POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile LM-23

Tesi di Laurea Magistrale

Applicazione della metodologia BIM

all'ingegneria geotecnica:

il caso di uno scavo in contesto urbano



Relatore

Prof. Monica Barbero

Candidato

Domenico Repaci

Correlatori

Prof. Anna Osello

Prof. Marta Castelli

A.A.2018/2019

ABSTRACT

The application of the BIM (Building Information Modeling) methodology is becoming increasingly widespread in the world of civil works construction. Although this is fairly consolidated in the building sector, in the geotechnical one, the process has yet to be developed and implemented.

For this reason, the aim of this thesis is to contribute to the development of BIM modeling in a geotechnical design process, with the aim of verifying interoperability with geotechnical analysis softwares.

Through the use of the documentation provided by AK Ingegneria Geotecnica Srl company, it was possible to carry out the thesis study referring to a real case of a provisional bulkhead at the entrance of the tunnel of certer Sicily.

After a detailed analysis of the available data, in the first phase of the thesis work, the BIM model of the geotechnical work was realized with the respective threedimensional geological model of the surrounding subsoil. Subsequently, following a modeling of the construction phases including the excavations and the insertion of the bulkhead, the interoperability with the geotechnical software based on the finite element method (FEM) Plaxis was verified, in which the necessary analyzes were performed.

In conclusion, several advantages that a BIM modeling can offer in the design of a geotechnical engineering problem, have been highlighted. The possible future developments have also been expressed, for the purpose of optimizing the inclusion of this process, considered the future of the design, construction and management of engineering works, to enjoy the use of all its benefits.

ABSTRACT

L'applicazione della metodologia BIM (Building Information Modeling) si sta sempre più diffondendo nel mondo delle costruzioni di opere civili. Sebbene questa risulti abbastanza consolidata nel settore edilizio, nel campo dell'ingegneria geotecnica, lo sviluppo e l'attuazione di tale processo, appare qualche anno in ritardo.

Per questo motivo, l'obiettivo del presente elaborato di tesi, è dare un contributo allo sviluppo dell'implementazione della modellazione BIM in un processo di progettazione di un'opera geotecnica, con l'intento di verificare l'interoperabilità con i software di analisi geotecnica.

Mediante l'utilizzo della documentazione fornitaci dall'azienda AK Ingegneria Geotecnica Srl, è stato possibile svolgere lo studio di tesi riferendosi ad un caso reale di una paratia provvisionale di presidio all'imbocco di una galleria del centro Sicilia.

Dopo un'analisi dettagliata dei dati a disposizione, nella prima fase del lavoro di tesi, si è realizzato il modello BIM dell'opera geotecnica con il rispettivo modello geologico tridimensionale del sottosuolo circostante. Successivamente, a seguito di una modellazione delle fasi costruttive comprendenti gli scavi e l'inserimento dell'opera, si è verificata l'interoperabilità col software geotecnico basato sul metodo agli elementi finiti (FEM) Plaxis, nel quale sono state eseguite le dovute analisi.

In conclusione, sono stati evidenziati i diversi vantaggi che una modellazione BIM può offrire nella progettazione di un'opera di ingegneria geotecnica. Sono stati inoltre espressi i possibili sviluppi futuri finalizzati ad un'ottimizzazione nell'inserimento di tale processo che consenta di sfruttare tutti i benefici di tale metodologia, considerata il futuro della progettazione, costruzione e gestione delle opere ingegneristiche.

INDICE

1.	INT	RODUZIONE	11			
2.	BIM	BUILDING INFORMATION MODEL	15			
1	.1	BIM	15			
1	.2	Storia ed evoluzione del metodo	17			
1	.3	BIM nelle normative internazionali	20			
1	.4	ll BIM nella Normativa Italiana	23			
1	.5	Geotechnical BIM	26			
3.	3. CASO STUDIO					
1	.6	Inquadramento generale	31			
1	.7	Paratia all'imbocco della Galleria del centro Sicilia	35			
1	.8	Fasi costruttive e materiali utilizzati per la realizzazione della paratia	42			
4.	MO	DELLAZIONE BIM DEL CASO STUDIO	46			
1	.9	Workflow modellazione	46			
1	.10	Creazione del modello informativo del terreno	47			
1	.11	Creazione del modello informativo dell'opera geotecnica	62			
1	.12	Fasi di scavo e processo costruttivo dell'opera geotecnica	67			
5. ANALISI DI INTEROPERABILITÀ TRA I SOFTWARE REVIT E PLAXIS 3D						
1	.13	Trasferimento dei dati da Revit a Plaxis3D	76			
1	.14	Analisi FEM del modello importato su Plaxis3D	83			
1	.15	Interpretazione dei risultati ottenuti dall'analisi FEM	95			
6.	CON	ICLUSIONI	103			

INDICE FIGURE

Figura 4.26 Paratia di micropali multiancorati	67
Figura 4.27 Estratto dello script per la creazione del solido di scavo	69
Figura 4.28 Solido di scavo creato con Dynamo	69
Figura 4.29 Fasi del processo di costruzione	70
Figura 4.30 Modello informativo del terreno con l'opera geotecnica	71
Figura 4.31 Rappresentazione della sesta costruttiva	72
Figura 4.32 Rappresentazione dell'opera interamente inserita nel terreno	73
Figura 5.1 File importati nel software	77
Figura 5.2 Famiglie supportate da Plaxis	78
Figura 5.3. Impostazione dell'esportazione del solido	79
Figura 5.4 Modello in formato DXF	80
Figura 5.5 Parametri elementi esportati	80
Figura 5.6 Estratto dello script per ridurre la mesh	81
Figura 5.7 Modello con la maglia mesh ridotta	82
Figura 5.8 Elementi rappresentanti la paratia	82
Figura 5.9 Interfaccia software Plaxis 3D	
Figura 5.10 Parametri relativi ai Calciduriti	85
Figura 5.11 Parametri relativi alla paratia	86
Figura 5.12 Parametri relativi alle travi di ripartizione	87
Figura 5.13 Parametri Ancoraggio	88
Figura 5.14 Comportamento Grout body del bulbo di ancoraggio	88
Figura 5.15 Parametri bulbi d'ancoraggio	89
Figura 5.16 Modello paratia multiancorata	89
Figura 5.17 Modello del terreno	
Figura 5.18 Mesh Modello	91
Figura 5.19 Paricolare Mesh Paratia	91
Figura 5.20 Stage Construction	92
Figura 5.21 Impostazione fase iniziale di calcolo	93
Figura 5.22 Fase di annullamento deformazioni iniziali	
Figura 5.23 Impostazione pretensione	94
Figura 5.24 Rappresentazione ultima fase di analisi	94
Figura 5.25 Posizione delle sezioni analizzate	95
Figura 5.26 Spostamenti orizzontali	
Figura 5.27 Valori sforzo normale nei tiranti estratti dalla relazione tecnica	97
Figure 5.28 Valori di sforzo normale nei tiranti estratti da Plaxis	
Figura 5.29 Valori massimi travi di ripartizione estratti dalla documentazione	
Figura 5.30 Valori massimi delle travi di ripartizione estratte da Plaxis 3D	
Figura 5.31 Valori di massimo spostamento dalla relazione tecnica	100
Figura 5.32 Valore di massimo spostamento estratto da Plaxis 3D	100

1. INTRODUZIONE

Il mondo delle costruzioni è caratterizzato, per sua natura, da un elevato livello di disorganizzazione che ne inficia, troppo spesso, il processo di collaborazione tra tutte le figure coinvolte in un progetto. Si necessita, dunque, di adottare un sistema che consenta di gestire in modo efficace ed efficiente tutte le informazioni in gioco. Nasce così il BIM (Building information Modeling), una metodologia che consente di creare un modello virtuale contenente tutte le informazioni di un processo costruttivo. Inoltre, caratteristica principale di tale approccio, è il lavoro collaborativo tra le entità interessate le quali, per quanto loro concesso, hanno la possibilità di accedere al modello informativo, inserendo, estraendo, aggiornando o modificando informazioni.

Il presente elaborato di tesi è volto a verificare la possibile implementazione della metodologia BIM all'ingegneria geotecnica. In funzione dei due concetti cardini dell'approccio BIM, è possibile suddividere il lavoro di tesi in due sezioni principali: la prima dedicata alla creazione di un modello informativo di un'opera geotecnica, la seconda focalizzata sulla verifica del possibile scambio d'informazioni tra un software di modellazione BIM ed uno di analisi geotecniche. A sostegno di quest'ultimo obiettivo, sono state condotte delle verifiche FEM finalizzate a dimostrare la validità della comunicazione tra i due software.

Il caso studio preso in esame fa riferimento al progetto di adeguamento alla categoria B di una strada statale, secondo le norme del DM 5.11.2001.

In particolare, la modellazione BIM, si focalizza su una delle due paratie provvisionali di presidio all'imbocco di una galleria del centro Sicilia, con il rispettivo modello geologico del sottosuolo circostante.

Come verrà discusso di seguito, la modellazione BIM orientata alle opere geotecniche, risulta essere un processo più complesso rispetto le costruzioni di tipo puntuale. A differenza di quest'ultime, in cui il modello è confinato alla stessa

opera, in un progetto geotecnico risulta necessario considerare le interazioni con l'ambiente circostante.

La prima fase del processo di tesi consiste nel ricavare le superfici stratigrafiche delle varie unità geotecniche costituenti il sottosuolo dove hanno sede le opere prese in analisi, tramite le informazioni estratte da indagini geotecniche effettuate in sito, le carte geologiche riguardanti l'area in esame e le sezioni del terreno estratte dalla documentazione fornita. Da tali superfici, successivamente, verranno generati i solidi delle rispettive unità geotecniche ai quali saranno attribuiti le opportune informazioni.

Tali operazioni, descritte più dettagliatamente in seguito, rappresentano le fasi per la creazione del modello BIM del terreno.

Una volta creato il modello informativo del terreno, si è passati alla modellazione della paratia di imbocco. Il primo passo è stato quello di georeferenziare all'interno del modello tridimensionale il tratto in cui si sviluppa l'opera. Successivamente, nota la collocazione geografica, creando oggetti tridimensionali di micropali, tiranti e travi costituenti la struttura ed attribuendo loro le rispettive proprietà, è stato possibile realizzare il modello BIM dell'opera geotecnica. Una volta generato il modello BIM completo, comprendente sia il modello geologico del terreno sia quello dell'opera di sostegno, si è simulato il processo costruttivo rappresentando le varie fasi di inserimento dell'opera e di scavo.

Nella parte conclusiva della tesi, sfruttando come caso esempio il modello BIM creato, si è verificata l'interoperabilità con un software di analisi FEM. Il passaggio di informazioni tra i due software, se è valido, comporta grandi vantaggi in fase di progettazione: permette di analizzare diverse soluzioni in maniera più speditiva e limita la possibile perdita di informazioni. Quanto detto si traduce in ottimizzazione del processo di progettazione.

2. BIM: BUILDING INFORMATION MODEL

Nel seguente capitolo si introdurranno alcuni concetti chiave della metodologia BIM presentando il panorama attuale a livello mondiale e, successivamente, italiano, in termini di normativa e progresso. Infine, ci si focalizzerà sul BIM applicato all'ingegneria geotecnica (GeoBIM) evidenziando le differenze ed indicando i vantaggi nell'applicazione di tale metodo rispetto i processi tradizionali.

1.1 BIM

L'acronimo BIM (Building Information Modelling) fa riferimento ad una nuova filosofia di progettazione mirata alla gestione dei processi strutturali, infrastrutturali e manifatturieri attraverso un linguaggio parametrico informatizzato. Di fatto, la metodologia BIM consente di creare un modello virtuale dell'opera, ancor prima della sua realizzazione fisica e durante lo svolgimento delle sue fasi costruttive, offrendo così un'analisi di gran lunga più accurata ed efficiente rispetto i metodi di controllo tradizionali.

L'aspetto positivo di lavorare su un modello virtuale è l'individuazione di eventuali non conformità e incongruenze tra i vari livelli di progettazione i quali, a cantiere avviato, causerebbero significative perdite di tempo e di compensi.

Tale processo implica l'esigenza di utilizzare sistemi informativi capaci di offrire la possibilità di gestire, in modo appropriato, le informazioni e il loro interscambio all'interno di un ambiente di lavoro condiviso, dinamico, interdisciplinare e accessibile alle diverse figure professionali facenti parte di un determinato progetto (Architetti, Ingegneri, Consulenti, Geometri, ecc.). Questo permette di dirigere la modellazione in tutte le sue fasi di progetto, dal preliminare all'esecutivo, in tutti i suoi livelli (strutturale, impiantistico, energetico, ecc.) e per

tutto il ciclo di vita del progetto, dalla progettazione alla manutenzione finale (Figura 2.1).



Figura 2.1 BIM: ciclo di vita di un progetto (http://www.ccberchet.it/cos-e-un-modello-bim/)

È possibile quindi affermare che, il modello virtuale, non risulta una semplice rappresentazione tridimensionale ma un modello dinamico contenente informazioni riguardanti (*Figura 2.2*):

- Geometria;
- Materiali: caratteristiche e quantità;
- Struttura;
- Sicurezza;
- Costi;
- Prestazioni energetiche;
- Impianti;
- Manutenzione;
- Dismissione.



Figura 2.2 Informazioni nel modello dinamico (https://www.acca.it/portals/0/Immagini/BIM/bim-buildinginformation-modeling_infografica.jpg)

1.2 Storia ed evoluzione del metodo

Il significato dell'acronimo BIM ha assunto, nel corso degli anni, diverse associazioni in funzione dell'evoluzioni della metodologia. Tali variazioni sono legate alla lettera M che mirava a rappresentare gli aspetti che, nel corso del tempo, sembravano maggiormente rappresentativi. Di fatto, sono stati utilizzati i seguenti termini:

- Model;
- Modeling;
- Management.

Tali parole vengono utilizzate opportunamente in funzione del contesto di applicazione: Model fa riferimento al solo modello virtuale dell'edificio, Modelling

identifica l'intero ciclo del processo edilizio che definisce il modello ed infine Management che rappresenta la gestione e l'organizzazione delle informazioni.

L'acronimo BIM, inteso come Model, fu introdotto nel 1974 in una pubblicazione di Charles M. Eastman, prof.re del Georgia Istitute of Technology, col titolo "*An outline of the building descrition system-1974*". Già nel '74, Eastman manifestava il bisogno di introdurre un "sistema descrittivo" dell'edificio tramite elementi tridimensionali contenenti informazioni non solo geometriche, ma anche relative ai materiali. Un estratto di tale articolo cita le seguenti parole:

"Molti dei costi di progettazione, costruzione e funzionamento edilizio derivano dal ricorso a disegni come modalità per riportare le annotazioni dell'edificio.

Come alternativa, il presente documento delinea la progettazione di un sistema informatico utile per memorizzare e manipolare le informazioni di progetto in un dettaglio che consente la progettazione, la costruzione e le analisi operative. Un edificio è considerato come la composizione spaziale di un insieme di parti. Il sistema, denominato Sistema Descrittivo dell'Edificio (BDS) è caratterizzato dall'essere:

- 1. un mezzo per un facile inserimento grafico di forme di elementi arbitrariamente complessi;
- 2. un linguaggio grafico interattivo per modificare e configurare la disposizione degli elementi;
- 3. capacità grafiche in formato cartaceo che possono produrre prospettiva o disegni ortografici di alta qualità;
- 4. una funzione per l'ordinamento e la schematizzazione, che consenta l'ordinamento della base-dati per attributi, per esempio, per il tipo di materiale, fornitore o componendo un insieme di dati per l'analisi."

Il Professore propone un software capace di gestire elementi singoli estratti da una galleria al fine di assemblarli e generare un modello di edificio completo, tramite un'interfaccia grafica che utilizza proiezioni ortogonale e assonometriche. Tali oggetti erano in grado di contenere la descrizione geometrica, informazioni riguardanti le caratteristiche dei materiali, dati relativi a fornitori e caratteristiche tecniche.

