POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile



Tesi di Laurea Magistrale

MODELLO GEO-BIM DEL SOTTOSUOLO E DEGLI SCAVI DELLA TORRE DELLA REGIONE PIEMONTE. STRUMENTI E METODI PER L'INTEROPERABILITÀ.

Relatore: Prof.ssa Anna OSELLO Correlatori: Dott.ssa Arianna FONSATI Ing. Renato COSENTINI

Chiara TUNDO

Anno Accademico 2018/2019

A mio nonno Michele. Coloro che amiamo e che abbiamo perduto non sono più dove erano ma sono ovunque noi siamo (S. Agostino)

Abstract

Da diversi anni il BIM (Building Information Modeling) si sta facendo strada nel mondo della progettazione ingegneristica delle costruzioni, rivoluzionandone i metodi d'approccio. I vantaggi del passaggio da CAD a BIM sono molteplici: da un nuovo modo globale di pensare l'opera all'ampliamento dei dati nel modello progettuale, dalla più efficiente collaborazione tra i diversi professionisti al risparmio di tempo e costi.

Attualmente, tuttavia, poca attenzione è stata riservata all'applicazione del BIM alla Geotecnica da parte delle software house. Eppure, l'estensione del BIM all'ambito geotecnico porterebbe ad un modello finale ancora più completo, contribuendo a fornire più elementi di valutazione ai soggetti coinvolti nel progetto.

Lo scopo del presente lavoro di tesi è quello di indagare l'interoperabilità tra diversi software di modellazione del terreno ed i più comuni programmi BIM-based. La ricerca è stata condotta per mezzo di un caso studio reale, lavorando sulla stratigrafia del sottosuolo della Torre della Regione Piemonte.

Partendo dai dati relativi ai fori di sondaggio della campagna di rilievo, sono stati analizzati e confrontati diversi software di modellazione geotecnica. L'attenzione si è focalizzata, oltre che sui formati di importazione e le potenzialità dei programmi nella modellazione del terreno, anche e soprattutto sulla possibilità di interazione con i più comuni software di progettazione BIM.

Creato un modello Geo-BIM, è stato inoltre studiato un metodo per far interagire il suddetto con il modello della Torre in ambiente BIM.

Abstract (English version)

For several years, BIM has been introduced in buildings engineering design, obtaining a revolution of approach methods. The switch from CAD to BIM has led many benefits, such as a new global way of thinking about work, a data expansion in a project, an efficient collaboration between engineers, a saving of time and money, and so on.

However, currently, the software houses don't give the appropriate attention to the application of BIM methods to Geotechnics. Though, if they extended the BIM approach to the geotechnical field, they could obtain a detailed final model and different engineers could have more evaluation elements about the same project.

The aim of this thesis is a research about the interoperability between some geotechnical modeling softwares and the most common BIM-based softwares. The search was conduced through a real study case, working on the stratigraphy of the Piedmont Regional Tower's underground.

Starting from the boreholes' information of the geotechnical survey, different kinds of geotechnical modeling softwares were tested and compared. The attention was focused on the import formats, on the softwares potenciality, but above all on their interaction with the most common BIM softwares. After the creation of the Geo-BIM model, its interaction with the tower was analyzed with a specific study.

Indice

Abstract	1
Abstract (English version)	2
Indice	3
Indice delle Figure	5
Indice delle Tabelle	8
Introduzione	9
CAPITOLO 1. BIM: Building Information Modeling	11
1.1 Cos'è la metodologia BIM?	11
1.2 Diffusione del BIM nei diversi ambiti progettuali	13
1.3 Interoperabilità	15
1.4 Il BIM applicato alla Geotecnica: Metodologia Geo-BIM	
CAPITOLO 2. Caso Studio: Torre della Regione Piemonte	20
2.1 Inquadramento generale	20
2.2 Dati del rilievo geologico e geotecnico	24
CAPITOLO 3. Metodologia e workflow	29
3.1 Approccio e test d'interoperabilità	
3.1.1 Stato dell'arte	
3.1.2 Digitalizzazione dei dati	
3.1.3 Test di interoperabilità e visualizzazione dei dati geotecnici	43
3.1.4 Potenzialità e criticità nella modellazione della stratigrafia	
3.2 Benchmark	
3.3 Valutazione della performance delle piattaforme software	
CAPITOLO 4. Risultati	
4.1 Modellazione	
4.1.1 Stratigrafia	

