivisione dell'anello in conci, tali piani sono in funzione di due angoli, il primo in sezione di 40° il secondo di 10°.

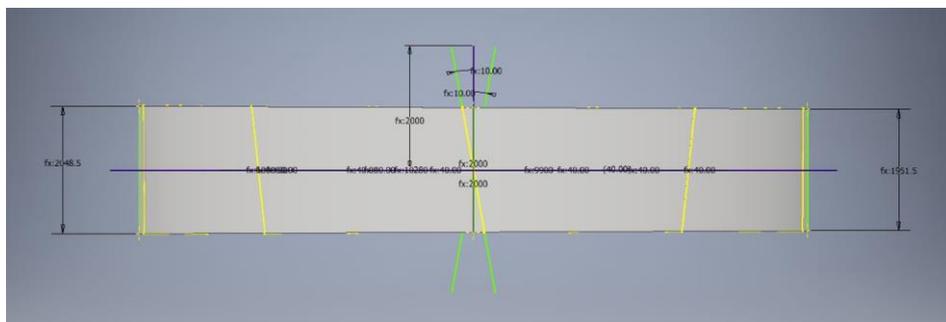


Figura 2.4.8 Vista dall'alto dei piani

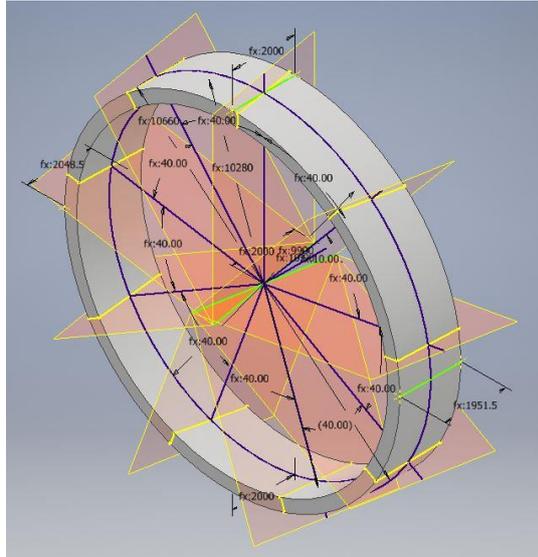


Figura 2.4.9 I piani suddivisione in conci

Infine si ottiene l'anello universale parametrico intersecando i piani con il volume troncoconico:

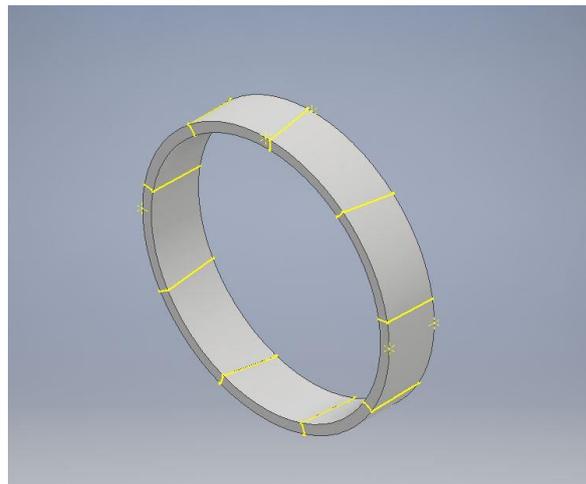


Figura 2.4.10 Anello universale

Il solido così ottenuto è completamente parametrico, pertanto è sufficiente cambiare il valore di un dato iniziale e Inventor riapplica in sequenza tutte le procedure mostrate nelle figure precedenti.

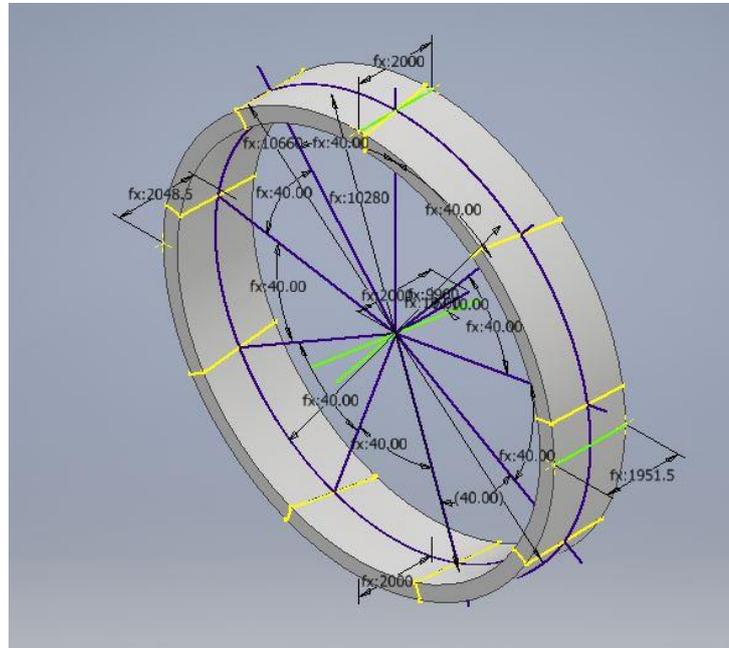


Figura 2.4.11 Solido e parametri in evidenza

Dopo la modellazione geometrica, si passa alla conversione del componente in un oggetto per la modellazione BIM che non sarà più modificabile.

L'importazione del componente in Revit può avvenire in 2 modi:

- importazione tramite formato di scambio *.adsk*
- importazione tramite formato *.SAT*

Il formato *.adsk* è un formato proprietario, che consente l'importazione ed esportazione di geometrie all'interno dei prodotti Autodesk.

In particolare, permette l'esportazione e l'importazione dei parametri utilizzati per la costruzione delle geometrie dell'anello, al fine di mantenere una continuità nel passaggio dell'informazione

Il componente viene salvato in questo formato e successivamente aperto nell'ambiente di modellazione famiglia adattiva su Autodesk Revit, conservando tutti i parametri definiti su Inventor come parametri testo:

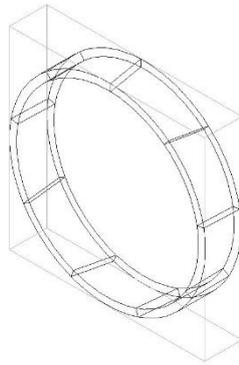


Figura 2.4.12 Solido nel formato di scambio .adsk

Il componente viene successivamente caricato nel template di modello generico metrico adattivo, per completare la modellazione.

Il modello ha bisogno di parametri geometrici di posizionamento che definiscano i gradi di libertà nello spazio dell'anello e i gradi di libertà interni dei singoli conci, a tale scopo si ricorre all'uso dei punti adattivi.

La scelta del punto deve consentire il posizionamento nello spazio nonché gli assetti angolari, per questo motivo si trova il bounding box di ogni concio e si fissa il punto adattivo sul vertice.

Il bounding box rappresenta la scatola più piccola in grado di contenere l'oggetto e per oggetti di forma semplice, è possibile sostituirli con il rispettivo bounding box.



Figura 2.4.13 Bounding Box (LOGO icona Dynamo)

Si deve osservare che un assemblaggio di oggetti, ha un bounding box che li contiene per intero senza tenere conto delle singole posizioni delle parti, che sono libere di muoversi all' interno, per questo motivo per ricostruire la metrica interna occorre riferirsi ai singoli componenti, per cui l'anello avrà 9 punti adattivi per il posizionamento nello spazio.

Si esporta il solido in formato *.SAT* su Dynamo cercando tutti i solidi che compongono l'anello:

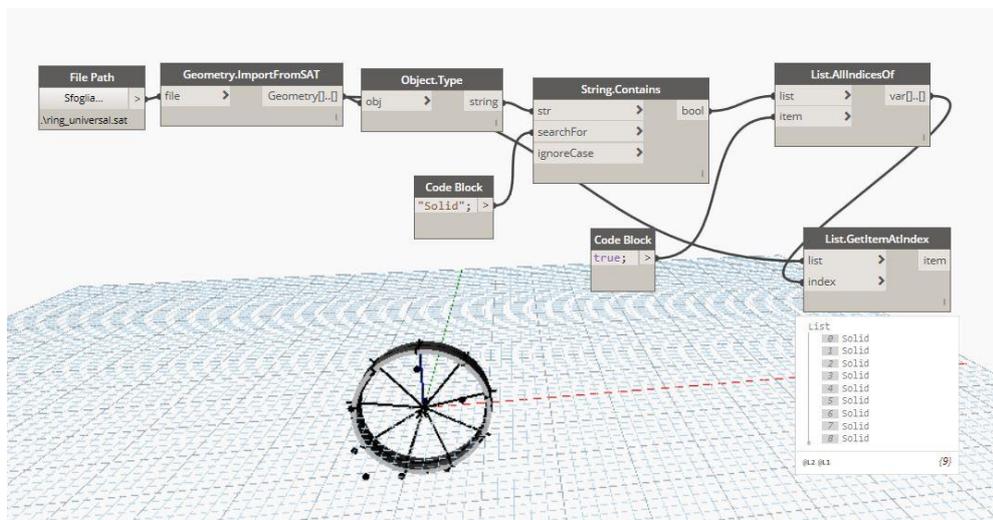


Figura 2.4.14 Ricerca concis su Dynamo

Si trovano nove bounding box e per ognuno si calcola il vertice che viene assegnato come punto adattivo:

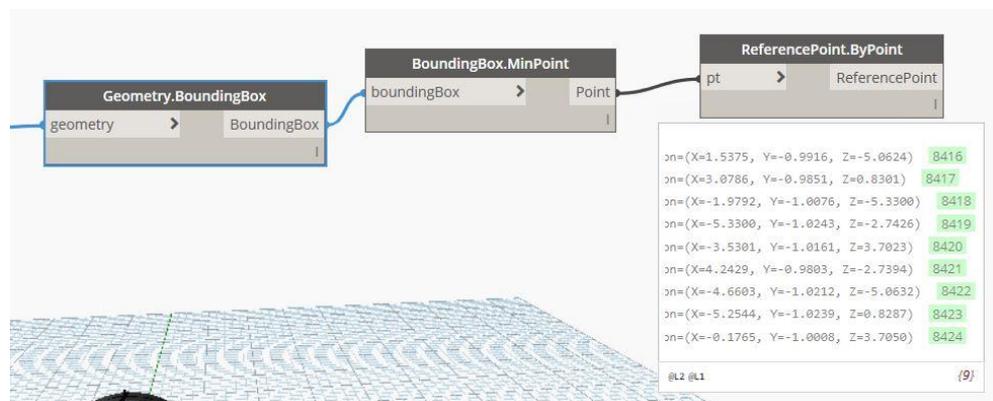


Figura 2.4.15 Punti adattivi dei concis

Dopo avere assegnato i punti adattivi occorre fissare dei parametri utili per il posizionamento dell'anello lungo il tunnel: la progressiva chilometrica e la rotazione rispetto alla matrice di posizione:

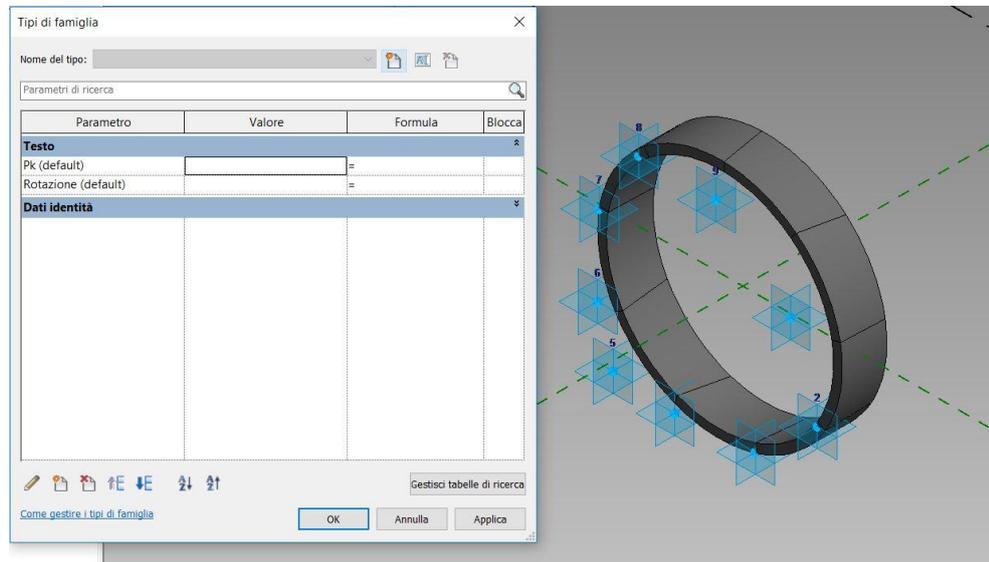


Figura 2.4.16 Modello generico metrico adattivo dell'anello

Il software Revit è in grado di leggere oggetti parametrici in formato *.adsk*, tuttavia si può importare il modello geometrico su Revit usando il formato di scambio libero *.SAT* per la modellazione geometrica: in questo modo si possono importare componenti geometrici realizzati con altri software analoghi a Autodesk Inventor.

Nei successivi paragrafi si mostra una strategia per posizionare l'anello lungo il tracciato per formare il rivestimento definitivo.

## 2.5 Il Posizionamento dell'anello nello spazio

L'anello costruito nel precedente paragrafo può essere posizionato nel modello di progetto che rappresenta lo spazio fisico dell'opera.

Per collocare lungo il tracciato l'anello occorrono la posizione del centro e gli assetti angolari dell'anello, questi vanno a costituire i gradi di libertà dell'anello:

$$A = A(X_0, Y_0, Z_0, \beta, \gamma, \theta)$$

Dove:

- $X_0, Y_0, Z_0$  sono le posizioni del centro

- $\beta$  angolo della tangente al tracciato

- $\gamma$  angolo, angolo di inclinazione verticale

-  $\theta$  angolo di rotazione attorno all'asse dell'anello

Questi parametri vengono messi in relazione con le coordinate dei punti adattivi per posizionare l'anello e i conci di cui è composto.

Tramite Dynamo è stato impostato un algoritmo che riceve in input questi valori e posiziona l'anello nello spazio.

L'algoritmo si basa sulle leggi di traslazione e rotazione nello spazio di ogni punto adattivo:

Rotazione del punto attorno all'asse Z

Rotazione del punto attorno all'asse y locale

Rotazione attorno all'asse x locale

Traslazione

$$\{X_i\} = \{X_0\} + [R]_x^\theta [R]_y^\gamma [R]_z^\beta \{x_i\}$$

Dove:

$\{X_0\}$  è la posizione del centro nel sistema assoluto

$\{x_i\}$  è la posizione del punto adattivo rispetto al centro

$R_i$  sono le matrici di rotazione

$$[R]_z^\beta = \begin{bmatrix} \cos\beta & -\sin\beta & 0 \\ \sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[R]_y^\gamma = \begin{bmatrix} \cos\gamma & 0 & -\sin\gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\gamma & 0 & \cos\gamma \end{bmatrix}$$

$$[R]_x^\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix}$$

Dynamo riceve in input i valori degli anelli da un foglio di calcolo e posiziona gli anelli nell'ambiente di progettazione in Revit:

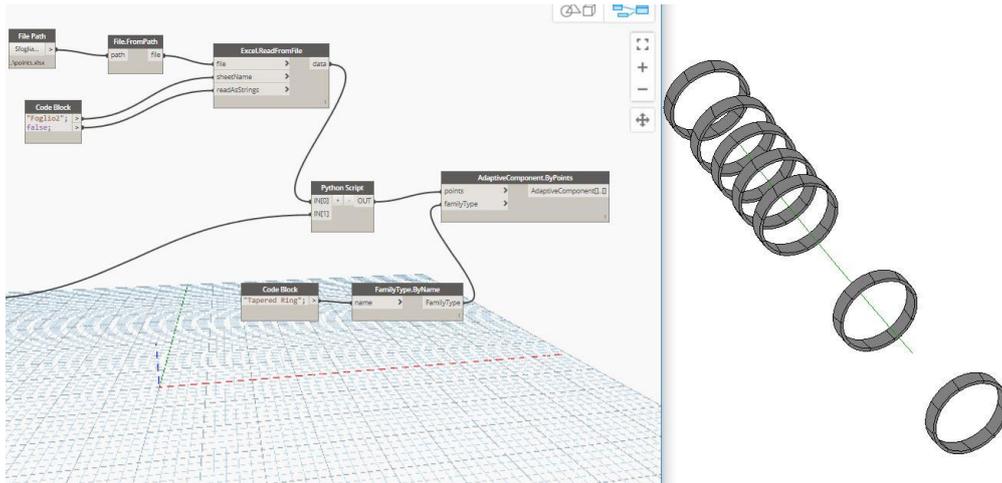


Figura 2.5.1 Posizionamento degli anelli prefabbricati su Revit

In definitiva con Revit si può creare una famiglia adattiva del manufatto, si impostano delle variabili che ne descrivono i gradi di libertà e successivamente si posiziona nello spazio, assegnando le coordinate e le rotazioni.

Questo modo di procedere può essere utile in fase di progettazione in quanto il progettista può sfruttare la modellazione BIM per verificare e coordinare i manufatti nello spazio 3D.