Da un punto di vista tecnologico, il BIM può ritenersi parte di un percorso che nasce nella seconda metà degli anni '50 dove, negli USA, si cominciarono a sviluppare i primi formati grafici elettronici. Questi inizialmente non ebbero grande successo commerciale ma furono sintomo che qualcosa stesse cambiando nel mondo digitale dell'industria dell'architettura, dell'ingegneria e delle costruzioni.

Di fatto, qualche anno dopo, nel 1963 fu presentato, per la prima volta, il software **Sketchpad**, sviluppato da Ivan E. Sutherland al MIT di Boston. Esso fu il primo strumento in grado di tracciare primitiva geometriche su uno schermo tramite un primordiale mouse ottico. Questo rappresenta il precursore dei moderni CAD e dell'interfaccia grafica utente poiché permette all'operatore di interagire con la macchina con rappresentazioni grafiche.

Durante gli anni '60, si vedrà così una rilevante parte del mondo focalizzare i propri sforzi verso lo sviluppo e l'implementazione di metodologie in grado di sviluppare la modellazione tridimensionale. A partire da questi anni, l'industria automobilistica, navale e aereospaziale colsero subito i vantaggi derivanti dall'uso dei CAD in termini di maggiore rapidità dei lavori e rielaborazione di progetti, riduzione degli errori ed avanzamento dell'automazione in fabbrica. Tali settori, costituiti da aziende ben strutturate, erano i soli a poter sostenere gli elevati costi degli hardware e software dell'epoca e cominciarono a dotarsi di propri CAD e a svilupparli affrontando le criticità. Nella seconda metà degli anni '70, in concomitanza della riduzione dei costi e con l'inizio dei personal computer anche il mondo delle costruzioni cominciò ad utilizzare i sistemi CAD ma, esclusivamente, in modalità 2D.

Questi nuovi strumenti sostituivano quelli tradizionali che risultavano notevolmente più lenti: dai disegni rappresentati tramite tecnigrafo si passa a modelli creati al computer e stampati tramite plotter.

Un ulteriore punto di svolta nell'evoluzione informatica nel campo della grafica fu negli anni '80 con l'avvento della modellazione parametrica ad oggetti. Agli elementi grafici era possibile assegnare un significato parametrico capace di offrire numerosi vantaggi nella gestione del progetto: mentre nei CAD 2D/3D tradizionali era l'operatore che editava ogni aspetto della geometria e verificava la congruenza derivante dalle modifiche, tale processo veniva effettuato direttamente dal software. In tal modo, gli oggetti vengono definiti "intelligenti" per la loro capacità di aggiornarsi in maniera autonoma in risposta alle modifiche effettuate dall'utente. Ne consegue un modello virtuale dinamico e in continuo aggiornamento attraverso una propagazione delle modifiche apportate.

Da questo momento in poi si ha il passaggio ad oggetti contenenti non solo informazioni geometriche ma anche specifici parametri come caratteristiche termofisiche, resistenza meccanica, costo ecc. Si apre così una strada per una nuova tecnologia in continua evoluzione: il BIM.

1.3 BIM nelle normative internazionali

In contemporanea all'evoluzione tecnologica, anche le normative dei vari stati, che hanno capito fin da subito le evidenti potenzialità della metodologia BIM, hanno subito un considerevole cambiamento.

Negli USA il BIM viene utilizzato sin dall'inizio dell'anno 2000 e, successivamente, nel 2003 la GSA (General Services Administration – agenzia indipendente del governo federale degli Stati Uniti d'America) ha definito un programma nazionale per il 3D, il 4D ed il BIM, contenente le guide che descrivono la metodologia di lavoro nel campo delle costruzioni. La General Service Administration ha inoltre richiesto, a partire dal 2007, l'utilizzo del BIM per la "Spatial Program Validation" in modo da consentire ai team di progettazione di convalidare i requisiti dello "Spatial Program" con un metodo più veloce e preciso rispetto i tradizionali 2D. Contemporaneamente, i diversi progettisti sono stati incoraggiati ad utilizzare, in tutte le fasi del progetto, modelli BIM 3D e 4D.

Per quanto riguarda il continente europeo, il BIM diventerà il processo standard in tutta Europa e nel Mondo con l'integrazione nella legislazione per i contratti pubblici.

La direttiva **European Union Public Procurement Directive 2014/24** sugli appalti pubblici, invita i 28 Stati membri dell'UE a "incoraggiare, specificare o imporre" tramite provvedimenti legislativi dedicati, l'utilizzo del BIM come standard di riferimento per i progetti finanziati da fondi pubblici.

Tuttavia, sebbene esista tale direttiva europea, questa deve essere recepita dai diversi stati che la adattano secondo il proprio ordinamento giuridico. Di fatto, in funzione del recepimento della direttiva, è possibile definire un diverso livello di maturità nei confronti del BIM degli stati singoli di seguito elencato:

- Paesi avanzati come il Regno Unito e i Paesi Scandinavi (Finlandia, Norvegia, Svezia, Danimarca);
- Paesi in via di sviluppo come Spagna, Francia, Germania, Belgio, Lituania, Estonia ed Italia;
- Paesi non "BIMmizzati" i restanti paesi europei che non hanno inserito ancora il BIM nella propria normativa o che hanno approcciato il metodo di recente.

L'Inghilterra ha mostrato, fin da subito, un forte interesse nella modernizzazione del sistema delle costruzioni adottando il BIM sia per il settore pubblico che privato. Nel progetto normativo del 2011 il Governo annuncia l'intenzione di imporre la tecnologia BIM-3D collaborativa entro il 2016. Allo stesso tempo, la National Building Specification pubblica una National BIM Library che è una libreria digitale di oggetti gratuita ed utile per tutti i professionisti del settore delle costruzioni. Lo sviluppo e la ricerca sono fortemente motivati dai notevoli risparmi da parte del Governo britannico in termini di costi e tempi avvenuti a seguito dell'implementazione del BIM. Di fatto, si stima, che questi possano arrivare rispettivamente al 33% ed al 50% a partire del 2025.

Per quanto riguarda il Nord Europa, la tecnologia BIM è attiva dal 2000 e, di fatto, risultano i Paesi più all'avanguardia nell'evoluzione e nell'applicazione del processo.

La Finlandia è uno dei pochi paesi ad aver superato la fase di sperimentazione ed il BIM risulta realtà consolidata. Dall'Ottobre del 2007, l'azienda governativa responsabile del patrimonio immobiliare finlandese, il Senate Properties, rende obbligatorio l'uso di modelli BIM. Nello stesso anno, la SP pubblica le linee guida del processo le quali, nel 2012, con la collaborazione dello stato inglese, vengono aggiornate definendo le Common BIM requirements, conosciute come COBIM. Queste introducono novità importanti come l'inserimento di nuove figure professionali (BIM Specialist, BIM Coordinator e BIM Manager); la differenza tra BIM architettonico e BIM strutturale ed infine, si estende l'obiettivo nell'uso del BIM nell'intero ciclo di vita del manufatto.

Anche in Danimarca il BIM è reso obbligatorio dal 2007 ma è riferito solo ai lavori pubblici con importi superiori a 2,7 miliardi di euro. È importante sottolineare che l'orientamento della Danimarca è mirato alla digitalizzazione che si estende dalla fase di bando fino alla fase di consegna. Grande investimento del Governo che esprime l'interesse nel gestire il proprio patrimonio immobiliare.

In Norvegia e Svezia l'utilizzo del BIM è obbligatorio dal 2010 e gli enti che gestiscono i patrimoni degli Stati e contemporaneamente i Governi promuovono costantemente iniziative volte alla creazione e allo sviluppo degli standard OpenBIM (come gli IFC) al fine di utilizzarli per l'intero di vita del manufatto.

Spagna, Germania e Francia possono essere collocati in un gruppo in via di sviluppo, al pari dell'Italia. Questi Stati hanno intrapreso azioni per promuovere l'evoluzione digitale (adozione del BIM) attraverso gruppi di lavoro governativi ad hoc.

1.4 Il BIM nella Normativa Italiana

La normativa italiana, con l'introduzione della direttiva europea, si sta adeguando all'introduzione di questa nuova tecnologia.

Ingegneri, Architetti, Progettisti e Costruttori, stanno assistendo ad un cambiamento storico nel campo delle costruzioni, legato all'emanazione di specifiche norme tecniche sul BIM che guidano la progettazione e le fasi costruzione di un'opera.

Tale processo, in Italia, segue diverse tappe fondamentali: il 18 Aprile 2016 (anno importante per il nostro Paese, riconosciuto in Italia come anno 0 del BIM) si ha l'introduzione del Nuovo Codice Appalti; nello stesso anno viene emanata la Norma UNI 11337, la prima vera norma tecnica italiana sul BIM ed infine, un passaggio importante si ha nel 2017, l'attuazione di un decreto ministeriale da parte del Ministero dei Trasporti e delle Infrastrutture (DM 560/2017).

La Norma del 2016 è composta da 8 parti ma, di seguito, analizziamo di seguito quelli che definiscono la gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni (parte 1, 4 e 5).

La normativa UNI 11337-1 si riferisce a:

- 1) Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi;
- 2) Sviluppo ed evoluzione informativa di modelli, elaborati ed oggetti;
- 3) Flussi informativi nei processi digitalizzati;
- 4) Struttura informatica del prodotto.

La UNI 11337-4 riguarda gli aspetti qualitativi e quantitativi nella gestione digitalizzata di un processo, definendo gli obiettivi di ciascuna fase introdotta nell' UNI 11337-1. Con tale norma si introduce una versione italiana dei LOD (Level of Development) ovvero, i livelli di sviluppo degli oggetti digitali. In tal modo, quest'ultimi, diventano lo strumento al raggiungimento degli obiettivi delle fasi. La parte 4 della norma definisce anche lo stato di lavorazione e approvazione del contenuto informativo, di seguito indicate, entrambe definite da 4 livelli:

- L0: in fase di elaborazione e aggiornamento;
- L1: in fase di condivisione;
- L2: in fase di pubblicazione;
- L3: in fase di archivazione;
- L3.V: archiviato ma non ancora valido;
- L3.S: archiviato ma superato per lo sviluppo;
- A0: da approvare;
- A1: approvato;
- A2: approvato con commento;
- A3: non approvato.

La Norma UNI 11337-5 indica la gestione dei flussi informativi definendo i ruoli e i requisiti del processo di digitalizzazione. Questo introduce una nuova terminologia finalizzata a creare un parallelismo con le PAS inglesi. Si introducono nuove figure professionali come il BIM Coordinator che ha il ruolo di coordinatore delle informazioni; il BIM Manager che gestisce il processo ed infine, il BIM Specialist, modellatore delle informazioni. Vengono inoltre inseriti il CI (Capitolato Informativo), l'oGI (offerta per la Gestione Informativa), il pGI (piano per la Gestione Informativa), l'analisi delle interferenze geometriche, l'ambiente di condivisione dei dati e l'archivio di condivisione dei documenti.

La norma UNI 11337 segna un grande passo verso un processo di digitalizzazione del campo edile e delle costruzioni in Italia che porterà, inevitabilmente, ad un netto miglioramento in termini di qualità e gestione della progettazione e costruzione dell'opera. Tale norma è applicabile a un qualsiasi tipo di prodotto (come un edificio, un'infrastruttura, un intervento territoriale) e in qualunque tipo di processo (ideazione, produzione, riqualificazione dell'esistente, progettazione ex novo, conservazione).

Per quanto riguarda il decreto DM 560/2017 dell'1/12/17 ed entrato in vigore il 12/01/2018, firmato dal Ministro delle Infrastrutture e dei Trasporti, Graziano Delrio, definisce le modalità e i tempi di progressiva introduzione dell'obbligatorietà BIM come metodologia obbligatoria in Italia a partire dal 2019. Tale decreto è costituito da 9 articoli e, tra questi, si riscontrano alcune novità di seguito sintetizzate analizzando gli Art.3, 5, 6:

- Art.3: le stazioni appaltanti devono attrezzarsi definendo personale idoneo per gestire il processo collaborativo e munendosi di hardware adeguati (entro i termini dell'Art.6);
- Art.5: il BIM può essere requisito di ammissione gara solo se la stazione appaltante può supportarlo, altrimenti può essere inteso come premio in sede di offerta;
- Art.6: il BIM diventa obbligatorio in modo graduale per le opere di importo a base gara:
 - a) Pari o superiore a 100 milioni, a decorrere dal 1gennaio 2019;
 - b) Pari o superiore a 50 milioni, a decorrere dal 1gennaio 2020;
 - c) Pari o superiore a 15 milioni, a decorrere dal 1gennaio 2021;
 - d) Pari o superiore a importi: vedasi art.35¹⁷Dlgs 50/2016, a decorrere dal 1gennaio 2022;
 - e) Pari o superiore a 1 milioni, a decorrere dal 1gennaio 2023;
 - f) Inferiore a 1 milioni, a decorrere dal 1gennaio 2025.



Figura 2.3 Obbligatorietà del BIM secondo il Decreto Ministeriale 560/2017 (https://webapi.ingenioweb.it/immagini/file/2558)

1.5 Geotechnical BIM

L'ingegneria geotecnica è la branca dell'ingegneria che unisce geologia e fisica per modellare il comportamento fisico del suolo e delle rocce. Quindi, utilizzando i principi della meccanica delle terre e delle rocce, permette di studiare le condizioni e i materiali del sottosuolo, determinare le proprietà fisiche, meccaniche e chimiche di questi materiali, valutare la stabilità di pendii naturali ed artificiali, valutare i rischi relativi alle condizioni del sito, progettare lavori in terra ed infine fondare delle strutture.

Al centro dell'ingegneria geotecnica si trova l'ingegnere geotecnico che "ingegnerizza" il comportamento del suolo. Questo è necessario farlo poiché, qualsiasi cosa venga costruita, questa verrà inserita in superficie o nel sottosuolo e, senza uno studio appropriato, vi è un considerevole aumento del rischio di collasso. Di fatto, le condizioni invisibili del terreno sotterraneo sono tra le maggiori aree di rischio e incertezza in qualsiasi progetto di costruzione.

I principi del BIM possono essere applicati alla geotecnica per aiutare a ridurre l'incertezza e produrre una migliore indagine del sito adatta al progetto, al fine di diminuire rischi e costi. Tali fattori da ridurre, rappresentano proprio la premessa della metodologia BIM e, sebbene l'uso di questa sia cresciuto in modo massiccio nel campo dell'edilizia, il non sviluppo di tale approccio nei confronti di geologia e sottosuolo rappresenta un'omissione significativa che ne inficia l'applicazione generale.

L'utilizzo del Geotechnical BIM (GeoBIM) migliora diversi aspetti che verranno di seguito indicati.

Innanzitutto, una delle funzioni principali, è quella di offrire la possibilità di digitalizzare ed informatizzare tutte le informazioni relative al sito in esame. Questo consiste in un'archiviazione di tutti i dati geotecnici relativi ad indagini passate che permettono di programmare un adeguato piano di sondaggio, mirato sia ad investigare ulteriormente criticità già evidenziate e sia a colmare zone non ancora analizzate.

È chiaro ed evidente che, uno studio preliminare sulla locazione dei vari sondaggi esplorativi, garantisce sia una riduzione dei costi, poiché esclude le aree già indagate, sia diminuisce i rischi offrendo una possibile anteprima delle criticità possibili riscontrabili nel corso della costruzione dell'opera.

Al fine di garantire questa completa digitalizzazione è opportuno che tutti i dati geotecnici abbiano un unico formato, compatibile con i diversi software che operano in ambito BIM. Purtroppo, tale condizione non è stata ancora raggiunta, di fatto, gran parte delle informazioni, viene spesso persa poiché presente solo in forma cartacea o in file utilizzati per un unico progetto.