4.1.2 Interazione del modello geotecnico con gli scavi	.87
4.1.3 Modello federato multidisciplinare	.89
4.2 Data Repository	.92
CAPITOLO 5. Conclusioni	.93
Bibliografia	.95
Sitografia	.96
Ringraziamenti	.97

Indice delle Figure

Figura 1. Ciclo di vita di un'opera rappresentabile con la metodologia BIM	
Figura 2. IFC (Industry Foundation Classes)	15
Figura 3. Interoperabilità in Open BIM con il formato IFC	16
Figura 4. Vista aerea dell'area oggetto degli interventi di trasformazione urbana - Lotto 3	20
Figura 5. Modello del progetto della Torre dell'arch. Fuksas	21
Figura 6. Visualizzazione della Torre e dell'area circostante	22
Figura 7. Schema dell'area di intervento, con spaccato delle fondazioni e del sottosuolo	25
Figura 8. Planimetria dei fori di sondaggio dei Lotti 1, 2, 3	26
Figura 9. Planimetria dei fori di sondaggio del Lotto 3	27
Figura 10. Modellazione del Lotto 1 in Civil 3D	28
Figura 11. Modellazione del Lotto 2 in Civil 3D	28
Figura 12. Workflow	29
Figura 13. Legenda dei tre livelli di interoperabilità utilizzati	
Figura 14. Logo di ArcGIS	31
Figura 15. Logo di RockWorks	31
Figura 16. Logo di Novapoint	31
Figura 17. Processo per i test di interoperabilità su ArcGIS	43
Figura 18. DEM creato su ArcMap	45
Figura 19. DEM importato su ArcScene	46
Figura 20. Formattazione dei dati in Excel (.xlsx) per l'importazione su ArcScene	46
Figura 21. Formattazione dei dati in .csv per l'importazione dei boreholes in ArcScene	47
Figura 22. Visualizzazione dei boreholes in 3D su ArcScene	48
Figura 23. Dettaglio della visualizzazione dei boreholes in 3D su ArcScene	48
Figura 24. Processo per i test d'interoperabilità su RockWorks.	49
Figura 25. Formattazione dei dati in Excel (.xlsx) per l'importazione su RockWorks (Locati	on) 50
Figura 26. Formattazione dei dati in Excel (.xlsx) per l'importazione su RockWorks (Stra	tigraphy)
	51
Figura 27. Formattazione dei dati in Excel (.xlsx) per l'importazione su RockWorks (Lith T	ype)51
Figura 28. Importazione boreholes in RockWorks	
Figura 29. Visualizzazione dei boreholes in 2D e 3D in RockWorks	53
Figura 30. Modello semplificato di stratigrafia con RockWorks	54

Figura 31. Visualizzazione delle importazioni dei file di RockWorks (.dxf) in Revit	55
Figura 32. Visualizzazione delle importazioni del modello di RockWorks (.dxf) in 3D Studio	55
Figura 33. Visualizzazione dell'importazione del modello di 3D Studio (.sat) in Revit	56
Figura 34. Visualizzazione delle importazioni del modello di RockWorks (.dxf) in Civil 3D	56
Figura 35. Processo per i test di interoperabilità su Novapoint	57
Figura 36. Formattazione dei dati per l'importazione in Civil 3D con Geotechnical Module	58
Figura 37. Visualizzazione in 3D dei boreholes su Civil 3D con Geotechnical Module	60
Figura 38. Visualizzazione dei punti rappresentativi dei boreholes importati (.dwg) in Novapoi	nt.61
Figura 39. Visualizzazione dei boreholes in 3D in RockWorks	62
Figura 40. Metodo di interpolazione dei dati in RockWorks - Kriging	63
Figura 41. Modello del terreno in RockWorks con interpolazione Kriging	64
Figura 42. Metodo di interpolazione dei dati in RockWorks - Triangolazione	64
Figura 43. Modello del terreno in RockWorks con Triangolazione	65
Figura 44. Errore in RockWorks nell'importazione dei boreholes, dovuto alla complessità del mo	odello
	66
Figura 45. Creazione delle superfici stratigrafiche in Novapoint	67
Figura 46. Cross section della stratigrafia	67
Figura 47. Successione degli strati nella cross section	68
Figura 48. Customizzazione dei layer in Novapoint	69
Figura 49. Superfici del modello stratigrafico in Novapoint	71
Figura 50. Volumi del modello stratigrafico in Novapoint	72
Figura 51. Esempio di visualizzazione delle proprietà di uno strato in Novapoint	73
Figura 52. Visualizzazione dei borehole importati su Novapoint e creati su RockWorks	73
Figura 53. Conversione Rule Editor di Novapoint	74
Figura 54. Visualizzazione dell'importazione del modello di Novapoint (.ifc) in BIM Vision	75
Figura 55. Visualizzazione dell'importazione del modello di Novapoint (.ifc) in Revit	76
Figura 56. Visualizzazione dell'importazione del modello di Novapoint (.ifc) in Civil 3D	76
Figura 57. Visualizzazione dell'importazione del modello di Novapoint (.dwg) in Civil 3D	77
Figura 58. Geolocalizzazione della Torre nel modello di Novapoint (IFC Reader Settings)	79
Figura 59. Visualizzazione della Torre importata da Revit (.ifc) in Novapoint	80
Figura 60. Benchmark	82
Figura 61. Modello della stratigrafia del Lotto 3 in Novapoint	84
Figura 62. Modello delle superfici stratigrafiche del Lotto 3 in Novapoint	85