## 2.6 Il Rivestimento definitivo di una galleria

Come anticipato nel paragrafo 2.1, il rivestimento viene costruito assemblando gli anelli tra di loro al retro della TBM, la quale calcola le posizioni ottimali degli anelli seguendo un tracciato che discosta da quello teorico del tunnel.

Per il calcolo delle posizioni degli anelli, Ninic e Koch [12] hanno proposto delle formule per il calcolo delle posizioni effettive degli anelli universali.

In una prima parte si mostrano le formule per il calcolo dei punti del tracciato effettivo, poi si posizionano su Revit per una verifica visiva.

Nella formulazione si assumono noti la larghezza media dell'anello  $L_r$ , il parametro di conicità  $\alpha$  e le possibili rotazioni attorno al proprio asse secondo la matrice di posizionamento dell'anello.

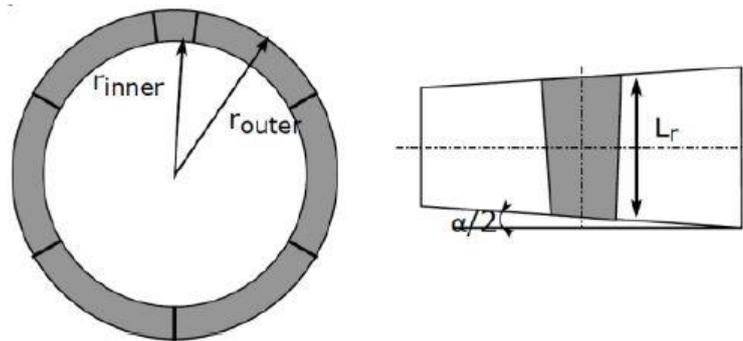


Figura 2.6.1 Dati di partenza dell'algoritmo (FONTE DOI: 0.1016/j.aei.2019.101011)

Partendo da una posizione iniziale dell'anello  $[x_{n-1}, y_{n-1}, z_{n-1}]$  aggiungendo un nuovo anello si trova un punto del tracciato effettivo, gli scostamenti sono:

$$\Delta x_n = x_n - x_{n-1}$$

$$\Delta y_n = x_n - x_{n-1}$$

$$\Delta z_n = x_n - x_{n-1}$$

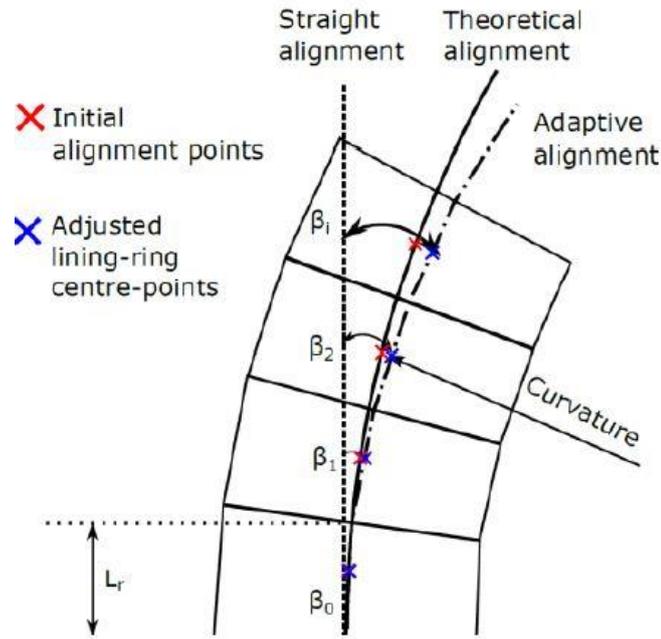


Figura 2.6.2 Posizionamento dell'anello (FONTE DOI: 0.1016/j.aei.2019.101011)

Questo scostamento dipende dalla proprietà geometriche e dalla rotazione  $\theta$  dell'anello attorno il proprio asse:

$$\begin{aligned} \Delta x_n &= L_r \cos \left( \beta_{n-1} + \frac{\alpha}{2} \cos(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cos(\theta_n) \right) \\ &\quad * \cos \left( \gamma_{n-1} + \frac{\alpha}{2} \sin(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \sin(\theta_n) \right) \\ \Delta y_n &= L_r \sin \left( \beta_{n-1} + \frac{\alpha}{2} \cos(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cos(\theta_n) \right) \\ &\quad * \cos \left( \gamma_{n-1} + \frac{\alpha}{2} \sin(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \sin(\theta_n) \right) \\ \Delta z_n &= L_r \sin \left( \beta_{n-1} + \frac{\alpha}{2} \cos(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \cos(\theta_n) \right) \\ &\quad * \sin \left( \gamma_{n-1} + \frac{\alpha}{2} \sin(\theta_{n-1}) + \frac{\alpha}{2} \sin(\theta_n) \right) \end{aligned}$$

Gli angoli del nuovo anello valgono:

$$\begin{aligned} \beta_{n+1} &= \beta_n + \frac{\alpha}{2} \cos(\theta_{n+1}) + \frac{\alpha}{2} \cos(\theta_n) \\ \gamma_{n+1} &= \gamma_n + \frac{\alpha}{2} \sin(\theta_{n+1}) + \frac{\alpha}{2} \sin(\theta_n) \end{aligned}$$

Si cercano le rotazioni  $\theta$  tali da rendere minimo lo scostamento rispetto al tracciato teorico:

$$\{\Delta x\}_n(\theta_n) = \min$$

$\theta_n$  deve essere compatibile con l'anello precedente secondo la matrice di posizione per avere i giunti sfalsati:

$$\theta_n = \{P1_{n-1}, \quad P2_{n-1}, \quad P3_{n-1} \dots\}$$

Si fissa la posizione iniziale del primo anello, e si calcolano i successivi punti lungo il tracciato

Questa procedura ad esempio può essere utilizzata per una ipotetica verifica geometrica del tracciato nella fase progettuale:

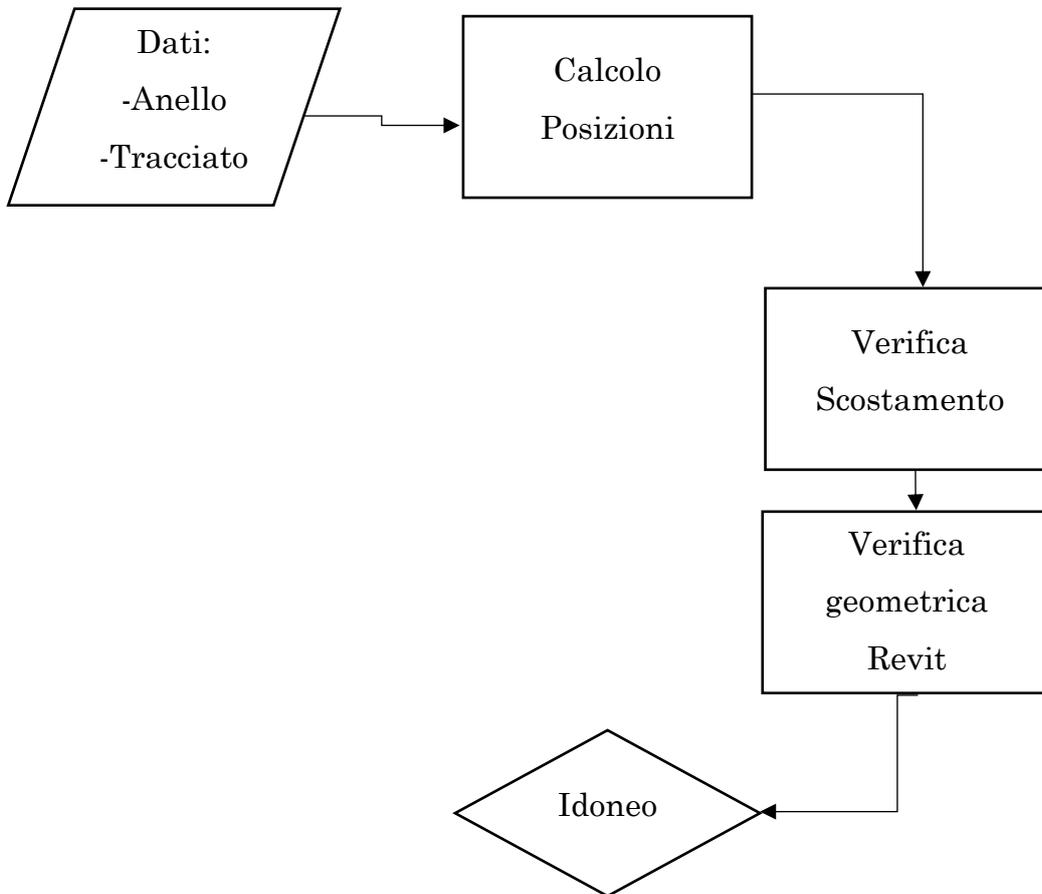


Figura 2.6.3 Scelta dell'anello

Per la simulazione è stata considerata una porzione di tracciato pari a 470 m su cui sono stati posizionati 240 anelli:

Nelle figure di seguito si si riportano gli scostamenti {x,y,z} del tracciato effettivo rispetto al tracciato teorico:



Figura 2.6.4 Scostamento direzione x

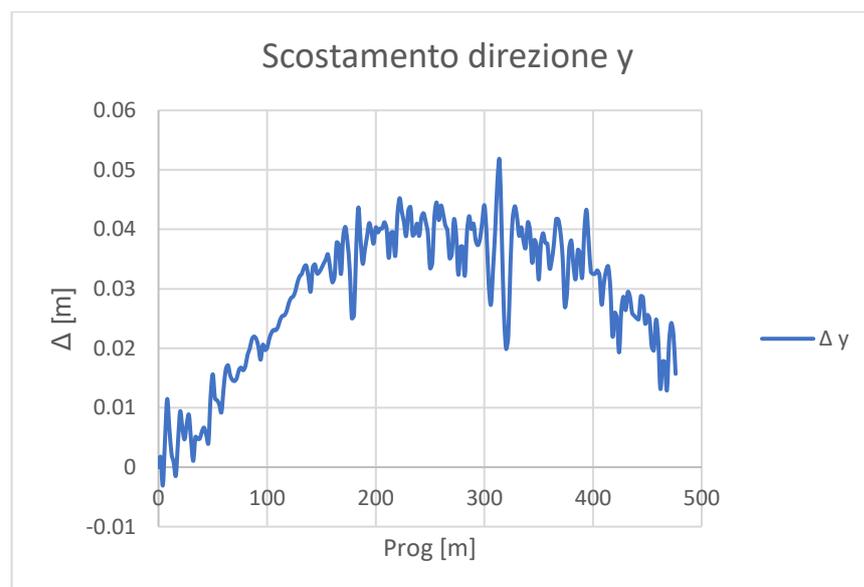


Figura 2.6.5 Scostamento in direzione y

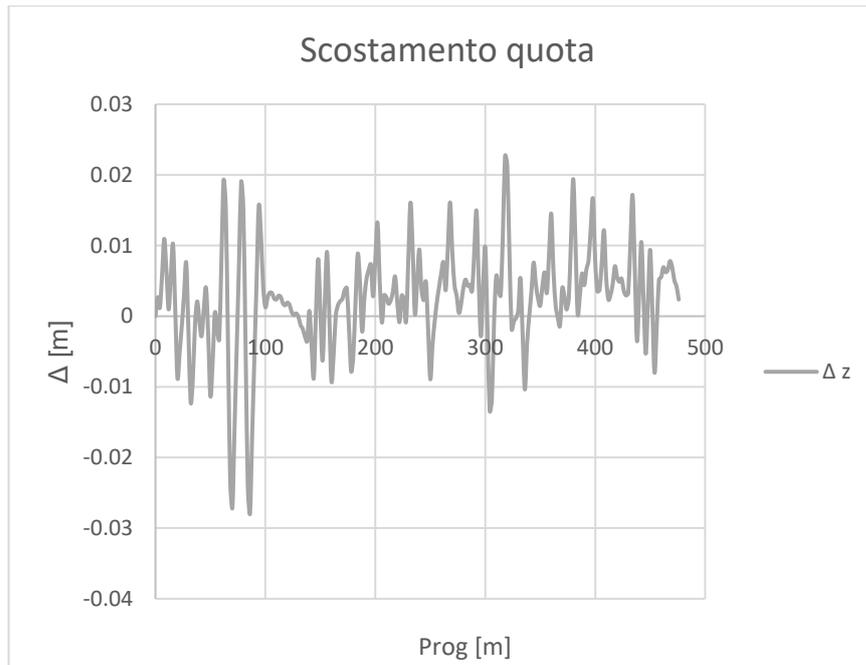
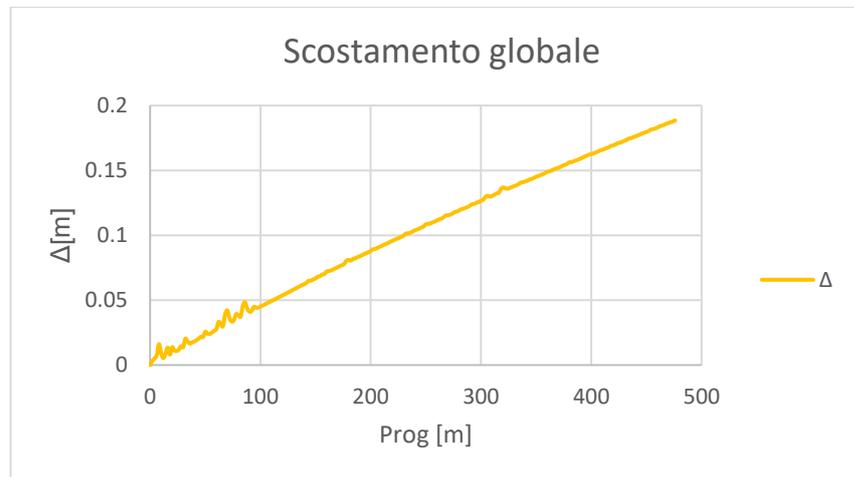


Figura 2.6.6

Si osserva che lo scostamento tende ad aumentare con l'aumentare della progressiva, per cui si può ulteriormente fare una iterazione:



Una volta posizionati su Revit, si può visualizzare meglio il rivestimento

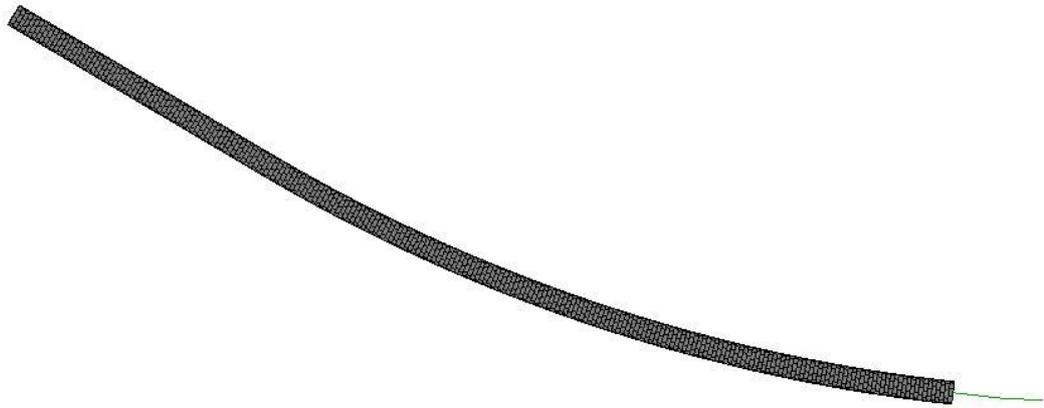


Figura 2.6.7 Rivestimento vista dall'alto

Nonché verificare visivamente come sono affiancati gli anelli tra di loro

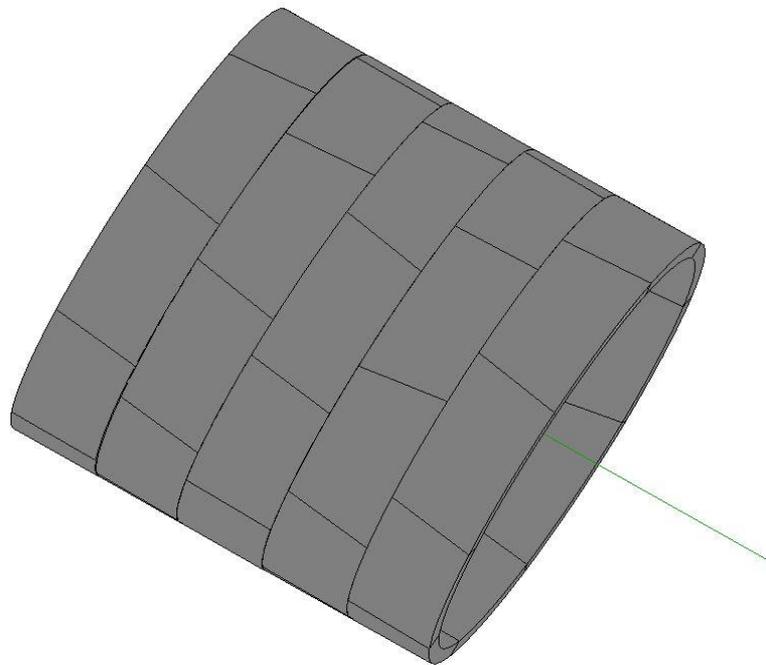


Figura 2.6.8 Verifica visiva affiancamento

Durante il montaggio si osserva un aumento dello scostamento lungo la Progressiva.