Continuando l'analisi sulle migliorie offerte con l'utilizzo del BIM, è doveroso indicare i vantaggi in termini di modellazione e progettazione di un qualsiasi progetto esterno od interno al terreno. Tramite il quadro informativo generale prima descritto, l'ingegnere geotecnico, attraverso proprie interpretazioni, è in grado di fornire un modello geotecnico comprendente la volumetria dei diversi materiali che compongono il terreno, le eventuali zone di fratture, i possibili livelli delle acque sotterranee ecc. Su tale modello, che definisce l'ambiente fisico per una qualsiasi opera (strada, tunnel, ferrovia ecc.), bisognerà effettuare le opportune considerazioni al fine di progettare la generica costruzione. Questo rappresenta un grosso vantaggio poiché, potendo così rappresentare nello stesso strumento di progettazione sia il modello geotecnico che la struttura, è possibile ottenere un risultato migliore avendo un quadro di insieme. Inoltre, essendo il BIM un modello dinamico, capace di seguire l'evoluzione del progetto durante la realizzazione, permette di analizzare diverse alternative e di essere aggiornato nel caso in cui si incontrino problemi in corso d'opera.

Infine, l'ultimo aspetto fondamentale che migliora in seguito alla modellazione in BIM, risulta essere la visualizzazione. Al giorno d'oggi, sebbene i professionisti del settore geotecnico, a seguito di un'analisi dei dati e dei sondaggi, pensino e visualizzino la situazione del suolo tridimensionalmente, questi sono costretti a trasmettere le informazioni tramite report contenenti sezione del sito 2D. La figura successiva, che prende visione di tali elaborati e deve procedere con le fasi seguenti della progettazione, è costretta a decifrare le informazioni e ricrearsi un'immagine 3D del modello geotecnico. Per questo motivo, una buona visualizzazione offre grandi vantaggi e il suo potenziale è tanto maggiore quanto meno il pubblico che osserva conosce la geotecnica. Di fatto, sono molteplici le persone a cui interessano i dati geotecnici: dall'ingegnere geotecnico a professionisti di altre discipline ingegneristiche, dal cliente al committente o a qualsiasi altra figura interessata. Rappresenta quindi uno strumento di comunicazione adeguato di tutto il lavoro geotecnico che consente di far comprendere a chiunque gli eventuali problemi che potrebbero influenzare un progetto.

3. CASO STUDIO

Il seguente capitolo tratterà il caso studio preso in esame per testare l'applicabilità della metodologia ad un progetto di ingegneria geotecnica. In particolare, l'opera considerata è una paratia provvisionale di presidio all'imbocco di una galleria. Dapprima verrà effettuato un inquadramento generale dell'opera con una breve descrizione del progetto completo all'interno del quale questa è inserita. Successivamente verranno descritte le caratteristiche e le scelte progettuali dell'opera effettuate dall'azienda "AK – Ingegneria Geotecnica". Le seguenti informazioni costituiranno le basi per la costruzione del modello BIM.

1.6 Inquadramento generale

La progettazione dell'opera geotecnica considerata si trova all'interno di un lavoro di ammodernamento e di adeguamento alla cat. B, secondo le norme DM 5.11.2001, di una strada statale del centro Sicilia.

La S.S. è un importante collegamento stradale e rappresenta il percorso preferenziale tra la Sicilia Centro – Orientale (provincie di Enna, Catania e Messina) e il settore Sud – Occidentale dell'isola. Tale infrastruttura inoltre, collega i principali assi autostradali della Sicilia.

Il progetto di ammodernamento e raddoppio della S.S. si estende complessivamente per 28.08 km, attraversando diversi comuni del centro Sicilia *(Figura 3.1).*



Figura 3.1 Percorso S.S.640

L'intero tracciato in progetto è stato suddiviso in molteplici tratti omogenei per caratteristiche geologiche ed opere da realizzare.

Nel presente elaborato di tesi tratteremo un'opera geotecnica che si colloca nel tratto tra la progressiva chilometrica di progetto 25.200 e la progressiva 26.600 *(Figura 3.2).*



Figura 3.2 Tratto tra la progr. Km di progetto 25.200 (sinistra) e 26.600 (destra)

Tale tratto, insiste su due differenti litologie e modelli geologico-tecnici: la prima parte ed il segmento finale ricadono su depositi continentali di tipo alluvionale con formazione recente; la zona centrale invece interseca la formazione Terravecchia di età tortoriana. Quest'ultima è un'unità litologicamente costituita in prevalenza da argille (Calciduriti) ed argille marnose mentre, i depositi che caratterizzano l'ampia pianura in corrispondenza del *Vallone Arenella e del Fiume Salso*, sono costituiti principalmente da ghiaie e sabbie immerse in matrice limo sabbiosa, generalmente incoerenti e poco coesive.



Figura 3.3 Carta geologica del sito in esame

Come si può vedere dall'immagine sopra riportata (Figura 3.3), la galleria si trova in corrispondenza del complesso argilloso. Tale zona, essendo caratterizzata da un'alternanza di Calciduriti e livelli argillo – marnosi incoerenti o poco coerenti tra di loro, può generare fenomeni di dissesto superficiale con crolli e movimenti di scivolamento. Tali frane si verificano soprattutto in occasione di eventi caratterizzati da abbondanti piogge le quali, imbibendo i vari livelli, causano una perdita di coerenza generando dei piani di scivolamento coincidenti con gli strati argillosi (*Figura 3.4*).



Figura 3.4 Sezione geologica in corrispondenza della galleria del centro Sicilia

Per tener conto delle problematiche prima indicate, nella fase di progettazione della galleria e delle opere a corredo, sono state verificate diverse geometrie di progetto al fine di garantire l'integrità dell'infrastruttura realizzata.

Il risultato delle diverse varianti analizzate prevede di posizionare l'opera tra le sezioni 1041 e 1053, rispettivamente alle progressive chilometriche 25+807.158 e 26+041.032 dell'intero progetto. La galleria, con canna sinistra di lunghezza pari 233.0 m e canna destra di 209.0 m, ha un ricoprimento che nella parte centrale supera i 25 m e verrà ricavata tramite scavo tradizionale a piena sezione, con sagomatura del fronte a forma concava.

L'inizio dello scavo della galleria è preceduto dall'installazione, in entrambi gli imbocchi, di due opere di stabilizzazione e sostegno degli scavi realizzate mediante paratie provvisionali di micropali progettate in modo opportuno.

Di seguito viene illustrata la soluzione progettuale dell'opera di sostegno provvisionale per l'imbocco lato sinistro che rappresenta il caso studio analizzato durante il lavoro di tesi (*Figura 3.5*).



Figura 3.5 Soluzione progettuale dell'opera di sostegno provvisionale

1.7 Paratia all'imbocco della Galleria del centro Sicilia

La paratia all'imbocco della galleria è un'opera di presidio provvisionale costituta da micropali multi-ancorati. Tale opera, con funzione di stabilizzazione e sostegno degli scavi, ha una geometria studiata in modo tale da minimizzare il più possibile gli sbancamenti necessari per inserire la galleria e, allo stesso tempo, permette una sistemazione definitiva dei versanti che rispetta la morfologia originaria.

L'opera, posizionata in corrispondenza della sezione d'attacco della galleria posta alla prog. Km 25+834, ha uno sviluppo di 90.94 m secondo l'asse dei micropali, è suddivisa in 5 tratti e arriva ad un'altezza massima fuori terra pari a 16 m in corrispondenza della canna sinistra. Le scarpate che circondano la paratia sono sagomate con una pendenza 2 (verticale):3 (orizzontale); date le caratteristiche meccaniche dei terreni interessati, adeguati margini di sicurezza nei confronti della stabilità (*Figura 3.6*).



Figura 3.6 Paratia della galleria lato sinistra

La progettazione dell'opera è stata eseguita in conformità con quanto scritto nel Capitolo 6 "Progettazione Geotecnica" della Normativa DM 14.01.2008 – Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni. Tale decreto indica le diverse verifiche statiche e geotecniche da eseguire per le paratie che di seguito verranno ripotate in una tabella riassuntiva (tabella 2.1).

INDICE VERIFICA	VERIFICHE GEOTECNICHE	VERIFICHE DI RESISTENZA / CAPACITA'	ALTRO
SLE			Deformata della paratia
SLU/STR (A1+M1+R1)		resistenza strutturale della paratia, resistenza dei tiranti, puntoni (R1=1, vedi tabella 6.5.1) (sfilamento ancoraggi)	
SLU/GEO (A2+M2+xx)	Stabilità globale (A2+M2+R2, dove R2=1.1, vedi tabella 6.8.1) infissione (% della mobilitazione della spinta passiva) (A2+M2+R1, dove R1=1.0, vedi tabella 6.5.1)	sfilamento ancoraggi (A2+M2+R1, dove - R1=1.0) Per la resistenza allo sfilamento applicare fattori tabelle 6.6.I, 6.6.II e III	
SISMA (STR) A1*+M1+R1 A1* = 1.0		resistenza strutturale della paratia, resistenza dei tiranti (R1=1.0, vedi tabella 6.5.1) (sfilamento ancoraggi)	
---------------------------------------	---	--	
SISMA (GEO) A2+M2	(A2+M2+R2, dove R2=1.1, vedi tabella 6.8.1) infissione (% della mobilitazione della spinta passiva) (A2+M2+R1, dove R1=1.0, vedi tabella 6.5.1)	sfilamento ancoraggi (A2+M2+R1, dove – R1=1.0) Per la resistenza allo sfilamento applicare fattori tabelle 6.6.1, 6.6.II e III	

Tabella 3.1 Verifiche geotecniche e strutturali delle paratie

Secondo quanto riportato nella relazione di calcolo geotecnico, una volta eseguite le sopra indicate verifiche, tramite l'ausilio degli opportuni codici di calcolo che permettono di schematizzare l'interazione tra terreno e struttura e di valutare le sollecitazioni nei vari elementi, l'opera di sostegno progettata presenta le seguenti caratteristiche.

I micropali hanno un diametro di 240 mm e sono disposti con un interasse variabile: in corrispondenza delle gallerie è pari a 0.4 m mentre, nella restante parte, risulta pari a 0.5 a causa di motivi costruttivi. Questi sono armati con tubi in acciaio di diametro 168.3 mm e spessore di 12 mm. Essi sono collegati in testa attraverso un cordolo di calcestruzzo armato con sezione di 60x60cm. In corrispondenza delle due aperture della galleria, canna destra e sinistra, l'armatura all'interno dei micropali è sostituita con dei tubi in VTR dello stesso diametro ma con uno spessore di 20mm. L'ancoraggio della paratia è garantito attraverso la collocazione di un numero massimo di 6 ordini di tiranti costituiti da 4 trefoli nel tratto compreso tra le due canne e da 3 trefoli nelle restanti parti, da installare contestualmente con la progressione degli scavi.

L'azione di contrasto dei tiranti è distribuita sui micropali da travi di ripartizione in acciaio Fe430 costituite da doppi profilati metallici HEB 160/180.

Di seguito si riportano un'immagine rappresentante la sviluppata della paratia lungo gli assi dei micropali (*Figura 3.7*) ed uno schema riassuntivo delle caratteristiche progettuali dei tiranti (*Figura 3.8*):



Figura 3.7 Sviluppata della paratia lungo gli assi dei micropali

				L	EGENDA	TIRANTI					
		n" Tiranti	n* Trefoli	interasse	inclinaz	L libera	L bulbo	Ltotale	pretensione	travi	perforo
tot, fila a 23 tiranti	Fila a	15	3	3.2m	0*	14m	10m	24m	300KN	2HEA180	160mm
Fila a	1-2-3	з	3	3.0m	10*	13m	10m	23m	300MN	2HEA180	190mm
varianu	12-13-14 15-16	5	з	3.0m	°.	16m	10m	26m	210kN	2HEA200	190mm
tot, fila b 34 tiranti	Fila b	17	3	3.2m	0*	12m	13m	25m	300KN	2HEA180	160mm
	12-13 25-26	4	3	4.0m	10°	12m	13m	25m	300KN	2HEA200	160mm
Elle h	1-2-3-4-5	5	3	3.0m	10°	11m	10m	21m	300KN	2HEA180	190mm
Fila b varianti	32-33-34	3	3	3.0m	15°	11m	10m	21m	300KN	2HEA180	190mm
Verierierier	16-17-18 19-20	5	з	3.0m	۰ ⁽¹⁾	12m	14m	26m	300kN	2HEA200	190mm
tot, fila o 32 tiranti	Fila c	10	3	4.0m	0*	10m	11m	21m	300KN	2HEA200	160mm
	8-14 20-26	4	3	-	0"	10m	11m	21m	300KN	2HEA180	160mm
Fila c	1-2-3-4 5-6-7	7	з	3.0m	10*	10m	11m	21m	300kN	2HEA180	190mm
varianti	27-28-29 30-31-32	6	з	3.0m	15*	10m	11m	21m	300kN	2HEA180	190mm
	15-16-17 18-19	5	4	3.0m	۰ ⁽¹⁾	10m	14m	24m	300kN	2HEA200	190mm
tot, fila d 34 tiranti	Fila d	11	3	4.0m	0*	8m	13m	21m	300KN	2HEA200	160mm
	10-16 22-29	4	3	-	10"	8m	13m	21m	300KN	2HEA180	160mm
Fila d	1-2-3-4 5-6-7-8-9	9	3	3.0m	10"	8m	10m	18m	300KN	2HEA180	190mm
varianti	30-31-32 33-34	5	з	3.0m	15'	8m	10m	18m	300KN	2HEA180	190mm
	17-18-19 20-21	5	4	3.0m	۰ ⁽¹⁾	8m	19m	27m	300kN	2HEA200	190mm
tot, filo e 32 tiranti	Fila e	11	3	4.0m	0*	7m	11m	17m	300KN	2HEA200	160mm
	11-17 23-30	4	3	-	10°	7m	11m	17m	300KN	2HEA180	160mm
Fila e	1-2-3-4-5 5-7-8-9-10	10	з	3.0m	10"	6m	10m	16m	300KN	2HEA180	190mm
varianti	31-32	2	3	3.0m	15°	6m	10m	16m	300KN	2HEA180	190mm
	18-19 20-21-22	5	4	3.0m	۰ ۳	7m	17m	24m	300MN	2HEA200	190mm
	Nota 1		per la pari a	paratia di zero grad	imbosco li in corris	prevedere pondenza	la realizza della galler	zione dei : ia naturale	tiranti con in	clinazione	
	Nota 2		(*) i tiran direzio	rti della po me planime	ratia intern strica paral	nedia (tra lela agli a	le due ca ssi galleria	inne) sono (incl. 52'	realizzati co su asse par	n ratia)	
		PARA	TIA		EGENDA	TIRANTI			DRENI]
	PARATIA ARMATU INTERAS	IRA TUBO (941 Ø240m 9193.7/8mm	m _		NTE A Refoli	IN PRE PUNTU TUBO	SENZA DI E Ali prevede Filtrante m	VENTUALI VEN DRE MICROORE (ICROFESSURAT	UTE NEIN TO IN PVC	1
	EVENTU ARMATL Ø6 MAG	ALE CLS P IRA ; RETE SUA 15X15	ROIETTATO ELETTROSA Im	LDATA.	∲* 4π	nte a Refoli	Ø90mm INTERA INCLINØ	n L=12m SSE 3.0/3.3 TTO DI 51 M	im ERSO L'ALTO		
											-

Figura 3.8 Parametri progettuali relativi ai tiranti

Al fine di fornire una più completa descrizione dell'opera di sostegno vengono rappresentati qui di seguito alcune immagini che descrivono i particolari costruttivi in corrispondenza della congiunzione tra travi di ripartizione e le varie tipologie di tiranti utilizzati (*Figura 3.9 e 3.10*). Si riporta anche una sezione tipologica rappresentante un "tirante tipo" (*Figura 3.11*).



Figura 3.9 Particolare costruttivo del collegamento tirante-trave (Vista dall'alto)



Figura 3.10 Particolare costruttivo del collegamento tirante-trave (Vista laterale)



Figura 3.11 Particolare costruttivo del collegamento tirante-trave (Vista frontale)



Figura 3.12 Sezione tipologica "tirante tipo"

1.8 Fasi costruttive e materiali utilizzati per la realizzazione

della paratia

L'installazione dell'intera opera di sostegno avviene con una successione di fasi in accordo con l'avanzamento degli scavi che verranno di seguito indicati.

- <u>Fase A</u>: La prima fase consiste nell'effettuare uno sbancamento e una riprofilatura del terreno fino alla quota di imposta del cordolo posizionato nella parte superiore della paratia.
- <u>Fase B</u>: Dopo la fase di sbancamento segue il processo di realizzazione dei micropali tramite le operazioni di perforazione, iniezione e maturazione.
- <u>Fase C</u>: Successivamente si procede con la realizzazione della trave di coronamento in sommità con dimensioni 60x60 cm.
- <u>Fase D</u>: In questa fase inizia lo scavo di ribasso fino ad una quota pari a
 0.5 m al di sotto della prima fila di tiranti.
- <u>Fase E</u>: A seguito della fase D avviene l'installazione della prima fila di tiranti tramite i processi di perforazione, inserimento di trefoli di armatura e cementazione, messa in carico (precarico) e verifica mediante prova di collaudo. In corrispondenza della sezione dove vi è il fronte d'attacco della galleria, in questa fase, si introduce l'esecuzione del consolidamento al fronte fino alla quota del piano di scavo.
- <u>Fase F...Q</u>: Durante queste fasi vengono ripetute le Fasi D ed E per l'installazione delle restanti 5 file di tiranti.
- <u>Fase R</u>: In quest'ultima fase si esegue l'ultimo sbancamento sino al piano di fondo scavo sul quale poi poggerà l'infrastruttura.

Per quanto riguarda i materiali utilizzati per la realizzazione dell'opera di sostegno si riporta di seguito un elenco comprendente le caratteristiche meccaniche ad essi associati.

CALCESTRUZZI

CALCESTRUZZO MAGRO UNI EN 206-1 (2006)

– CLASSE DI RESISTENZA: C12/15

CLS PER OPERE STRUTTURALI UNI EN 206-1 (2006) UNI 11104 (2004)

- CLASSE DI RESISTENZA: C25/30
- CLASSE DI CONSISTENZA: S3
- CLASSE DI ESPOSIZIONE: XC2

CALCESTRUZZO PROIETTATO

- DESTINAZIONE D'USO UNI 10834: temporaneo strutturale
- CLASSE DI RESISTENZA: C15/20
- RESISTENZA MEDIA SU CAROTE $H/\Phi = 1 a 48h$: 15Mpa

MISCELE CEMENTIZIE

PER CEMENTAZIONE MICROPALI E INIEZIONE TIRANTI

- CLASSE DI RESISTENZA: C20/25
- RAPPORTO A/C: 0.5
- ADDITIVO FLUIDIFICANTE E ANTIRITIRO

PER INIEZIONI DI CONSOLIDAMENTO A BASSA PRESSIONE

- RAPPORTO A/C: 0.5-0.7
- CLASSE DI RESISTENZA CLS: C20/25
- ADDITIVO FLUIDIFICANTE E ANTIRITIRO

ACCIAIO

ACCIAIO PER ARMATURA CLS

BARRE $\emptyset \le 40$ mm: ACCIAIO B450C

- TENSIONE CARATTERISTICA DI SNERVAMENTO (fyk): 450MPa
- TENSIONE CARATTERISTICA A ROTTURA (ftk): 540MPa
- RETE ELETTROSALDATA

– TENSIONE CARATTERISTICA DI SNERVAMENTO (f_{yk}): 390MPa <u>ACCIAIO TUBI MICROPALI</u>

- TENSIONE CARATTERISTICA DI SNERVAMENTO: S355MPa

ACCIAIO ARMONICO STABILIZZATO PER TIRANTI DI ANCORAGGIO

- TENSIONE CARATT. A ROTTURA *f*_{ptk}: 1860MPa
- TENSIONE CARATT. ALL'1% DI DEFORMAZIONI TOTALI f_{p(1)k}: 1670MPa
- INIEZIONE AD ALTA PRESSIONE RIPETUTA

PROFILATI METALLICI PER TRAVI DI RIPARTIZIONE E PIASTRE

TENSIONE CARATTERISTICA DI SNERVAMENTO: S355MPa

BARRE IN VETRORESINA PER ARMATURA PALI

BARRE ROCKWORM DI ATP O EQUIVALENTI

- $\quad \text{RESISTENZA CARATTERISTICA, } f_{fk} : 505 MPa(\Phi 30 mm) : 610 \text{ (per } \Phi 20 mm) \\$
- MODULO DI ELASTICITA' NORMALE DELLA BARRA, E_f: 40000MPa

TUBI IN GFRP (GLASS FIBER REINFORCED POLYMER) PER ARMATURA MEDIOPALI

- RESISTENZA CARATTERISTICA A TRAZIONE, f_{tk}: 600MPa
- RESISTENZA CARATTERISTICA A TAGLIO, fvk: 35MPa
- MODULO DI ELASTICITA' E_{vtr}: 35000Mpa

4. MODELLAZIONE BIM DEL CASO STUDIO

Il seguente capitolo mira ad illustrare la metodologia applicata al fine di raggiungere il primo obiettivo prefissato: l'implementazione della modellazione BIM ad un'opera di ingegneria geotecnica.

Di seguito verrà rappresentato quello che è stato il modus operandi finalizzato alla creazione del modello informativo completo rappresentante l'opera progettata presa in esame.

1.9 Workflow modellazione

Nella modellazione di un'opera geotecnica non si può non considerare l'ambiente che la circonda, ovvero, il terreno in cui questa è inserita. Di conseguenza, la prima fase di tesi è finalizzata alla creazione di un modello informativo del sottosuolo. Tale modello, rappresentante la geometria della stratigrafia del sito in esame (superfici e volumi delle unità geologiche), è il risultato dell'informatizzazione e dell'interpretazione delle indagini geotecniche, delle mappe topografiche e geologiche ed infine delle sezioni bidimensionali del sito, reperiti dalla documentazione relativa al caso studio.

Per la costruzione del modello del sottosuolo sono stati utilizzati due diverse tipologie di software di Autodesk: **AutoCAD Civil 3D** che, con l'ausilio del plug-in *"Geotechnical Module"*, permette la rappresentazione georeferenziata delle indagini geognostiche e la creazione delle superfici stratigrafiche presenti all'interno del terreno e **Revit** che, a seguito dell'importazione delle superfici precedentemente create su Civil 3D tramite il plug-in *"Site Designer"*, consente la creazione dei solidi attraverso l'utilizzo di Dynamo, la piattaforma di programmazione grafica implementata su Revit.

Una volta generato il modello del terreno, l'opera strutturale, ovvero la paratia provvisionale di imbocco della galleria del centro Sicilia, costituita da micropali,

tiranti e travi di ripartizione è stata realizzata direttamente in ambiente **Revit** attraverso il plug-in *"Infrastructure Kit"*. Tale applicativo, tramite un file Excel opportunamente compilato con i relativi parametri progettuali dei diversi elementi strutturali, posiziona le famiglie Revit di quest'ultimi nella corrispondente posizione all'interno del modello informativo.

Nella parte finale della costruzione del modello, utilizzando nuovamente l'interfaccia di programmazione di *Dynamo*, sono stati creati i diversi volumi di scavo al fine di rappresentare le diverse fasi costruttive dell'opera presa in esame.

Le operazioni appena descritte verranno approfondite nei paragrafi successivi.

1.10 Creazione del modello informativo del terreno

Il modello geotecnico del terreno è il risultato dell'informatizzazione di tutti i dati riguardanti il terreno. Nel sito in esame, a seguito di una ricerca effettuata tra i documenti relativi al caso studio, sono state ricavate una serie di informazioni:

- Fori di sondaggio;
- Carta topografica del sito;
- Carta geologica della zona in cui è inserita l'opera;
- Sezioni bidimensionali del terreno in corrispondenza degli assi delle canne della galleria.

Il primo passo per la realizzazione del modello è la creazione delle superfici che rappresentano l'andamento della stratigrafia del terreno.

Per questa operazione, in primo luogo, sono stati informatizzati i dati relativi alle indagini effettuate in sito tramite l'estensione di *AutoCad Civil 3D – Geotechnical Module* della Keynetix. Tale codice, dopo aver digitalizzato le informazioni estratte dai sondaggi, permette di creare dei profili dinamici attraverso una vera e propria modellazione. Tuttavia, le superfici ricavate tramite *Geotechnical Module*, presentano alcune limitazioni in quanto sono necessari un elevato numero di boreholes, ben distribuiti all'interno dell'area analizzata, poiché l'interpolazione della superficie è funzione della posizione dei vari sondaggi. Inoltre, vi è l'impossibilità di posizionare e visualizzare un'eventuale falda, di condividere il lavoro e di aggiornarlo in maniera istantanea a seguito di importazione di nuovi dati. Per questi motivi, le superfici create attraverso *Geotechnical Module*, rappresentano un solo punto di partenza per una successiva interpolazione.

I dati di input necessari al plug-in *Geotechnical Module* per permettergli di generare le superfici sono informazioni riguardanti:

- Coordinate geografiche di Nord ed Est in modo da poter georeferenziare i sondaggi all'interno del modello;
- Indicazioni geometriche per rappresentare la struttura dei singoli sondaggi: quota iniziale di inizio foro, profondità dell'intero sondaggio, ampiezza dei rispettivi strati incontrati lungo il foro, inclinazione ed orientazione dei sondaggi rispetto il piano campagna;
- Descrizioni geologiche inerenti al tipo di terreno che compone lo specifico strato del foro.

Tali informazioni sono presenti nelle schede tecniche delle indagini geognostiche eseguite in prossimità dell'opera presa in esame. Sono stati considerati 6 differenti sondaggi:

- 3 forniti nella documentazione dell'azienda AK-Ingegneria Geotecnica;
- 3 estratti dal portale del Ministero dell'Ambiente.

Di seguito vengono riportate due tabelle contenenti i dati utilizzati con il corrispettivo nome del sondaggio (Tabella 3.2):

Location ID	Easting	Northing	Ground Level	Final Depth	Orientation	Inclination
SiO1 (AK)	223737.3	515299.8	340.00	50.00	0	0
SiO2 (AK)	223620.8	515281.1	337.91	50.00	0	0
Si03 (AK)	223679.3	515301.2	359.45	70.00	0	0
Si36 (Min.Amb)	223425.8	515292.0	302.00	20.00	0	0

Si19 (Min.Amb)	223569.0	515278.2	318.61	30.00	0	0
Si20 (Min.Amb)	223778.1	515260.4	308.91	25.00	0	0

LocationID	DephtTop	DephtBase	LegendCode	GeologyCode
SiO1 (AK)	0	39.5	TRVA	Calciduriti
5101 (AK)	39.5	50	TRV	Marna Argillosa
Si02 (AK)	0	50	TRVA	Calciduriti
	0	15.7	TRV	Marna Argillosa
S:02 (AK)	15.7	20.8	TRVA	Calciduriti
5105 (AK)	20.8	25.4	TRV	Marna Argillosa
	25.4	70	TRVA	Calciduriti
Si36 (Min. Amb.)	0	20	TRV	Marna Argillosa
Si10 (Min Amb)	0	6	TF1	Terrazzi Fluviali
5119 (IVIIII. AIIID.)	6	30	TRV	Marna Argillosa
Si20 (Min Amb)	0	7.5	TF1	Terrazzi Fluviali
SIZU (IVIIII. AIIID.)	7.5	25	TRV	Marna Argillosa

Tabella 4.1 Dati Sondaggi utilizzati

Tabella 4.2 Dati Sondaggi utilizzati

Come è possibile notare dalle tabelle sopra riportate, attraverso i sondaggi analizzati, sono stati rilevati 3 differenti unità geologiche: Calciduriti, Terrazzi Fluviali e Marna Argillosa.

Per poter informatizzare i boroholes sopra riportati ed interpretare i rispettivi dati tramite *Geotechnical Module*, le informazioni delle diverse indagini devono essere espresse in un formato leggibile dal software. Per l'utilizzo del plug-in di Civil3D è necessario fare riferimento a un formato particolare chiamato .CSV (Comma-Separated Values). Tale formato è rappresentato da un file di testo derivante da un foglio elettronico (Excel) o Database. Nel CSV, le righe della tabella sono trasformate in una linea di testo nel quale i diversi campi (le colonne) sono separate da un apposito separatore (virgola). Risulta ovvio che, le tabelle sopra riportate (Tabella 3.2 e 3.3), non soddisfino le caratteristiche appena indicate. Di

conseguenza, i dati relativi alle indagini sono stati uniformati secondo i requisiti del *Geotechnical Module* che richiede l'importazione di 3 differenti tabelle:

 "Location Details" contenente informazioni riguardanti le coordinate geografiche, il codice identificativo, la quota dell'inizio del sondaggio e la massima profondità raggiunta nel foro (*Figura 4.1*);

Contraction Details.csv - Blocco note di Windows -	Х	
File Modifica Formato Visualizza ?		
LocationID;Easting;Northing;GroundLevel;FinalDepth Si01 (AK);223737.28;515299.77;340.00;50.00 Si02 (AK);223620.81;515281.06;337.91;50.00 Si03 (AK);223679.29;515301.15;359.45;70.00 Si36 (Min.Amb);223425.78;515292.02;302.00;20.00 Si19 (Min.Amb);223568.95;515278.21;318.61;30.00		~
Si20 (Min.Amb);223778.07;515260.35;308.91;25.00		~
<	>	

Figura 4.1 Location details

• "Field Geological Description" che racchiude le informazioni relative ai

diversi strati del singolo foro di sondaggi (Figura 4.2);



Figura 4.2 Field Geological Description

 "Orientation and Inclination" dove vi sono le informazioni riguardanti l'orientazione e l'inclinazione dei sondaggi. Questo file è opzionale e di fatto, poiché tutti i valori erano nulli, non è stato importato (*Figura 4.3*).

ORIENTATION AND INCLINATION.CSV	_	×	
File Modifica Formato Visualizza ?			
LocationID;Orientation;Inclinat	ion		^
Si01 (AK);0;0			
Si02 (AK);0;0			
Si03 (AK);0;0			
Si36 (Min.Amb);0;0			
Si19 (Min.Amb);0;0			
Si20 (Min.Amb);0;0			
			×
<		>	

Figura 4.3 Orientation and inclination

Una volta generati i file per importare i dati si inizia l'utilizzo vero e proprio del codice *Geotechnical Module*.

Connect Import Update Expo	t Locations Strata Hatches Styles Layers	Create Edit Manage	Create Manage	? Help
Data Management	Asset Management	Profile	Fence Diagrams	Help

Figura 4.4 Interfaccia Geotechnical Module

Il primo passo è quello di importare i file .csv dal menù principale (*Figura 4.4*), illustrato nell'immagine precedente, cliccando su "Import".

*
Ψ.
ty values
Cancel

Figura 4.5 Procedura di importazione file .CSV

Successivamente avviene la convalida dei file inseriti (*Figura 4.6*): se non sono stati commessi errori di compatibilità e/o di scrittura, il software accetta i dati e li rende validi.



Figura 4.6 Convalida .CSV

Ultimata la procedura di importazione, il software genera i diversi sondaggi georeferenziati nell'opportuno sistema di riferimento (*Figura 4.7 e 4.8*).



Figura 4.7 Sondaggi generati da Geotechnical Module (Vista dall'alto)



Figura 4.8 Sondaggi generati da Geotechnical Module (Vista 3D)

Il passo successivo consiste nel generare le superfici stratigrafiche attraverso il comando "Strata" nel menù principale. Tali superfici sono il risultato dell'interpolazione degli strati aventi le medesime caratteristiche.