Per come è strutturato l'algoritmo, si può pensare di rendere in futuro la procedura iterativa, si possono fissare delle regole sulla base di alcuni parametri per simulare più soluzioni e prendere la migliore come avviene nel design generativo.

Sono state provate diverse strategie di posizionamento, per capire quale strada fosse la migliore in termini di ottimizzazione dello scostamento lungo il tracciato.

E' stata fatta un'ulteriore iterazione sottraendo alle posizioni di partenza lo scostamento medio in modo da compensare l'errore lungo il tracciato ed è stato lanciato l'algoritmo ottenendo un miglioramento in termini di scostamento medio lungo il tracciato:

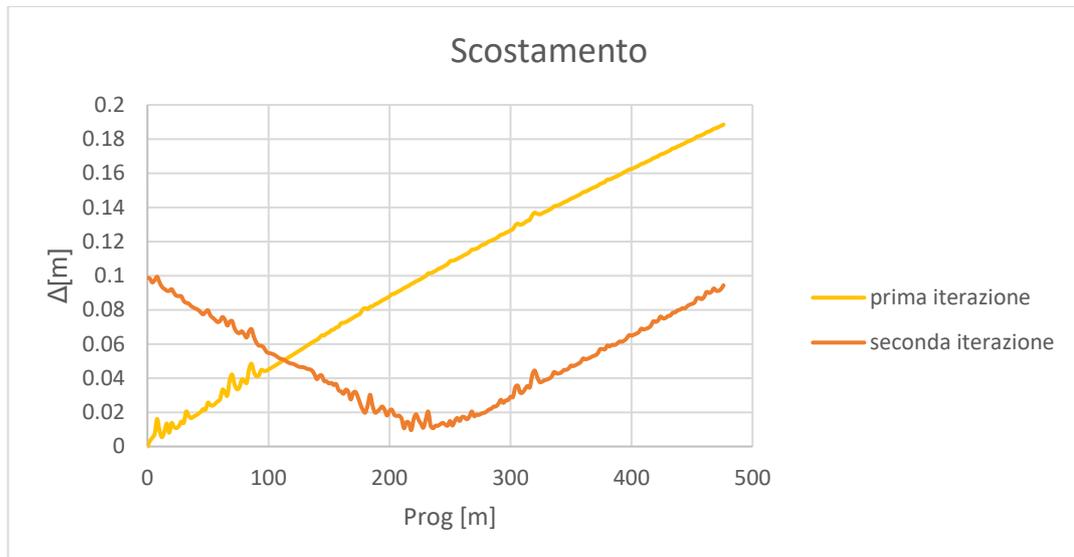
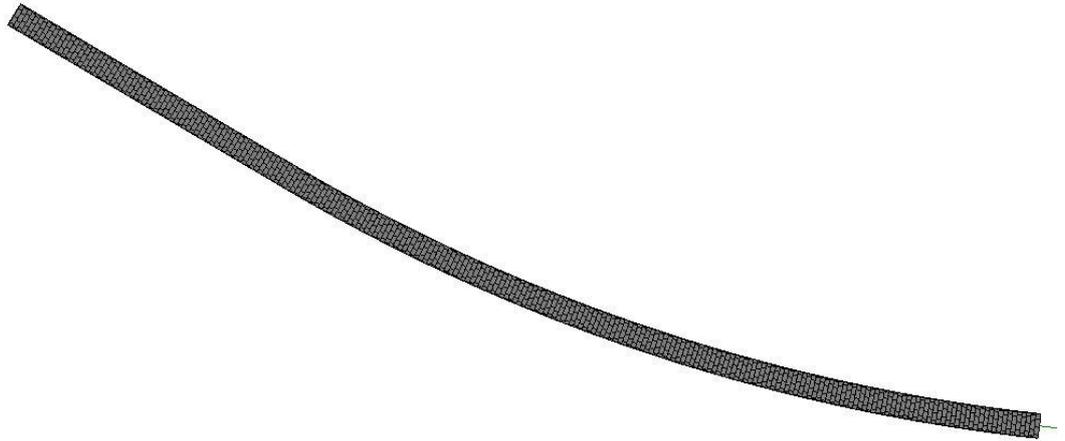


Figura 2.6.9 Confronto in termini di scostamenti

Si ottiene uno scostamento minore di 10 cm lungo tutto il tracciato, per cui si interrompe la ricerca e si montano gli anelli con i nuovi valori:



*Figura 2.6.7 Ulteriore verifica della seconda iterazione*

In questa ultima parte si è mostrato come è possibile realizzare diverse configurazioni, verificate su Revit.

Uno sviluppo futuro, consiste nel realizzare un algoritmo che simuli il percorso “intelligente” della TBM lungo il tracciato per avere un modello digitale del rivestimento che sia aderente alla realtà, e di supporto durante la successiva fase di costruzione dell’opera.

La potenzialità di questo approccio consente nella fase progettuale di poter effettuare verifiche geometriche nelle fasi preliminari di progettazione

Nel caso specifico della galleria questa procedura permette di studiare il posizionamento dell’anello su più tronchi di progetto per verificare se l’anello è idoneo per il tracciato in termini di dimensionamento geometrico e posizionamento lungo il tracciato.

La realizzazione di gallerie a scavo meccanizzato comporta diversi rischi che dipendono dalle scelte progettuali portate avanti ai vari livelli di progettazione, tra cui figura anche il rischio legato al dimensionamento geometrico dell’anello e alla scelta del tracciato ottimale per le macchine TBM.

Per questo motivo sia la progettazione, sia la costruzione seguono dei protocolli per la mitigazione del rischio.

Pertanto la definizione di procedure BIM che nella fase progettuale consentano di validare le scelte progettuali, sicuramente contribuirebbe alla mitigazione del rischio.



---

## 3 InfraBIM e simulazione 4D

---

### 3.1 Introduzione

In questo capitolo si propone come la metodologia BIM viene applicata a supporto delle attività di *construction management*.

Le principali applicazioni sono relative alla pianificazione e programmazione lavori, procurement, gestione del cantiere e delle risorse, analisi e stime dei costi.

La costruzione di una grande opera come una infrastruttura metropolitana generalmente comprende l'esecuzione di diverse opere, quali fermate, gallerie impianti e di diverse attività, per questo motivo si suddivide il progetto in una struttura gerarchica a livelli: la *Work Breakdown Structure* (WBS)

Con riferimento al settore delle costruzioni, la WBS scompone un'opera in elementi via via più semplici secondo una procedura *top-down* [13]. Man mano che si scende di livello, aumenta il dettaglio e la definizione di elementi che lo compongono, fino ad arrivare all'elemento più semplice che non può più essere scomposto. In generale il numero dei livelli può essere variabile a seconda della complessità dell'opera, di norma la scomposizione viene fatta per *derivables* ovvero comprende tutte le attività oggetto della commessa: dalla progettazione alla consegna della commessa.

Un' infrastruttura, come una linea ferroviaria, viene scomposta in, gallerie, viadotti, opere idrauliche che a loro volta sono scomposte in più parti e così via.

Sulla base delle WBS si eseguono i computi metrici e il cronoprogramma dei lavori.

Le WBS di una infrastruttura sono organizzate in più livelli a cui sono associati dei codici di identificazione.

Obiettivo di questo lavoro è stato proporre un metodo per associare gli oggetti del modello InfraBIM ad una WBS standard del tunnel e successivamente è stata eseguita una simulazione 4D tramite il software Synchro PRO by Bentley.

### 3.2 Modellazione InfraBIM e la Scomposizione WBS

Qualunque oggetto di un modello InfraBIM viene definito tramite una componente geometrica 3D e componenti alfanumerici, parametri e attributi. L'idea principale è quella di associare dei parametri testo per definire a quale livello della WBS appartiene.

La regola è quella di associare gli oggetti ai vari livelli secondo la procedura *top-down* e successivamente verificare se dall'elemento più in basso si riesce a risalire al livello superiore:



Figura *Errore*. Nel documento non esiste testo dello stile specificato. 2.1 workflow

WBS di una Galleria:

Secondo la logica *top-down*, l'infrastruttura viene suddivisa in più livelli e ad ogni livello corrisponde un codice. La galleria è stata suddivisa in 3 livelli più il livello 0 comune a tutte le opere:

Livello 0, identifica l'infrastruttura, ad esempio: "Linea C" a cui appartengono tutte le opere.

Con livello 1 si identificano le opere di cui è costituita l'infrastruttura, ad esempio

Opera: "Galleria Naturale da pk: 0+ 000 a pk: 2 + 546"

Al livello 2 vengono rappresentate le parti che compongono una galleria, in base alle categorie e vengono numerati in campi o lotti a questo livello ricadono ad esempio:

- Movimenti Terra
- Rivestimento prima fase
- Rivestimento definitivo
- finiture
- idraulica di linea
- impianti, ecc.