Nel caso in esame si riscontra subito uno dei limiti del *Geotechnical Module:* il forte legame tra l'interpolazione delle superfici e la disposizione dei sondaggi.



Figura 4.9 Superfici generate da Geotechnical Module

Le superfici sopra illustrate (*Figura 4.9*), rappresentano il piano inferiore e superiore dei *Calciduriti* (marrone) e il piano inferiore della *Marna* (verde). Come è possibile notare dall'immagine, le superfici generate non vengono interpolate in tutti i boroholes. Di fatto, viene escluso il sondaggio Si36 e la causa è dovuta alla sua posizione rispetto agli altri. Durante l'interpolazione vengono considerati solo le indagini che hanno una distanza reciproca minore e che sono distribuiti uniformemente nell'area analizzata. Inserendo la superficie topografica del sito in esame, è possibile rendersi conto della reale distribuzione dei sondaggi effettuati in sede di campagna indagini (*Figura 4.10 e 4.11*).



Figura 4.10 Superficie topografica e sondaggi importati (Vista dall'alto)



Figura 4.11 Superficie topografica e sondaggi importati (Vista 3D)

Tali sondaggi seguono un andamento quasi "lineare" e, di conseguenza, diventa impossibile per il software effettuare un'appropriata interpolazione. È possibile affermare inoltre che, dato il numero ridotto di indagini effettuate e data la loro posizione concentrata in una zona ristretta rispetto l'intera area analizzata, i risultati ottenuti tramite *Geotechnical Module* non permettono di rappresentare la stratigrafia del terreno. Le superfici ottenute, tuttavia, definiscono un'ottima base di partenza per le successive operazioni poiché contengono le informazioni reali in prossimità del caso studio preso in esame.

Per proseguire con la creazione delle superfici stratigrafiche, al fine di avere un modello geotecnico di riferimento che comprenda tutta l'area di studio, sono state integrate le informazioni estratte dalla carta geologica del sito e dalle sezioni verticali in corrispondenza dell'asse delle canne della galleria. Tali informazioni, come è possibile vedere dalle immagini seguenti 3.13 e 3.14), sono di tipo geometrico: la carta geologica (*Figura 3.3 del precedente capitolo "Caso studio"*) definisce l'estensione planimetrica delle diverse unità geologiche presenti; le due sezioni, invece, permettono un'ulteriore interpretazione sulla distribuzione verticale delle diverse stratigrafie.



Figura 4.12 Sezione verticale canna sinistra galleria



Figura 4.13 Sezione verticale canna destra galleria

Tramite le due sezioni verticali, distanti tra di loro circa 30 m, sono state estratte le diverse quote degli strati presenti. Attraverso tali quote, effettuando un'ipotesi semplificativa sui piani di deposizione dei diversi strati, lineari e costanti, sono stati ricavate le diverse pendenze delle varie unità geologiche. Successivamente, inserendo la carta geologica che rappresenta i limiti di estensione planimetrica dei piani inferiori dei diversi strati, sono state estratte le superfici stratigrafiche. Integrando quest'ultime con i risultati ottenuti attraverso l'estensione *Geotechnical Module*, sono state ricavate le superfici di seguito rappresentate (*Figura 4.14 e 4.15*):



Figura 4.14 Superfici stratigrafiche del terreno (Vista dall'alto)



Figura 4.15 Superfici stratigrafiche del terreno

Dopo aver generato le superfici costituenti la stratigrafia del sottosuolo, per completare il modello del terreno, si è deciso di trasformarle in solidi tridimensionali. La motivazione di tale scelta risiede nel presupposto che il solido 3D fosse la geometria più adatta a rappresentare le diverse unità del terreno.

Come accennato precedentemente, la creazione dei solidi e il completamento del modello geotecnico informativo, sono state effettuate tramite il software *Revit* di Autodesk. Questa è una piattaforma BIM-oriented la quale, attraverso l'utilizzo di strumenti intelligenti, permette di gestire e pianificare tutto il processo di progettazione e costruzione di una qualsiasi opera. Di fatto, in considerazione dell'obiettivo preposto, ovvero la creazione di un modello BIM di un'opera geotecnica già progettata, Revit risulta lo strumento più opportuno per completare il modello informativo del terreno. Su tale modello creato, sarà possibile inserire l'opera strutturale presa in esame e, successivamente, grazie alla possibilità di suddividere il lavoro per fasi, si sarà in grado di riprodurre i vari step di realizzazione della paratia. Infine, potendo associare ad ogni oggetto intelligente le proprie specifiche caratteristiche, il modello creato su *Revit* diviene un vero e proprio database informativo contenente le proprietà geotecniche e le indicazioni progettuali dell'opera analizzata.

In considerazione a quanto appena indicato, il passaggio successivo è stato quello di importare le superfici in ambiente *Revit*. Tale procedura è stata possibile grazie al tool aggiuntivo "Site Designer" che permette di inserire le diverse stratigrafie in formato ".xml" nel software, come topografie. Dopo aver impostato un sistema di coordinate condivise col file CAD da dove provengono le superfici, queste verranno importate e posizionate in modo automatico alla loro corrispondente quota.



Figura 4.16 Superfici importate da Civil 3D a Revit

Dall'immagine sopra riportata (*Figura 4.16*) tuttavia, è possibile notare che, le superfici create in *Autocad Civil 3D* e quelle importate su *Revit*, siano leggermente differenti. Questo problema è dovuto al fatto che in *Revit* non vengono riconosciuti i punti del contorno differenziandoli da quelli di quota e, di conseguenza, si crea una superficie leggermente più estesa. La soluzione di tale problematica consiste nel modificare, attraverso gli appositi comandi, le diverse planimetrie importando i diversi contorni estratti dalle superfici in *Civil 3D*,

dividendoli seguendo il corrispettivo perimetro ed eliminando la parte in eccesso (Figura 4.17).



Figura 4.17 Superfici corrette

Una volta ottenute le reali superfici modellate su Civil 3D, si è proceduto con la creazione dei solidi rappresentanti la stratigrafia del terreno.

Per questa operazione, non essendo possibili operazioni di estrusione riguardanti la topografia, si è utilizzato il software di programmazione *Dynamo* implementato su *Revit*.

Dynamo è una interfaccia di programmazione grafica basata sul linguaggio *Python*, che permette di interagire con tutti gli oggetti del modello. Tale piattaforma, essendo completamente integrata nel software *Revit*, attraverso la creazione di un apposito flusso di programmazione, è in grado di creare e manipolare informazioni e dati, modificare la geometria degli oggetti, automatizzare determinati processi ecc.

Il flusso di programmazione per la creazione dei solidi di terreno è stato elaborato a seguito di diversi tentativi e svariate prove, a causa di complicanze legate alle complesse geometrie. Lo *Script* di *Dynamo* prodotto converte le superfici topografiche in proprie geometrie chiamate polisuperfici. Queste, come detto precedentemente, rappresentano la superficie inferiore dei solidi di terreno. Per creare la parete laterale viene fatto estrudere il contorno ed infine, per chiudere il solido, viene traslata la polisuperficie della stessa quantità di estrusione del perimetro. Il solido generato viene tagliato tramite la superficie topografica relativa al piano campagna. Infine, tramite operazioni di intersezione e differenza tra le diverse geometrie si ricavano i solidi finali. In allegato si riporta l'intero Script realizzato mentre, qui di seguito, viene rappresentato un estratto del codice raffigurante un importante nodo: *"FamilyInstance"* serve ad importare, sottoforma di famiglia di *Revit*, la geometria creata su *Dynamo (Figura 4.18)*:



Figura 4.18 Estratto script Dynamo per la creazione dei solidi di terreno

Una volta elaborati tutti i solidi ed importate le rispettive famiglie, il risultato è quello riportato nell'immagine seguente (*Figura 4.19*):



Figura 4.19 Famiglie costituenti i solidi dei terreni

Sfruttando le funzionalità di *Revit*, è possibile associare ad ogni famiglia contenente il solido di terreno, un set di parametri che rendono il modello uno strumento informativo. Si riportano qui di seguito, in una tabella riassuntiva, tutti i dati relativi alle diverse tipologie di terreno rappresentate (Tabella 3.3):

Unità geotecnica	Litotipo	γ [kN/m³]	C _k '	Φ _k ' [°]	E [MPa]	v [-]
TRVA	Calciduriti	19	30	30	200	0.3
TF	Terrazzi Fluviali	18.5	15	19	50	0.4
TRV	Argilla Marnosa	23	59	25	200	0.35

Tabella 4.3 Dati unità geotecniche inseriti su Revit

Tali parametri geotecnici, estratti dalla relazione di calcolo relativa all'opera presa in esame, sono stati inseriti come parametri condivisi. La caratteristica fondamentale di tali parametri è quella di poter essere condivisi ed utilizzati in più famiglie e/o progetti. Questa possibilità di riutilizzo si traduce in un guadagno di tempo ed efficienza con conseguente ottimizzazione del processo.

In conclusione, una volta create le geometrie ed informatizzato tutti i dati che riteniamo opportuni riportare, è possibile affermare di aver generato il modello informativo del sottosuolo. Tale modello, come detto precedentemente, rappresenta la base su cui costruire e rappresentare l'opera geotecnica. Si riporta di seguito, a titolo di esempio, un'immagine raffigurante una delle unità geologiche ricavate con le relative informazioni (*Figura 4.4*).



Tabella 4.4 Famiglia Calciduriti con i relativi parametri

1.11 Creazione del modello informativo dell'opera geotecnica

L'opera geotecnica presa in esame è una paratia provvisionale di presidio situata all'imbocco di una galleria nel centro Sicilia. Quest'opera, già progettata e verificata, è costituita da una serie di micropali multi-ancorati.

Il modello informativo dell'opera geotecnica è il prodotto della digitalizzazione e della rappresentazione di tutte le informazioni e le scelte progettuali dei vari elementi strutturali che compongono la paratia presa in esame.

Per rappresentare la paratia si è utilizzato il plug-in di Revit, *Infrastacture Kit*, sviluppato da *One Team*, che facilita l'attività di modellazione attraverso processi automatizzati per l'inserimento di elementi strutturali aventi parametri definiti dall'utente. In altre parole, l'applicativo, tramite un file preimpostato in cui sono inseriti i parametri e le proprietà, inserisce gli elementi appartenenti alle famiglie precostituite. Il file preimpostato secondo un template standard e le famiglie

precostituite ma modificabili, sono incluse nel pacchetto di download del software.



Figura 4.20 Interfaccia Infrastructure Kit

Nell'immagine sopra riportata vi è illustrata l'interfaccia principale di *Infastructure Kit.* I comandi rappresentati indicano le diverse funzioni che l'applicativo riesce a svolgere e, come è possibile vedere, vi sono anche la modellazione di paratie e tiranti.

Il primo passaggio da effettuare per rappresentare l'opera in esame è quello di importare in Revit la polilinea che indica la sviluppata della paratia (*Figura 4.21*).



Figura 4.21 Sviluppata della paratia

Da tale polilinea, attraverso un comando del Kit, viene estratto un file .txt contente le coordinate del percorso lungo il quale verranno inseriti gli elementi.

Il passo successivo consiste nella compilazione del template preimpostato con tutte le informazioni utili a rappresentare l'oggetto considerato (*Figura 4.21*).

Codice	Famiglia	Da Prog	AProg	Passo	Ruota	rotazion	1	h	offset	offset	offset	inverti	filepath polilinea	Perforaz	Materiale
PALI1	Micropak	0.3	2.3	0.5	false	0	4550	4550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	4550	Miscela di cemento
PALI2	Micropak	2.8	4.3	0.5	false	0	5550	5550	0	0	0.5	false	C: \Users\domen\Desktop\Cartella tesi	5550	Miscela di cemento
PALI3	Micropak	4.8	6.3	0.5	false	0	7550	7550	0	0	0.5	false	C: \Users\domen\Desktop\Cartella tesi	7550	Miscela di cemento
PALI4	Micropak	6.8	11.3	0.5	false	0	9550	9550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	9550	Miscela di cemento
PALI5	Micropak	11.8	13.8	0.5	false	0	12550	12550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	12550	Miscela di cemento
PALI6	Micropak	14.3	16.3	0.5	false	0	14550	14550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	14550	Miscela di cemento
PALI 7	Micropak	16.8	18.8	0.5	false	0	17550	17550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	17550	Miscela di cemento
PALI8	Micropak	19.3	22.3	0.5	false	0	17550	17550	0	0	0.5	false	C: \Users\domen\Desktop\Cartella tesi	17550	Miscela di cemento
PALI 9	Micropak	22.8	24.8	0.5	false	0	19550	19550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	19550	Miscela di cemento
PALI 10	Micropak	25.3	28.8	0.5	false	0	21550	21550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	21550	Miscela di cemento
PALI 11	Micropak	29.2	46.8	0.4	false	0	21550	21550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	21550	Miscela di cemento
PALI 12	Micropak	47.3	59.8	0.5	false	0	21550	21550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	21550	Miscela di cemento
PALI 13	Micropak	60.2	72.32	0.4	false	0	21550	21550	0	0	0.5	false	C: \Users\domen\Desktop\Cartella tesi	21550	Miscela di cemento
PALI 14	Micropak	72.6	75.92	0.4	false	0	21550	21550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	21550	Miscela di cemento
PALI 15	Micropak	76.2	80.32	0.4	false	0	19550	19550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	19550	Miscela di cemento
PALI 16	Micropak	80.7	81.7	0.5	false	0	17550	17550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	17550	Miscela di cemento
PALI 17	Micropak	82.2	84.2	0.5	false	0	17550	17550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	17550	Miscela di cemento
PALI 18	Micropak	84.7	86.7	0.5	false	0	14550	14550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	14550	Miscela di cemento
PALI 19	Micropak	87.2	89.2	0.5	false	0	12550	12550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	12550	Miscela di cemento
PALI20	Micropak	89.7	91.7	0.5	false	0	9550	9550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	9550	Miscela di cemento
PALI21	Micropak	92.2	93.7	0.5	false	0	6550	6550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	6550	Miscela di cemento
PALI22	Micropak	94.2	95.2	0.5	false	0	3550	3550	0	0	0.5	false	C:\Users\domen\Desktop\Cartella tesi	3550	Miscela di cemento

Figura 4.22 Template preimpostato per installazione micropali

Come è possibile vedere nell'immagine sopra: si ha una colonna che fa riferimento alla famiglia da considerare, una serie di colonne che descrivono il posizionamento di quest'ultima, un parametro geometrico ed infine un dato contenente la tipologia di materiale. Nella tabella sopra illustrata, le colonne in giallo devono mantenere sempre lo stesso template mentre, quelle in verde possono essere modificate. Questo significa che è possibile aggiungere qualsiasi parametro che, successivamente, verrà aggiunto in automatico negli oggetti creati.

Una volta generato il file Excel ed importato la famiglia sull'ambiente di lavoro *Revit,* è possibile generare gli elementi con il seguente comando (*Figura 4.23*):

		ktop (carte	lla tesi fir	nale	
Nome for	lio I	Foglio1			v
Da riga	1				
A riga	2	2			
Codice	Famiglia	Da Prog	A Prog	Pas	
1 PALI 1	Micropal	0.3	2.3	0.5	\sim
2 PALI 2	Micropal	2.8	4.3	0.5	
3 PALI 3	Micropal	4.8	6.3	0.5	
4 PALI 4	Micropal	6.8	11.3	0.5	\sim
<				>	
_					
✓ Calcola Configura Colonna	coordinat zione map Etichetta	e rispetto a p Proprietà	ll'origii		
✓ Calcola Configura Colonna 1	coordinat zione map Etichetta Codice	e rispetto a p Proprietà	ll'origii		~
Configura Configura Colonna 1 2	zione map Etichetta Codice Famiglia	e rispetto a p Proprietà	ll'origiı		^
Configura Configura Colonna 1 2 3	zione map Etichetta Codice Famiglia Da Prog	e rispetto a p Proprietà	ll'origiı		^
Colonna Colonna 1 2 3 4	zione map Etichetta Codice Famiglia Da Prog A Prog	e rispetto a p Proprietà	ll'origii		~ ~ ~

Figura 4.23 Comando per generare i micropali

Si riporta qui di seguito (*Figura 4.24*) un elemento rappresentativo della famiglia di micropali con affiancate le relative proprietà:

🔜 Vista 3D: Vista 1 - Micropalo.rfa 💷 🔳 💌	Tipi di famiglia		×
aut A	Nome del tipo:		1
Ц	Parametri di ricerca		Q
	Parametro	Valore	Formula \land
	Vincoli		
	Prospetto di default	1219.2	=
	Testo		
	Codice (default)		=
	Materiali e finiture		
	Materiale strutturale (default)	<per categoria=""></per>	=
	Miscela per cementazione micropali	Calcestruzzo C20/25	=
	Acciaio Armatura Palo	Acciaio S 355	-
	Dimensioni		
	ArmaturaMicropalo_Diametro (default)	168.3	=
	ArmaturaMicropalo_Lunghezza (default)	6400.0	= Perforazione_Lunghezz
	ArmaturaMicropalo_Spessore (default)	12.0	=
	Perforazione_Diametro (default)	250.0	=
	Perforazione_Lunghezza (default)	6000.0	=
	altezzaCordolo (default)	600.0	=
	armatura_offsetSuperiore (default)	400.0	=
	Dati identità <		>
Ų	✓ 11 11 1E ↓E 2↓ 21		Gestisci tabelle di ricerca
1:20 🖪 🗃 🚓 🕸 🏠 🖓 🖼 🔜 🔿 🛓	Come gestire i tipi di famiglia	ОК	Annulla Applica

Figura 4.24 Famiglia dei micropali

Per la creazione dei tiranti, collegati ai micropali per mezzo di travi di ripartizione, si è proceduto con lo stesso iter di inserimento dei micropali ad eccezione nell'uso della famiglia. Quella fornita nel pacchetto di file di *Infrastructur Kit* non era in grado di soddisfare tutti i requisiti geometrici imposti dalla progettazione. Di conseguenza, partendo da quest'ultima come base di modellazione, si sono effettuate delle modifiche per rispettare le indicazioni di progetto. In particolare, sono stati variati i seguenti parametri:

- l'angolo di rotazione poiché sono presenti tiranti ruotati in entrambi i piani dell'asse;
- le testate dei pali in quanto possedevano una geometria differente;
- le sezioni delle travi di ripartizione.

Dopo aver compilato il template preimpostato ed ultimato la creazione della corrispondente famiglia, attraverso la stessa procedura usata per i micropali, sono stati inseriti automaticamente tutti i tiranti e le travi di ripartizione. Come per i micropali, si riporta come esempio uno degli oggetti inseriti della "famiglia tiranti" con i relativi parametri *(Figura 4.25).* Particolarmente importanti sono i dati dei tiranti in merito all'inclinazione, alla lunghezza libera ed a quella ancorata.





Tipi di famiglia			×
Nome del tipo:			n m
Parametri di ricerca			q
Parametro	Valore	Formula	Blocca
Testo		1	8
Materiali e finiture			
Materiale strutturale (default)			
Acciaio per tiranti d'ancoraggio	Acciaio armonico stabilizzato per tiranti		
Miscela cementizia per iniezione tiranti (default)	Calcestruzzo Iniettato C20/25	-	
Acciaio per travi di ripartizione e piastre (default)	Acciaio 5355	2	
Dimensioni		4.5	
lunghezza (default)	11200.0		
offsetFinale (default)	60.0	-	Ä
offsetiniziale (default)	54.5	-	H
offsetinizialeTiranti (default)	1000.0		Ä
tirante IniezioneAP_Lunghezza (default)	8000.0	2	<u> </u>
tirante IniezioneBP_Lunghezza (default)	10000.0		ñ
tirante Perforazione_Diametro (default)	190.0	-	0
brante.Tirante_Angolo (defauit)	15.00*	-	õ
tirantiPasso (default)	2800.0	-	Ø
Altezza_Travi	171.0	1	0
Distanza_Trave-Palo	0.0		2
Distanza_Trave-Trave	500.0	-	Ø
Altro	March 1997		(())
Testate_Numero (default)	3	-	
tirante.Tirante_Tensione (default)	300.00 kN/m ²	-	
tirante.Trefoli_Numero (default)	0	-	
tiranteSingolo (default)		= Testate_Numero = 1	
tirantiCentrati (default)			
tirantiMultipli (default)		= Testate_Numero > 1	
tipoTravi< Telaio strutturale>	Trave_Tirante 1 : LLarga (180)	*	
Dati identità	al data second da		8

Figura 4.25 Famiglia dei tiranti

Infine, viene inserito l'ultimo elemento strutturale, il cordolo in calcestruzzo armato che termina rappresentazione sia grafica che informativa dell'opera strutturale. Questo cordolo viene modellato come una semplice trave che si sviluppa lungo la polilinea della paratia.

Si riporta di seguito un'immagine completa della paratia di micropali multiancorati *(Figura 4.26).*



Figura 4.26 Paratia di micropali multiancorati

1.12 Fasi di scavo e processo costruttivo dell'opera geotecnica

L'obiettivo preposto, ovvero, la verifica sulla possibilità di implementazione della metodologia BIM nei confronti di un'opera geotecnica già progettata, ottiene maggiori conferme attraverso la simulazione del processo costruttivo. Inoltre, l'inserimento dell'opera all'interno del modello geotecnico creato offre una più chiara rappresentazione del progetto e definisce un modello informativo completo, comprendente l'informatizzazione geotecnica e strutturale. Quest'ultimo aspetto è fondamentale per le opere geotecniche in quanto, queste, sono inserite all'interno del terreno ed interagiscono con esso.

Per i motivi sopra citati, si è deciso di aggiornare il modello geotecnico precedentemente creato. In un primo momento si è proceduto con la creazione dei volumi di scavo, successivamente, grazie alla possibilità offerta da Revit di dividere il lavoro per fasi, è stata inserita l'opera seguendo il processo costruttivo. Per la creazione del volume di scavo, come accennato in precedenza, si è fatto riferimento nuovamente al software di programmazione *Dynamo*. Quando si parla di scavo, si intendono tutte le operazioni legate all'asportazione di terreno con conseguente creazione della cavità. Tali operazioni, nel caso in esame, servono per portare alla quota di progetto la superficie del terreno antistante l'imbocco della galleria. Di conseguenza, creare il volume di scavo significa modificare i solidi rappresentanti la diversa stratigrafia. Considerando che tali solidi, come discusso precedentemente, sono stati generati tramite *Dynamo*, la scelta più appropriata per riprodurre gli scavi risulta quella di fare riferimento sempre allo stesso software.

Il volume di scavo, secondo quanto viene riportato nella relazione di calcolo, è eseguito per step in modo da poter seguire l'installazione della paratia nel terreno. Vi è un primo scavo di riprofilatura della superficie del terreno fino alla quota corrispondente al cordolo superiore, in modo da poter eseguire l'installazione dei micropali. Successivamente, seguono una serie di scavi che fanno sì che vengano installati i restanti elementi strutturali. Secondo quanto indicato nella relazione di calcolo della paratia, il volume totale di scavo è suddiviso in 6 differenti porzioni.

Attraverso la documentazione fornita per il caso studio, è stato possibile ricavare i diversi punti quotati corrispondenti ai limiti del volume di scavo. Tali punti, dopo essere stati trascritti in un file Excel, sono stati importati su *Dynamo* attraverso un apposito *script* in modo da poter generare la corrispondente superficie di base del solido di scavo.

Si riporta in *Figura 4.27* solo un estratto del codice, mentre il flusso completo del codice *Dynamo* è inserito in allegato.



Figura 4.27 Estratto dello script per la creazione del solido di scavo

Nel dettaglio sopra riportato viene mostrata l'importazione e la trasformazione in coordinate dei valori trascritti sul foglio di calcolo Excel. Successivamente, tramite i punti aventi le coordinate precise all'interno del progetto, viene generata la superficie inferiore dello scavo. Una volta ottenuta la superficie, si crea il solido totale di scavo attraverso la stessa procedura effettuata per realizzare i solidi relativi alla stratigrafia: estrusione e taglio con la superficie topografica del terreno. Una volta generato il solido di scavo, questo viene intersecato con i solidi costituenti gli strati del sottosuolo. Si riporta di seguito un'immagine con il volume totale di scavo (*Figura 4.28*).



Figura 4.28 Solido di scavo creato con Dynamo

Come è possibile vedere dalle immagini sopra rappresentate, sono presenti le superfici perfettamente verticali che corrispondono ai lati in cui è presente la paratia mentre, lateralmente, vi sono le scarpate con pendenza 2(verticale):3(orizzontale).

Una volta generato il solido totale, lo si è diviso in 6 porzioni distinte tramite il taglio da parte di un piano posizionato nell'apposita quota. Tali quote, estratte dalla relazione tecnica della paratia in esame, corrispondono a 50 cm in meno rispetto a quelle relative ad ogni fila di tirante.

Dopo aver ricavato i diversi solidi di scavo si è potuti procedere con la suddivisione in fasi del lavoro rappresentante il processo costruttivo dell'opera.

Si riporta qui di seguito uno schema riassuntivo di tutte le fasi inserite (*Figura 4.29*):

si										Х
asi de	l progetto	Filtri delle fasi d	di lavoro	Sostituzioni grafica						
				PASSATO					.	
	Nome		Descrizione			Inserisci prima				
1	Esistente		Esister	te					Insenso prima	
2	Fase 1		Scavo	1					Inserisci dopo	
3	Fase 2		Install	zione Micropali						
4	Fase 3		Cordo	o in calcestruzzo					Combina con:	
5	Fase 4		Install	zione prima fila di tiran	ti				Precedente	
6	Fase 5		Scavo	2					1166664	
7	Fase 6		Install	zione seconda fila di tir	anti				Successiva	
8	Fase 7		Scavo	3						
9	Fase 8		Install	zione terza fila di tiranti						
10	Fase 9		Scavo	4						
11	Fase 10		Install	zione quarta fila di tirar	nti					
12	Fase 11		Scavo	5			 			
13	Fase 12		Install	zione quinta fila di tirar	nti		 			
14	Fase 13		Scavo	5						
15	Fase 14		Install	zione ultima fila di tirar	nti					
				FUTURO						
						OK	Annulla	A	oplica ?	

Figura 4.29 Fasi del processo di costruzione

Le operazioni eseguite nelle rispettive fasi sono le seguenti:

• Fase Esistente: corrisponde al modello geologico originale, ovvero, lo stato iniziale prima dell'inserimento dell'opera e dell'avanzamento degli scavi;

- Fase 1: sbancamento e riprofilatura del terreno fino alla quota di imposta del cordolo di coronamento;
- Fase 2: realizzazione dei micropali per mezzo di operazioni di perforazione, iniezione e maturazione;
- Fase 3: realizzazione del cordolo in calcestruzzo armato di dimensioni 60x60;
- Fase 4: primo scavo di ribasso fino ad una quota pari a 0.5 m al di sotto della prima fila di tiranti;
- Fase 5: inserimento della prima fila di tiranti tramite processi di perforazione, inserimento dei trefoli di armatura con conseguente cementazione, messa in carico;
- Fase 6...13: vengono ripetute le Fasi 4 e 5 per l'installazione delle restanti 5 file di tiranti;
- Fase 14: esecuzione dell'ultimo scavo fino alla quota di progetto sul quale poggerà l'infrastruttura.

Si riportano di seguito, a titolo d'esempio, la fase 6 (*Figura 4.31*) e l'ultima fase in cui vi è tutta la struttura inserita (*Figura 4.32*). Viene inoltre aggiunta un'immagine comprendente tutto il modello creato (*Figura 4.30*).



Figura 4.30 Modello informativo del terreno con l'opera geotecnica





Figura 4.31 Rappresentazione della sesta costruttiva




Figura 4.32 Rappresentazione dell'opera interamente inserita nel terreno

5. ANALISI DI INTEROPERABILITÀ TRA I

SOFTWARE REVIT E PLAXIS 3D

Il concetto di interoperabilità esprime la possibilità di scambiare i dati contenuti in un determinato modello di partenza, con le differenti piattaforme software destinate alle diverse attività coinvolte in un processo di realizzazione di un'opera. Se tradizionalmente, i vari software specializzati e sviluppati per la gestione ed elaborazione dei dati non avevano la capacità di comunicare reciprocamente, il moderno approccio definito dalla metodologia BIM, essendo basato su un processo di lavoro collaborativo, richiede la massima condivisione delle informazioni progettuali e processuali tra tutti i soggetti coinvolti.

Al fine di completare l'obiettivo preposto, ovvero, la verifica sulla possibile implementazione della metodologia BIM, ci è sembrato doveroso, nella fase finale del lavoro di tesi, approfondire tale argomento. Di fatto, nel seguente capitolo verrà descritto il processo volto a verificare l'interoperabilità tra Revit, software basato sulla modellazione BIM, e Plaxis 3D, codice di calcolo per analisi geotecniche.

Nello specifico si avrà una prima parte dedicata alla rappresentazione delle fasi utili al trasferimento dei dati tra i due applicativi, ed una seconda invece, dove verranno descritte le analisi effettuate nel software Plaxis. Quest'ultime sono state svolte al fine di dimostrare la validità delle informazioni scambiate.

1.13 Trasferimento dei dati da Revit a Plaxis3D

Il software *Plaxis 3D* della software house *Bentley*, è un codice di calcolo basato sul metodo agli elementi finiti (FEM). Esso risulta un pacchetto potente ed intuitivo finalizzato all'analisi tridimensionale di deformazioni e di stabilità nei campi dell'ingegneria geotecnica e della meccanica delle rocce. Attraverso l'inserimento di *Staged Construction,* in tale software, è possibile modellare accuratamente anche il processo di costruzione.

L'analisi di interoperabilità, tra il codice appena descritto e il software Revit, è stata eseguita facendo riferimento al modello informativo creato nella prima parte del lavoro di tesi. Per i vari elementi strutturali del caso studio preso in esame, la paratia di micropali multiancorata, Plaxis3D utilizza una schematizzazione geometrica differente rispetto a Revit. Di fatto, mentre nella rappresentazione dei solidi costituenti il sottosuolo viene utilizzata una geometria tridimensionale identica a quella del modello BIM, per la paratia, i tiranti, le travi e, più in generale, per tutti gli elementi strutturali che interagiscono col terreno, viene indicata una geometria semplificata. Nel caso studio preso in considerazione, affinché avvenga una corretta analisi geotecnica, il modello deve essere definito come di seguito indicato:

- i solidi stratigrafici tramite elementi tridimensionali aventi le rispettive caratteristiche;
- la paratia di micropali attraverso un unico elemento bidimensionale (piastra), con caratteristiche equivalenti;
- i tiranti e le travi di ripartizione, per mezzo di elementi monodimensionali (linee) con attribuiti i corrispondenti parametri.

Tenendo conto delle condizioni geometriche imposte, sono stati condotti diversi tentativi prima di riuscire a generare il flusso di informazione tra i due software.

Preme sottolineare che, nonostante sia possibile importare diversi formati (*Figura 5.1*), le uniche informazioni trasmesse sono quelle geometriche.



Figura 5.1 File importati nel software

Nello specifico sono stati testati i seguenti formati: IFC, DXF.

Il primo, l'*IFC (Industry Foundation Classes),* è il formato internazionale di interscambio informazioni sviluppato da *buildingSMART.* Tale formato, aperto, pubblico ed indipendente da qualsiasi produttore software, è stato recepito dalla norma ISO 16739. Esso è un sistema strutturato di dati che classificano e descrivono tutti i componenti all'interno di un modello sia da un punto di vista fisico (grandezze geometriche e caratteristiche dei materiali), che descrittivo (quantità, costi e sequenze temporali di lavorazione).