Al livello 3 si identificano gli elementi che costituiscono le parti di una galleria vengono divisi in subcategorie, qui rientrano le opere in c.a. quali le centine, gli anelli prefabbricati ecc.:

Per ogni livello è stato associato un codice WBS che può essere seguito da un numero progressivo, ad es. se nell'infrastruttura vi sono due gallerie naturali, si avrà GN01 e GN02 e così via.

Così facendo si associano tutti gli oggetti ad una specifica WBS, per cui si possono avere tante WBS per quante sono le opere, che a loro volta costituiscono dei sistemi da scomporre.

si prende in considerazione la galleria, si scompone la galleria in lotti e successivamente si accorpano tutti gli elementi che ricadono in quel lotto.

Sulla base di queste regole, si propone una scomposizione per il modello del rivestimento definitivo:

Scomposizione tipo di una Galleria in WBS	
OPERA CODICEWBS1	Galleria Naturale da pk 0 + 000 a pk 2 + 546 GN01
LOTTO CATEGORIA CODICEWBS3	Lotto 01 RIVESTIMENTO DEFINITO GN01.RD01
SUBCATEGORIA ELEMENTO CODICEWBS3	ANELLI PREFABBRICATI 01 GN01.RD01.AP01

Tabella 3.1.1 Parametri Condivisi

In questo modo dall' anello si riesce a risalire all' opera che viene realizzata. Queste informazioni vengono inserite per ogni oggetto tramite un algoritmo implementato su Dynamo.

Si definiscono i parametri da associare all' oggetto, su Revit tramite parametri condivisi:

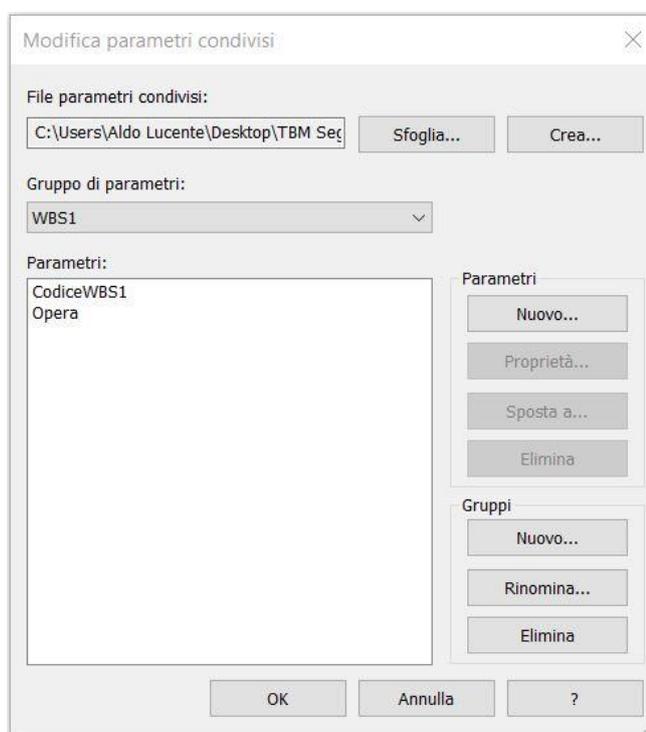


Figura 3.2.3 Parametri Condivisi

Una volta definiti i parametri questi vengono condivisi con la famiglia Anello di Revit come parametri di istanza.

I parametri di istanza contengono informazioni variabili da un oggetto ed un suo omologo in un'altra posizione:

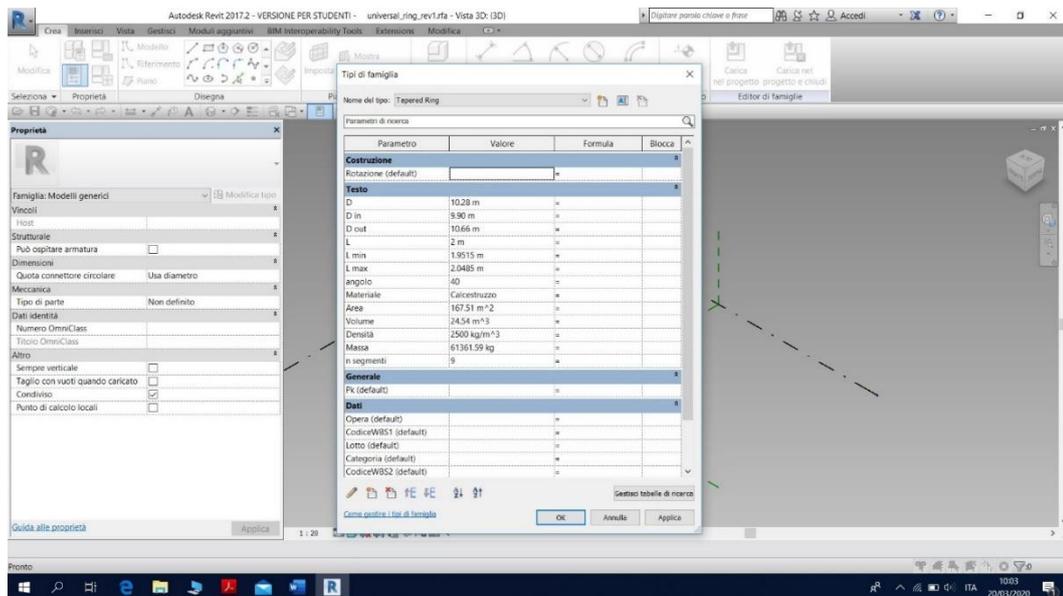


Figura 3.2.4 Parametri condivisi per la famiglia anello prefabbricato

L'importazione degli attributi per ogni anello viene svolta in automatico su Dynamo per tutti gli anelli del rivestimento:

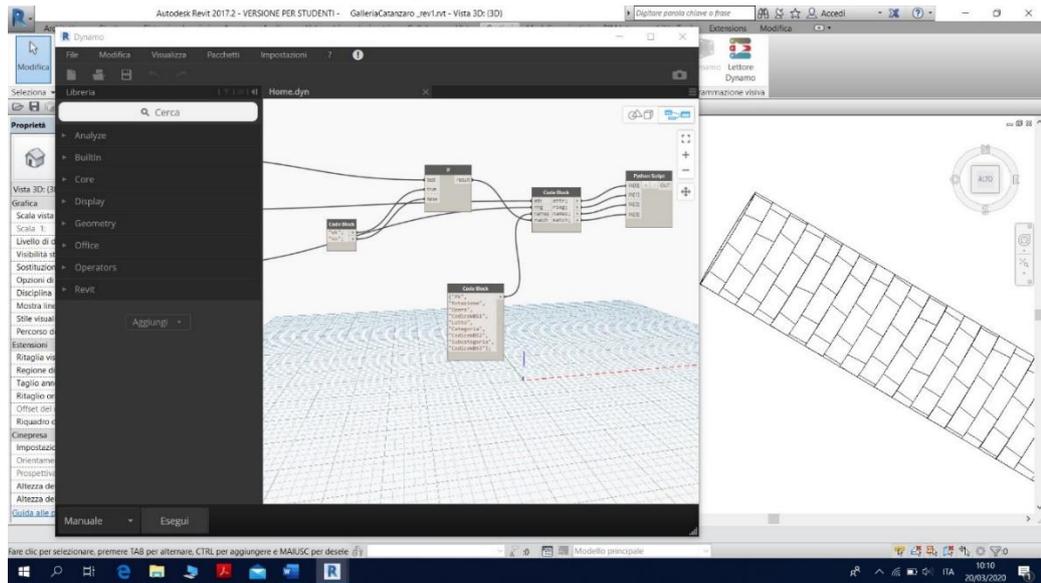


Figura 3.2.4 importazione codici WBS tramite Dynamo

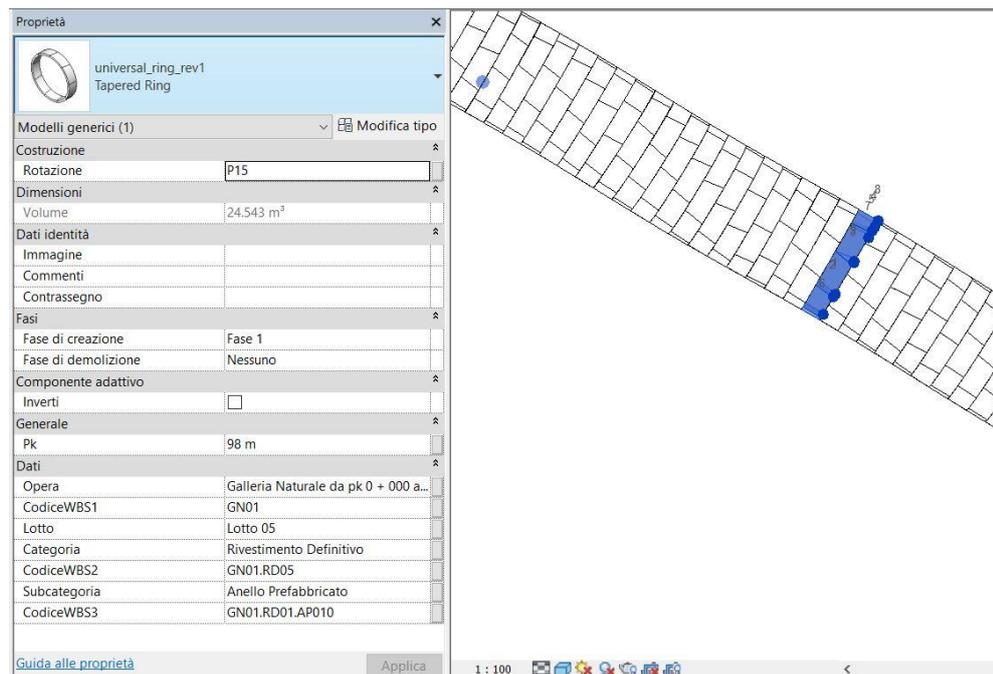


Figura 3.2.5 Parametro della singola istanza

Tutti i dati dell'anello possono essere riepilogati in un abaco:

<Abaco Anelli del Rivestimento definitivo>						
A	B	C	D	E	F	G
Pk	Lotto	CodiceWBS1	Categoria	CodiceWBS2	Subcategoria	CodiceWBS3
0 m	Lotto 01	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD01	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP01
2 m	Lotto 01	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD01	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP02
4 m	Lotto 01	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD01	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP03
6 m	Lotto 01	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD01	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP04
8 m	Lotto 01	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD01	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP05
10 m	Lotto 01	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD01	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP06
12 m	Lotto 01	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD01	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP07
14 m	Lotto 01	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD01	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP08
16 m	Lotto 01	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD01	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP09
18 m	Lotto 01	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD01	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP10
20 m	Lotto 02	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD02	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP01
22 m	Lotto 02	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD02	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP02
24 m	Lotto 02	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD02	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP03
26 m	Lotto 02	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD02	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP04
28 m	Lotto 02	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD02	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP05
30 m	Lotto 02	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD02	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP06
32 m	Lotto 02	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD02	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP07
34 m	Lotto 02	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD02	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP08
36 m	Lotto 02	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD02	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP09
38 m	Lotto 02	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD02	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP10
40 m	Lotto 03	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD03	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP01
42 m	Lotto 03	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD03	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP02
44 m	Lotto 03	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD03	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP03
46 m	Lotto 03	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD03	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP04
48 m	Lotto 03	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD03	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP05
50 m	Lotto 03	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD03	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP06
52 m	Lotto 03	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD03	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP07
54 m	Lotto 03	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD03	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP08
56 m	Lotto 03	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD03	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP09
58 m	Lotto 03	GN01	Rivestimento Definitivo	GN01.RD03	Anello Prefabbricato	GN01.RD01.AP10

Figura 3.2.5 Stralcio Abaco degli anelli del rivestimento

### 3.3 Simulazione 4D

Un'analisi 4D è una simulazione visiva della pianificazione delle opere e delle attività[14].

L'analisi serve per verificare e coordinare le sequenze dei lavori nello spazio e nel tempo, ovvero per individuare eventuali interferenze spaziali e temporali.

Il software di simulazione 4D Synchro consente di realizzare delle animazioni 3D delle sequenze costruttive partendo dagli oggetti 3D e dal cronoprogramma delle attività.

Si esporta il modello della galleria da Revit in formato *.ifc*

Durante la conversione gli oggetti anelli vengono mappati nella classe:

*IFC\_building element proxy*

L'esportazione viene verificata su un BIM viewer gratuito online: [www.bimspot.com](http://www.bimspot.com)

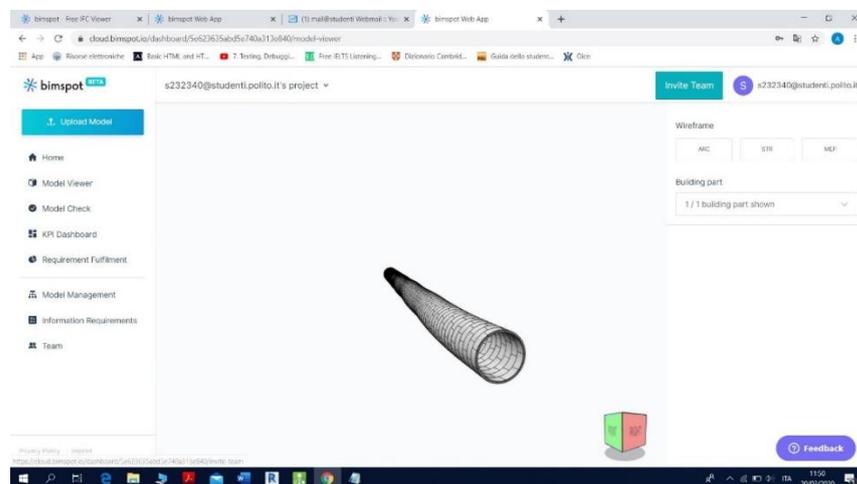


Figura 3.3.1 Esportazione del rivestimento in formato IFC

Si importa su Synchro il modello in formato .ifc e si impostano le sequenze di montaggio degli anelli: suddiviso in lotti di 10 anelli:

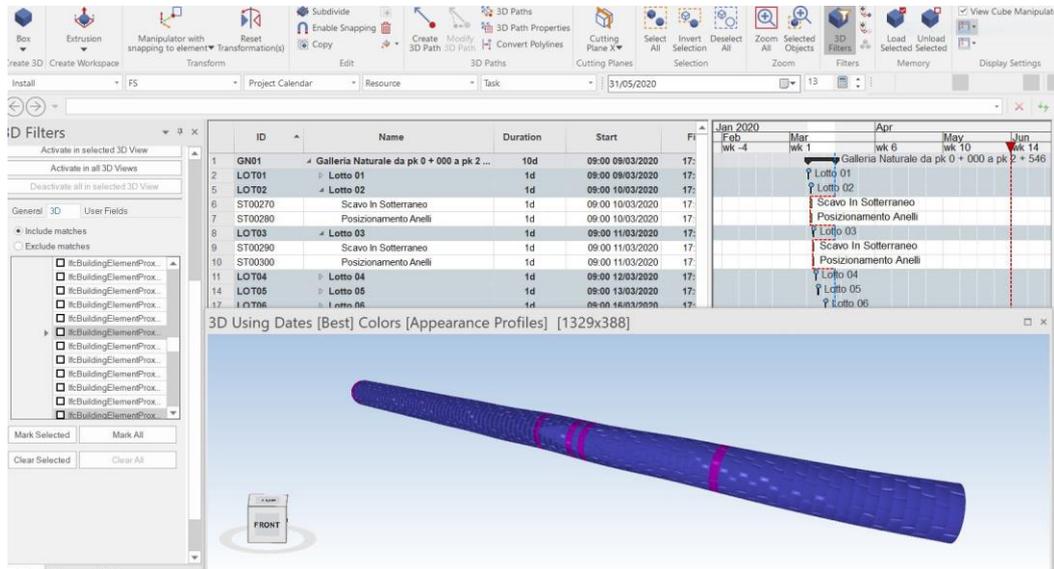


Figura 3.3.2 Importazione del modello su Synchro

Per lo scopo, non disponendo di un cronoprogramma reale per la costruzione di una galleria a scavo meccanizzato, è stato ipotizzato un tempo medio di avanzamento dello scavo e montaggio anelli pari a 10 anelli/giorno in condizioni standard.

Si è ipotizzato che lo scavo di avanzamento avvenga in contemporaneo con il posizionamento dell’anello, queste attività sono state messe in sequenza e rappresentante in un diagramma di GANTT:

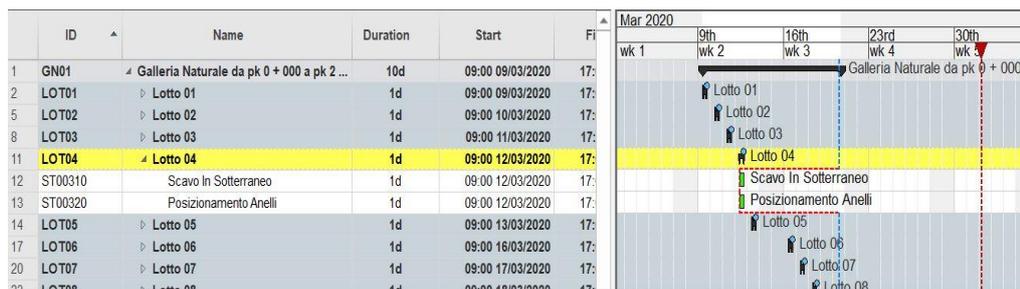


Figura 3.3.3 Diagramma di GANTT delle fasi di avanzamento della galleria

Le attività sono state associate agli oggetti BIM tramite una regola di *matching* del parametro lotto dell'anello con il nome delle attività e infine tramite un' animazione sono state visualizzate le sequenze di avanzamento.