Nonostante tutte le informazioni contenute all'interno del formato, *Plaxis 3D* estrae solo le caratteristiche geometriche. Inoltre, il software non è in grado di riconoscere tutti gli elementi schematizzati all'interno del modello ma, solamente le seguenti famiglie (Figura 5.2):

The supported types are:
 ifcroof ifcslab ifcfooting ifcpile ifcbeam ifcplate ifcwall ifccolumn

Figura 5.2 Famiglie supportate da Plaxis

Il modello BIM creato e preso in considerazione non rispetta tale condizione in quanto, i solidi stratigrafici generati tramite l'utilizzo di *Dynamo*, non appartengono alle famiglie sopra indicate. Per ovviare a tale problema, si è provato a mappare la classificazione del formato *IFC* secondo le tipologie supportate. Tale impostazione ha permesso di importare il modello ma con una geometria differente rispetto a quella originale. I solidi che definiscono il terreno, a causa della loro forte irregolarità dovuta alle *mesh* delle native superfici topografiche, sono stati trasformati in un numero elevato di superfici piane non utilizzabili per definire i solidi di terreno corrispondenti.

Per quanto riguarda gli elementi strutturali che definiscono la paratia di micropali multiancorata, nonostante questi appartengano alle famiglie supportate, nei formati *IFC*, non è possibile esportare elementi monodimensionali. Di conseguenza, vista la condizione imposta dal software in merito ai tiranti ed alle travi, non è possibile utilizzare tale formato.

È importante sottolineare che, l'importazione del formato *IFC*, è una funzione aggiunta solo nell'ultima versione del software. Risulta quindi comprensibile e giustificato che tale operazione necessiti ancora di sviluppi e sperimentazioni. Tuttavia, tale implementazione mette in evidenza la direzione intrapreso dalla casa produttrice del software, ovvero, un percorso finalizzato ad un processo di lavoro collaborativo anche nella progettazione di opere geotecniche. Di fatto, Plaxis3D risulta l'unico software di analisi geotecniche in cui è stato inserito il formato *IFC*.

Considerando, per il caso in esame, non soddisfacenti i risultati ottenuti dalle prove di importazione effettuate con il formato *IFC*, si è deciso di testare il formato *DXF* (*Drawing Exchange Format*).

Il *DXF*, sviluppato da *Autodesk*, è lo standard più diffuso per l'interscambio di informazioni di tipo CAD tra i diversi software. Tale formato è possibile esportarlo direttamente da *Revit*, dove è possibile settare annotazioni grafiche utili per la rappresentazione dei diversi elementi costituenti il modello. Particolare importanza assume l'impostazione riguardante la modalità di esportazione del solido, la quale deve essere impostata su "solidi ACIS" (Figura 5.3) come è possibile vedere dall'immagine seguente:



Figura 5.3. Impostazione dell'esportazione del solido

Il file esportato risulta leggibile da qualsiasi software di tipo vettoriale, come ad esempio AutoCAD o Civil 3D di Autodesk (Figura 5.4).



Figura 5.4 Modello in formato DXF

Le geometrie dei diversi solidi vengono esportate come differenti blocchi ai quali viene attribuito il nome della famiglia *Revit* a cui appartengono. Tuttavia, esplodendo tali blocchi, è possibile notare come gli elementi in essi contenuti configurino delle superfici (Figura 5.5).



Figura 5.5 Parametri elementi esportati

La causa dell'errata esportazione delle geometrie è riconducile alla circostanza per cui il *DXF* generato da *Revit*, non possiede l'adeguato livello di precisione, presupposto necessario in presenza di geometrie complicate. Sebbene sia possibile controllare il livello di precisione fino a 16 cifre decimali, si è riscontrato come tale operazione non sia effettuabile in *Revit*.

Per ovviare a tale problematica si è deciso di modificare/ridurre il livello di dettaglio dei solidi precedentemente creati, attraverso l'utilizzo di *Dynamo*. Tramite tale piattaforma è stato possibile generare anche gli elementi rappresentanti la paratia, i tiranti e le travi di ripartizione.

Come discusso nei precedenti capitoli *Dynamo*, tramite un apposito flusso di programmazione, è in grado di modificare le geometrie degli oggetti. In tale circostanza, lo *Script* prodotto converte i solidi costituenti la stratigrafia in elementi *mesh*, ne riduce il numero delle rispettive maglie ed infine li trasforma nuovamente in solidi. All'interno dello stesso flusso di programmazione vi è una parte dedicata alla creazione della geometria degli elementi strutturali secondo la modalità richiesta da *Plaxis 3D*. Nello specifico, per le travi e per i tiranti estrae le linee d'asse, per la paratia invece, collegando i vertici degli assi dei micropali traccia il perimetro dal quale ricava la superficie.

Si riporta qui di seguito un estratto (Figura 5.6) del flusso di programmazione rappresentante i nodi in cui avviene la riduzione del numero di maglia della mesh, lo script completo viene inserito in allegato.



Figura 5.6 Estratto dello script per ridurre la mesh

La nuova geometria creata (Figura 5.7 e 5.8), esportata in formato *DXF* con la stessa metodologia precedentemente espressa, risulta compatibile con il software *Plaxis 3D*.



Figura 5.7 Modello con la maglia mesh ridotta



Figura 5.8 Elementi rappresentanti la paratia

Dalle immagini sopra riportate, è possibile osservare i vari elementi costituenti il modello presenti all'interno del file esportato in formato *DXF*. Esse rappresentano, rispettivamente, i solidi del terreno con i relativi volumi di scavo e la paratia, con tiranti e travi di ripartizione.

1.14 Analisi FEM del modello importato su Plaxis3D

Il metodo agli elementi finiti (FEM, dall'inglese *Finite Element Method),* è una tecnica avanzata di risoluzione di equazioni differenziali di un continuo discretizzato.

Nell'ingegneria geotecnica, tale analisi viene utilizzata per definire campi tensionali ed effettuare verifiche di stabilità simulando il comportamento del terreno tramite un apposito software che riproduce virtualmente un caso reale.

La costruzione di un modello opportuno sul quale effettuare l'analisi FEM può essere schematizzata come segue:

- Definizione della geometria: costruzione/importazione di un modello geometricamente rappresentativo del caso da analizzare;
- Definizione delle caratteristiche fisico-meccaniche: assegnazione dei legami costitutivi e dei relativi parametri ai diversi elementi che costituiscono il modello, al fine di riprodurre il comportamento dei materiali reali;
- Modellazione: generazione della mesh con impostazioni ed ottimizzazioni opportune al caso e definizione del processo di analisi;
- *Soluzione:* rielaborazione dell'output delle simulazioni.

Le fasi sopra descritte, sono affette da un naturale livello di semplificazione che, se non è adeguatamente ponderato, comporta risultati formalmente corretti ma poco rappresentativi della realtà dei fenomeni studiati.

Tenendo conto delle indicazioni sopra espresse, si è proceduto alla costruzione del modello relativo al caso studio in esame, con l'intento di verificare la validità delle informazioni trasmesse dal modello informativo precedentemente generato.

La prima fase nella creazione del modello è costituita dalla rappresentazione geometrica del caso analizzato. Al fine di verificare l'interoperabilità tra *Revit e Plaxis 3D*, si è importato il file *DXF* discusso nel precedente paragrafo.

Come è possibile osservare dall'immagine sottostante contente l'interfaccia del software *Plaxis 3D* (Figura 5.6), sono presenti due sezioni separate all'interno delle quali rappresentare il terreno (Soil) e la struttura (Structure).



Figura 5.9 Interfaccia software Plaxis 3D

Importando il file *DXF*, nonostante questo contenga sia le geometrie relative ai solidi della stratigrafia gli elementi strutturali della paratia in un unico ambiente, il software riesce, in maniera automatica, a posizionarli nell'opportuna sezione.

Il passaggio successivo all'importazione delle geometrie è rappresentato dall'assegnazione dei parametri caratterizzanti i diversi elementi costituenti il modello. In particolare, si attribuisce ad ogni elemento il corrispondente materiale, caratterizzato dai relativi parametri specifici. Per quelli strutturali viene indicato, inoltre, il corrispettivo comportamento strutturale.

Nello specifico, sulla base di quanto è riportato nella relazione geotecnica relativa al caso studio a cui si fa riferimento, ai solidi rappresentanti le tre unità geotecniche del sito, è stato impostato un comportamento meccanico che segue la legge costitutiva di *Mohr-Coulomb*. Identificandoli con tale legge è stato possibile inserire i relativi parametri, estratti dalla documentazione e presenti nel modello BIM come dato informativo. Si riporta a titolo d'esempio le caratteristiche attribuite al solido geotecnico costituente i *Calciduriti (Figura 5.10),* i parametri delle due restanti unità geotecniche sono riportati nel capitolo precedente come dato informativo del modello geologico. Nel caso studio preso in considerazione, la relazione tecnica riporta che non è stata rilevata alcuna falda, di conseguenza tutti terreni sono stati considerati insaturi.

3 🔊 🐥 🖞			
General Parameters Groundwater Interfaces Initial			
Property Unit Value			
Material set			
Identification Calciduriti			
Material model Mohr-Coulomb			
Drainage type Non-porous			
Colour RGB 215, 126, 101			
Comments			
General properties			
V _{unsat} ktV/m³ 19,0000			
Y _{sat} kN/m ³ 19.0000			
Conneral Parameters Croundwater Toterfaces Tothia			
Property Unit Value			
E NV/m* 200000			
c ki/m2 76973 1			
E kl/m ² 269231			
Strength			
C ktv/m² 30.0000			
-rer φ (phi) ° 30.0000			
ψ(psi) ° 0.00000			
Velocities			
V. m/s 199.290			
V _p m/s 372.838			
v _p m/s 372.838			
V _p m/s 372.838			
vp m/s 372.838 General Parameters Groundwater Interfaces Initial Initial			
vp m/s 372.838 General Parameters Groundwater Interfaces Initial Property Unit Value Value Value			
vp m/s 372.838 General Parameters Groundwater Interfaces Initial Property Unit Value Value Value K0 settings Ko determination Automatic Value Value			
vp m/s 372.838 General Parameters Groundwater Interfaces Initial Property Unit Value K0 settings K0 Automatic $K_0 = K_{0,v}$ V			
vp m/s 372.838 General Parameters Groundwater Interfaces Initial Initial Initial K0 settings Automatic K0_a = K_{0,y} Image: Constraint of the setting of the settin			

Figura 5.10 Parametri relativi ai Calciduriti

Per quanto riguarda gli elementi strutturali, possiamo distinguere tre tipologie differenti all'interno dell'opera geotecnica: la paratia di micropali, i tiranti di ripartizione ed i tiranti.

In tali elementi, l'opportuna assegnazione del corrisponde comportamento strutturale, è fondamentale ai fini dell'analisi geotecnica in quanto influenza la relativa risposta meccanica.

La paratia è stata modellata attraverso una superficie passante per la linea d'asse dei micropali. Ad essa viene attribuito un comportamento strutturale "*Plate*" (piastra), con materiale di tipo elastico e parametri equivalenti. La paratia è rappresentata dall'alternanza micropalo/vuoto e, per simulare la corrispondente reazione con una superficie continua, è stato inserito un diametro equivalente (inferiore). Nell'immagine seguente viene indicata la scheda di parametri relativa alla paratia (Figura 5.11).

Plate - Paratia di micropali				
A				
Property	Unit	Value		
Material set		,		
Identification		Paratia di micropali		
Comments				
Colour		RGB 0, 0, 255		
Material type		Elastic		
Properties				
d	m	0.190000		
Y	kN/m³	77.1100		
Isotropic				
E ₁	kN/m²	200.000E6		
E ₂	kN/m²	200.000E6		
v ₁₂		0.00000		
G ₁₂	kN/m²	100.000E6		
G ₁₃	kN/m²	100.000E6		
G 23	kN/m²	100.000E6		
Rayleigh o		0.00000		
Rayleigh β		0.00000		
Prevent punching				

Figura 5.11 Parametri relativi alla paratia

Le travi di ripartizione, che hanno la funzione di rendere solidale l'insieme di micropali con il sistema di tiranti, sono state modellate come elementi *beam* (travi). Anche in questo caso si è fatto riferimento a parametri rappresentativi, in quanto, nella situazione reale, le travi relative ad ogni nodo sono doppie.

Si riporta di seguito la scheda contenente i parametri della trave (Figura 5.12):

Beam - Travi ripartizione			
<u></u>			
Property	Unit	Value	
Material set		,	
Identification		Travi ripartizione	
Comments			
Colour		RGB 254, 250, 22	
Material type		Elastic	
Properties			
E	kN/m²	210.000E6	
γ	kN/m³	77.1100	
Beam type		User-defined	
А	m²	9.05000E-3	
I ₂	m4	0.0251000E-3	
I3	m4	9.24600E-6	
Rayleigh a		0.00000	
Rayleigh β		0.00000	

Figura 5.12 Parametri relativi alle travi di ripartizione

Gli ultimi elementi modellati sono stati i tiranti, collegati alla paratia di micropali ed inseriti all'interno del terreno. Nello specifico, tali elementi, sono costituiti da 2 tratti con comportamento strutturale differente. Il primo, collegato direttamente alle travi di ripartizione, definisce la *lunghezza libera del tirante*. Tale elemento, non genera alcuna interazione col terreno e funge da collegamento tra la paratia e il secondo tratto costituente il tirante. Quest'ultimo, che invece prende il nome di *lunghezza di infissione del tirante*, rappresenta l'elemento strutturale reagente dell'intero sistema di tiranti.

Alla luce di quanto detto, ai differenti elementi costituenti il tirante, sono stati attribuiti due diversi comportamenti strutturali:

• lunghezza libera del tirante: tale tratto viene modellato come Anchor, elemento avente solo resistenza assiale (Figura 5.13);

An	Anchor - Node to node Anchor				
	<u>.</u>				
Pr	operty	Unit	Value		
	Material set				
	Identification		Lunghezza libera del tirante		
	Comments				
	Colour		RGB 0, 0, 0		
	Material type		Elastic		
	Properties				
	EA	kN	300.000		

Figura 5.13 Parametri Ancoraggio

 lunghezza di infissione del tirante: viene attribuito il comportamento strutturale chiamato grout body, della sezione embedded beam. Tale tipologia è in grado di riprodurre l'interazione dell'elemento col terreno che determina la resistenza allo sfilamento dei tiranti.

Dai dati estratti dalla documentazione del caso studio è emerso che, il bulbo di ancoraggio del tirante, è ottenuto tramite iniezione di una miscela di calcestruzzo, avente determinate caratteristiche di aderenza col terreno. Di conseguenza, selezionando il comportamento *grout body* ed indicando i corrispondenti parametri, è stato possibile modellare il tratto di infissione (Figure 5.14 e 5.15).



Figura 5.14 Comportamento Grout body del bulbo di ancoraggio

Embedded beam - Bulbi ancoraggio				
<u></u>				
Property Unit Value				
Material set				
Identification		Bulbi ancoraggio		
Comments				
		_		
Colour		RGB 31, 244, 237		
Material type		Elastic		
Properties				
E	kN/m²	30.0000E6		
Y	kN/m³	24.0000		
Beam type		Predefined		
Predefined beam type		Massive circular beam		
Diameter	m	0.190000		
А	m²	0.0283529		
I ₂	m4	0.0639712E-3		
I3	m4	0.0639712E-3		
Rayleigh o		0.00000		
Rayleigh β		0.00000		
Axial skin resistance				
Axial skin resistance		Linear		
T _{skin, start, max}	kN/m	300.000		
T _{skin, end, max}	T _{skin, end, max} kN/m 0.00000			
Base resistance				
F _{max}	kN	0.00000		

Figura 5.15 Parametri bulbi d'ancoraggio

Definita la geometria del modello ed attribuito gli opportuni parametri, il risultato è illustrato nelle seguenti due immagini rappresentanti, rispettivamente, la paratia di micropali mutiancorata (Figura 5.16) e il modello del terreno (Figura 5.17).



Figura 5.16 Modello paratia multiancorata



Figura 5.17 Modello del terreno

Ultimata la creazione del modello, inizia la vera e propria modellazione. Come accennato precedentemente, il processo di analisi FEM, sul quale fa riferimento Plaxis 3D, consiste nel ricercare una soluzione approssimata delle equazioni differenziali relative ad un continuo discretizzato. Tale discretizzazione viene effettuata localmente su delle piccole regioni del continuo di forma arbitraria (Elementi Finiti) all'interno dei quali, qualsiasi parametro, non varia.

In relazione a quanto appena detto, il primo passaggio da effettuare riguarda la discretizzazione del continuo. Tale procedura consiste nella generazione della *mesh* del modello creato.

Preme sottolineare che, una prerogativa importante da impostare nella generazione della mesh, riguarda l'infittimento di questa in zone del continuo dove è possibile la presenza di un elevato gradiente di tensioni. Tale situazione si concentra, generalmente, in corrispondenza dell'area in cui è inserita la struttura.

Nel caso specifico, a seguito dell'impostazione degli opportuni parametri mirati a diminuire la grandezza degli elementi della maglia, in particolare nei volumi di scavo e negli elementi strutturali, si è ottenuta la seguente mesh (Figure 5.18 e 5.19):



Figura 5.18 Mesh Modello

Figura 5.19 Paricolare Mesh Paratia

Al fine di simulare il reale processo costruttivo dell'opera strutturale, è stato suddiviso il processo di analisi in differenti *stage* di calcolo. Tale metodologia, riproduce la corrispondente variazione tensionale che avviene durante la costruzione della paratia di micropali multiancorati. Il processo costruttivo analizzato fa riferimento alle fasi espresse nel modello informativo di installazione dell'opera nel terreno: la successione delle operazioni di scavo con l'inserimento dei tiranti ai quali viene applicata la corrispondente pretensione. Si riporta di seguito lo schema riassuntivo delle fasi che verranno successivamente descritte (Figura 5.20).

🜔 Calcolo tensioni [InitialPhase]	🔁 🕒 🚍
Annullamento deformazioni iniziali [Phase_1]	🖬 📑 🚍
Fase 1_primo scavo [Phase_2]	🖬 📑 🚍
Fase 2_installazione prima fila tiranti [Phase_4]	🖬 📑 🚍
Fase 3_secondo scavo [Phase_5]	🖬 📑 🚍
Fase 4_installazione seconda fila tiranti [Phase_6]	🖬 📑 🚍
Fase 5_terzo scavo [Phase_7]	🖬 📑 🚍
Fase 6_installazione terza fila tiranti [Phase_8]	M 🗄 🚍
Fase 7_ quarto scavo [Phase_9]	M 📑 🚍
Fase 8_installazione quarta fila tiranti [Phase_10]	M 📑 🚍
Fase 9_ quinto scavo [Phase_11]	🖸 📑 🚍
Fase 10_installazione quinta fila tiranti [Phase_12]	🖸 📑 🚍
Fase 11_sesto scavo [Phase_13]	🖸 📑 🚍
Fase 12_installazione sesta fila tiranti [Phase_14]	🖬 📑 🚍

Figura 5.20 Stage Construction

In merito alle fasi sopra espresse, con l'obiettivo di simulare nel modo più rappresentativo possibile la costruzione dell'opera, vengono impostate determinate condizioni che di seguito verranno espresse.

 Calcolo tensioni: la prima fase inserita è finalizzata al calcolo delle tensioni all'interno del modello. Di fatto, vengono inseriti tutti i solidi di terreno ed esclusi gli elementi strutturali. Il caso studio analizzato presenta condizioni stratigrafiche particolari in quanto, le superficie del terreno, non hanno un andamento orizzontale. Di conseguenza, dovendo considerare la rotazione dei piani principali all'interno del mezzo di terreno, bisogna fare riferimento all'analisi *Gravity Load (Figura 5.21)*. Tale analisi calcola le tensioni iniziali basandosi sul peso di volume del terreno.

Name		Value		
General				
ID		Calcolo tensioni [InitialPhas	e	
Calculation	type	🔂 Gravity loading	•	
Loading typ	e	Staged construction	•	
ΣM weight		1.00000)	
Pore pressu	ire calculation type	Phreatic •	•	
Time interv	al	0.00000 day	,	
Estimated e	nd time	0.00000 day	/	
First step		C)	
Last step		3	3	
Special opti	on	C)	
Deformation	control paramet	ers		
Ignore und	r. behaviour (A,B)	1		
Ignore suct	ion	\checkmark		
Numerical control parameters				
Reached value	Jes			
Heached value	Jes			

Figura 5.21 Impostazione fase iniziale di calcolo

 Annullamento deformazioni inziali: tale fase non produce alcuna variazione tensionale legata al processo costruttivo. Viene inserita al fine di annullare le deformazioni legate alle tensioni inziali in quanto riferite ad una condizione considerata stabile. Di fatto, durante l'analisi, si vuole porre l'attenzione solo in corrispondenza dell'opera da verificare.

Da questa fase in poi, le impostazioni relative alle analisi non vengono variate, ad eccezione del comando "*reset displacements to zero*". (*Figura* 5.22

Name		Value
	General	
	ID	Annullamento deformazioni il
	Start from phase	Calcolo tensioni 🔹 💌
	Calculation type	Plastic 🔹
	Loading type	🕒 Staged construction 💌
	ΣM _{stage}	1.00000
	ΣM _{weight}	1.00000
	Pore pressure calculation type	🖃 Phreatic 🔹
	Time interval	0.00000 day
	Estimated end time	0.00000 day
	First step	4
	Last step	13
	Special option	0
-	Deformation control paramet	ers
	Ignore undr. behaviour (A,B)	
	Reset displacements to zero	\checkmark
	Reset small strain	
	Reset state variables	
	Reset time	
	Updated mesh	
	Ignore suction	v
	Cavitation cut-off	
	Cavitation stress	100.000 kN/m²
÷	Numerical control parameters	5
Ŧ	Reached values	

Figura 5.22 Fase di annullamento deformazioni iniziali

- Fase 1_primo scavo: da questa fase inizia la riproduzione del processo costruttivo dell'opera. In particolare, in tale circostanza, viene simulata la rimozione del primo volume di scavo.
- *Fase 2_installazione prima fila di tiranti:* in tale fase viene attivata ed inserita la prima fila di tiranti con il corrispondente valore di pretensione.

Figura 5.23 Impostazione pretensione

 Fase 3 – Fase 12: nelle seguenti fasi vengono ripetute le operazioni effettuate nelle Fasi 1 e 2, rispettivamente di scavo e di installazione dei tiranti fino alla quota di progetto imposta.

Si riporta di seguito un'immagine relativa alla fase di completa installazione dell'opera geotecnica (Figura 5.24):

Figura 5.24 Rappresentazione ultima fase di analisi

1.15 Interpretazione dei risultati ottenuti dall'analisi FEM

Nel seguente paragrafo verranno confrontati i risultati ottenuti dall'analisi FEM eseguita con il codice di calcolo *Plaxis 3D*, relativi al modello importato dal software *Revit*, con i valori estratti dalla relazione tecnica relativa al medesimo caso studio.

Preme sottolineare che, come espresso nei precedenti paragrafi, il confronto appena indicato, è finalizzato a validare la qualità delle informazioni scambiate a seguito dell'analisi di interoperabilità eseguita. In considerazione del fatto che, i risultati estratti dalla documentazione relativa al caso studio, fanno riferimento ad un codice di calcolo bidimensionale che quindi utilizza modelli di analisi con geometria semplificata, è facile attendersi che i valori non risultino uguali. Tuttavia, per poter risultare accettabili, ci si aspetta che i risultati ottenuti siano quantomeno comparabili.

I dati estratti dalla relazione tecnica, relativa alla progettazione della paratia considerata, fanno riferimento a 3 sezioni specifiche considerate rappresentative (Figura 5.25):

Figura 5.25 Posizione delle sezioni analizzate

È possibile trovare una prima corrispondenza con le sezioni ritenute rappresentative, confrontando il risultato ottenuto relativo ai massimi spostamenti orizzontali (Figura 5.26).

Figura 5.26 Spostamenti orizzontali

Come è possibile osservare dall'immagine sopra riportata, le sezioni ritenute significative in fase di progettazione risultano nelle zone in cui vi è il massimo spostamento orizzontale.

In fase di progettazione, come si evince dalla documentazione tecnica, in tali sezioni, sono stati ricavati i dati relativi alle sollecitazioni e i rispettivi valori di massimo spostamento dei diversi elementi costituenti l'opera. Tali elementi verranno di confrontati separatamente.

<u>Tiranti</u>

Per quanto riguarda i tiranti, valore preso in considerazione risulta lo sforzo normale, come mostrato di seguito (Figura 5.27)

Tabella 5.11: SLU/STR - Valori delle azioni massime negli ancoraggi e veri					
ANALISI / FILA TIRANTI	Interasse [m]	N° trefoli	Inclinazione [°]	Pretensione [kN]	N _{anc} /m [kN/m]
CG_A19_16.4					
FILA 1	1.8	4	0	300	270
FILA 2	1.8	5	0	300	332
FILA 3	1.8	5	0	300	332
FILA 4	1.8	5	0	300	337
FILA 5	1.8	5	0	300	355
CG_A19_14.4					
FILA 1	2.5	4	10	300	164
FILA 2	2.5	5	10	300	206
FILA 3	2.5	5	10	300	204
FILA 4	2.5	5	10	300	208
FILA 5	2.5	5	10	300	219
CG_A19_16.4 I.0	Э.				
FILA 1	2.5	4	0	300	170
ANALISI / FILA TIRANTI	Interasse [m]	N° trefoli	Inclinazione [°]	Pretensione [kN]	N _{anc} /m [kN/m]
FILA 2	2.5	5	0	300	203
FILA 3	3.0	5	0	300	205
FILA 4	3.0	5	0	300	211
FILA 5	30.	5	0	300	213

Figura 5.27 Valori sforzo normale nei tiranti estratti dalla relazione tecnica

Dall'analisi eseguita con *Plaxis 3D*, selezionando i corrispondenti tiranti relativi alle varie sezioni, si ottengono i risultati rappresentati di seguito (Figura 5.28):

Figure 5.28 Valori di sforzo normale nei tiranti estratti da Plaxis

Le immagini sopra riportate, mettono in evidenza le prime differenze tra i due modelli. Tuttavia, nonostante risultino sollecitazioni maggiori rispetto i valori del progetto, si potrebbero considerare accettabili.

Travi di ripartizione

Per quanto riguarda le travi di ripartizione, nella documentazione, viene indicata solo la trave più sollecitata (Figura 5.29).

Travi di ripartizione	Analisi	Interasse [m]	N _{anc} × γ _F [kN]	M _x [kNm]	M _y [kNm]	T _x [kN]
HEB180	CG_AG_14.4	2.5	695	171	30	342
HEB180	CG_AG_16.4	3.0	863	255	45	425

Di seguito verranno espressi i valori massimi relativi alle travi di ripartizione (Figura 5.30).

Figura 5.30 Valori massimi delle travi di ripartizione estratte da Plaxis 3D

I valori ottenuti risultano lontani dai quelli estratti dal progetto. Tali elementi sono legati alla piastra rappresentante la paratia, la quale, avendo un comportamento strutturale differente rispetto l'ipotesi assunta in un modello bidimensionale, influenzerà la risposta della trave.

<u>Piastra</u>

Tale elemento, come accennato precedentemente, viene schematizzato in due tipologie completamente differenti: in *Plaxis 3D* come elemento bidimensionale, nel software 2D del progetto, tramite un elemento trave. In funzione di quanto detto, diviene difficile confrontare i diversi valori di sollecitazione. L'unico valore riguardante la paratia, di cui si è tenuto conto, è lo spostamento massimo orizzontale locale. Si riporta di seguito la sezione in cui è stato rilevato il massimo spostamento corrispondente a "CG_AG_16.4 I.G." (Figura 5.31).

Tabella 5.9: Caratteristiche della sezione analizzata e massime deformazioni					
SEZIONE	Interasse mediopali [m]	Altezza fuori terra [m]	Massima deformazione [cm]		
CG_AG_16.4	0.4	16.4	1.1		
CG_AG_14.4	0.5	14.4	0.7		
CG_AG_16.4 I.G.	0.4	16.4	1.5		
			•		

Figura 5.32 Valore di massimo spostamento estratto da Plaxis 3D

Nell'immagine sopra espressa, viene rappresentato il parametro di spostamento locale. Tale parametro risulta molto simile al valore progettuale, ed è possibile ritenerlo rappresentativo.

6. CONCLUSIONI

Col presente elaborato di tesi si è verificata l'applicabilità della metodologia BIM all'ingegneria geotecnica. Tale approccio, che mira a rappresentare un modello virtuale capace di gestire il processo di realizzazione di un'opera in tutte le sue fasi e richiede un sistema collaborativo, ha fatto sì che si raggiungessero due obiettivi: la creazione del modello informativo di un'opera geotecnica e l'interoperabilità con un software di calcolo agli elementi finiti. Tuttavia, nonostante i risultati ottenuti, emergono diversi limiti e nascono spunti per eventuali sviluppi futuri.

Nella prima parte di tesi, attraverso un determinato approccio metodologico si è generato un modello informatizzato del terreno, nel quale è stata inserita l'opera geotecnica progettata. Tale modello, che nasce dall'informatizzazione delle indagini geotecniche del sito, rappresenta un database contenente tutti i dati geotecnici e le scelte progettuali, utili per la costruzione dell'opera. Inoltre, essendo un modello virtuale che riproduce il più possibile la condizione reale, questo comporta numerosi vantaggi in termini di visualizzazione ed interpretazione. Di fatto, esso rappresenta un grosso strumento di comunicazione per l'ingegnere geotecnico, in quanto consente a chiunque di comprendere un eventuale problema che potrebbe influenzare un determinato progetto.

Tuttavia, nella generazione del modello, sono stati riscontati diversi limiti nella metodologia. Il più rilevante è stato riscontrato nella creazione delle superfici costituenti la stratigrafia del sottosuolo. La precisione nella creazione di quest'ultime è dipendente dal numero di indagini presenti in sito e dalla loro rispettiva posizione. Al fine di modellare un'opportuna geometria è fondamentale effettuare una campagna indagini ben distribuita.

Nella parte finale del lavoro di tesi si è effettuata un'analisi di interoperabilità tra il software *Revit* e *Plaxis 3D*. Nello specifico, è stato importato in quest'ultimo software, il modello informativo precedentemente creato. Tramite l'apposito processo di flusso, si è modellato il problema geotecnico in *Plaxis 3D* in modo da poter procedere con le analisi. Quest'ultime, non finalizzate alla progettazione ma, bensì, alla verifica delle informazioni trasmesse, hanno prodotto risultati ritenuti accettabili. Tale condizione ha permesso di validare l'interoperabilità tra i due software, aspetto fondamentale nella metodologia in quanto, solo in un'ambiente di lavoro collaborativo è possibile gestire un intero processo di realizzazione di un'opera.

Il passaggio diretto del modello dal software BIM riduce la perdita di informazioni e offre la possibilità di analizzare diversi ipotesi di progetto in modo rapido, attraverso una vera e propria analisi parametrica. Preme sottolineare che, in un'ottica futura in cui vi sarà la totale obbligatorietà della metodologia BIM, l'aspetto analizzato risulta fondamentale.

È importante sottolineare, tuttavia, che non si è ancora nella condizione di passaggio diretto in quanto, l'unica informazione trasmessa attualmente è la geometria. Quest'ultima, semplifica notevolmente la costruzione del modello ma, non lo ottimizza del tutto.