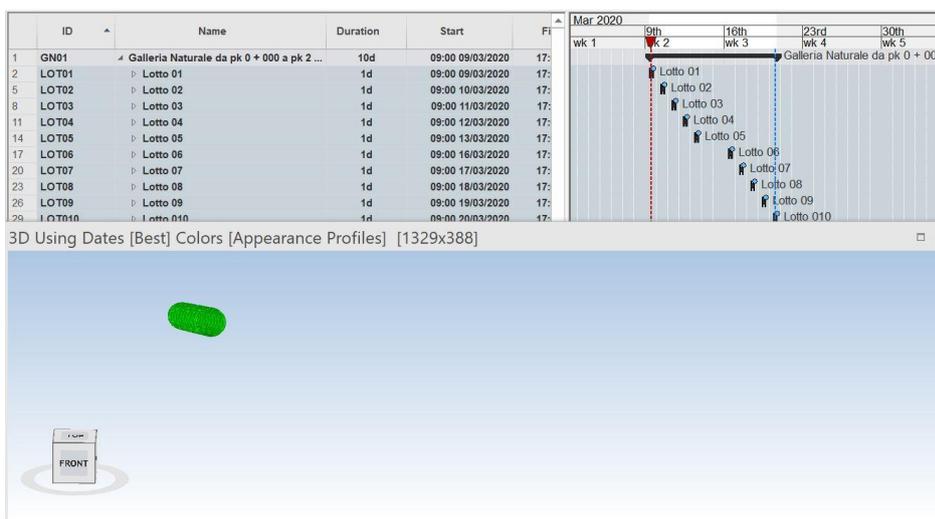


Figura 3.3.4 Fotogramma animazione 4D

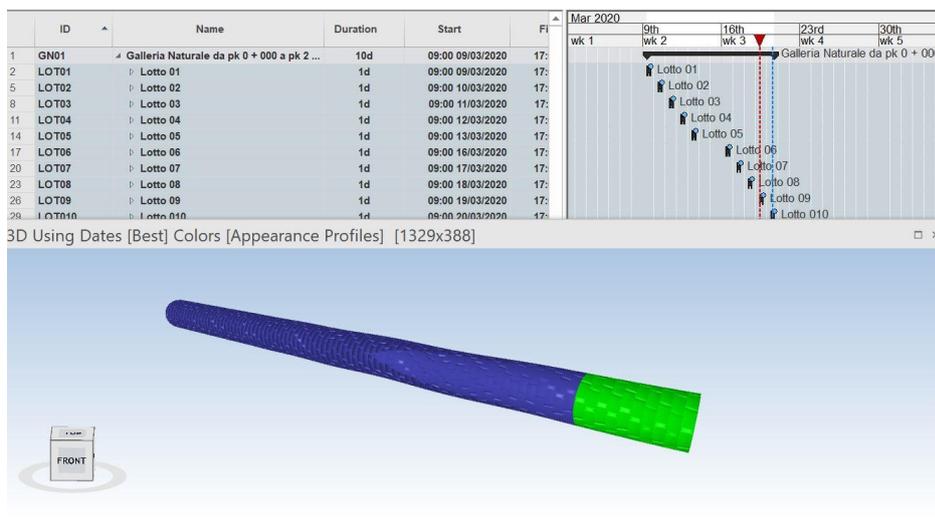


Figura 3.3.5 Fotogramma animazione 4D

---

## Conclusioni

---

Il BIM offre diverse possibilità nel settore delle costruzioni: l'obiettivo della tesi è mostrare le applicazioni nel tunneling a scavo meccanizzato, puntando a realizzare metodi e approcci originali che possano aiutare il progettista ad orientarsi nelle scelte progettuali, convinto che il BIM non sia solo un obbligo imposto dall'alto, ma un'opportunità per gli operatori del settore.

Gli sviluppi futuri devono necessariamente riguardare l'interoperabilità: bisogna implementare il formato di scambio open ifc -tunnel per risolvere, risolvere il problema legato alla rappresentazione dell'asse stradale.

In più per la progettazione, si devono studiare procedure per l'ottimizzazione anche nel campo delle infrastrutture, provare a implementare algoritmi di design generativo in questo settore.

Infine implementare delle procedure che possano aiutare nella mitigazione del rischio legate alle gallerie a scavo meccanizzato.

---

## Bibliografia

---

[1] *Buiding the technology advantage-Harnessing the potential of technology to improve the performance of major projects*, Global Construcion Survey 2016, G. Armstrong, C. Gilge KPMG

[2] *Code of practice for project management for construction and development* 5th ed. CIOB, Wiley and Blackwell

[3] “Building Information Modeling (BIM) for transportation infrastructure – Literature review, applications, challenges, and recommendations”, *Automation in Construction*, vol. 94 , pp. 257-281, 2018 A. Costin, A. Adibar, H. Hu, S. S.Chen, DOI : <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.001>

[4] "BIM modelling in mined tunnelling – Discussions and recommendation for the structural geometry to be considered in 3D models", *Geomechanics and Tunnelling*, vol. 11 no. 4, pp 357-365 2018 S. Frodl, P-M. Mayer, DOI: [10.1002/geot.201800020](https://doi.org/10.1002/geot.201800020)

[5] “A tunnel information modelling framework to support management, simulations and visualisations in mechanised tunnelling projects,” *Automation in Construction*, vol. 83, pp. 79-90, 2017 C . Koch, A. Vonthron and M. Konig, DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2017.07.006>

[6] “Multi-scale geometric-semantic modeling of shield tunnels for GIS and BIM applications” *Computer-Aided Civil and Infrastrucure Engineering*, vol. 30 no.4 2015 A. Borrmann, T. H. Kolbe, A. Donaubaauer, H. Steuer, J. R. Jubierre, M. Flurl , DOI : [0.1016/j.aei.2019.101011](https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.101011)

[7] “ Synchronous collaborative tunnel design based on consistency-preserving multi-scale models” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 28, no. 4, pp. 499-517, 2014 A. Borrmann, A. Flurl, J. R. Jubierre, R-P. Mundani, E. Rank, DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2014.07.005>

[8] *The design, sizing and construction of precast concrete segments installed at the rear of a tunnel boring machine (TBM)*, *AFTES Recommendations* Version 1- 1997

- [9] *Recommendations for the design, production and installation of segmental rings (10.2013)*, Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e. V. (DAUB), German Tunnelling Committee (ITA-AITES), Germany
- [10] *Mechanized Tunnelling in urban areas- design methodology and construction control*, V. Guglielmetti, P. Grasso, A. Mahtab & S. XU, Taylor & Francis, Torino, 2007
- [11] UNI 11337-1: 2018 “*Edilizia e opere di ingegneria civile – Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni Parte 1: Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi*”
- [12] “Integrated parametric multi-level information and numerical modelling of mechanised tunnelling projects” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 43 January 2020 J. Ninic, A. Vonthron, C. Koch, W. Tizani, DOI : [0.1016/j.aei.2019.101011](https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.101011)
- [13] “Work breakdown structure (WBS) development for underground construction” , *Automation in Construction*, vol. 58, pp. 85-94, 2015 E. Siami-Irdemoosaa, S. R. Dindarloo, M. Sharifzadeh,  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.016>
- [14] *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors* 2nd ed. C. Eastman, P. Teicholz, R. Sacks, K. Liston, Wiley & Sons, New Jersey, 2011

---

## Ringraziamenti

---

Alla fine di questo percorso, mi sembra doveroso ringraziare chi è stato presente in questi anni: per primo ringrazio i miei genitori e i miei fratelli per gli sforzi e i sacrifici fatti e per non avermi fatto mancare l'affetto anche da lontano.

Ringrazio tutte le persone che ho incontrato a Torino, città che considero come una seconda casa.

Un doveroso ringraziamento va alla Professoressa Anna Osello, direttrice del Laboratorio Drawing to the Future: unico nel suo genere.

Un particolare ringraziamento va alla Dott.ssa Arianna Fonsati che ha mi seguito durante il percorso in maniera costante, senza mai lasciarmi indietro.

Un ringraziamento va agli Ingegneri dello Studio Lombardi per il materiale fornito per la tesi.

Un ringraziamento va ai professori e a tutto il personale del Politecnico di Torino, per lo sforzo fatto per garantire a noi studenti di studiare e di laurearci in questo periodo di emergenza.

ALDO EMANUELE LUCENTE, Catanzaro, Marzo '20