Figura 63. Modello della superfice topografica e dei boreholes del Lotto 3 in Novapoint	85
Figura 64. Long section 1	86
Figura 65. Long section 2	86
Figura 66. Long section 3	86
Figura 67. Modellazione del volume di scavo in Novapoint	87
Figura 68. Tabella con il valore del volume di scavo	
Figura 69. Interazione tra scavi e Torre	
Figura 70. Interazione tra scavi, ground surface e Torre	
Figura 71. Modello federato multidisciplinare in Novapoint	90
Figura 72. Modello stratigrafico dei Lotti 1, 2 e 3 in Novapoint	90
Figura 73. Ground surface e boreholes di Lotto 1, 2 e 3 in Novapoint	91
Figura 74. Attachment del file .xlsx delle prove geotecniche in Novapoint	92

Indice delle Tabelle

Tabella 1. Codifica della nomenclatura degli strati di terreno del Lotto 3	
Tabella 2. Stratigrafia dei Boreholes del Lotto 3	
Tabella 3. Posizionamento in coordinate piane (WGS84/UTM 32N), elevazione, pro	fondità e quota
piezometrica dei boreholes del Lotto 3	
Tabella 4. Risultati della Prova Lefranc	40
Tabella 5. Risultati della prova pressiometrica MPM	41
Tabella 6. Limiti di Atterberg	42
Tabella 7. Nuova codifica per la nomenclatura dei materiali della stratigrafia	59
Tabella 8. Criticità nella creazione dei volumi su tutta l'area di indagine	70
Tabella 9. Schema creazione dei volumi dell'area principale	70
Tabella 10. Schema creazione dei volumi dell'area secondaria	71
Tabella 11. Valutazione della performance delle piattaforme software	

Introduzione

Già da diversi anni la metodologia BIM sta sostituendo i tradizionali metodi di disegno in CAD, fornendo non solo un nuovo modo di rappresentare, ma anche e soprattutto un nuovo modo di pensare e progettare l'opera. Aspetto fondamentale, infatti, di questo metodo è la possibilità di utilizzare una modellazione informativa, ricca di attributi fondamentali per i progettisti, i committenti, i costruttori e tutte le altre figure professionali coinvolte nel processo. In questa logica, avere a disposizione anche i dati geotecnici contribuirebbe a rendere il modello finale più completo e ad agevolare i professionisti nel prendere delle decisioni commisurate all'interazione tra sovrastruttura e terreno di fondazione. Questo problema, tuttavia, non è stato particolarmente sentito, sia da parte delle software house, che non hanno messo a punto dei programmi specifici per integrare la parte geologica e geotecnica nel modello generale, sia da parte del mondo della ricerca, che solo in pochi casi specifici ha cercato di affrontare la questione. Tuttavia, negli ultimi anni il trend si sta invertendo, riscontrando un nuovo interesse in questa direzione, ma rimangono ancora molti problemi da risolvere, come ad esempio quali software sia meglio utilizzare per ogni caso particolare, che tipo di dati possono essere utilizzati, quali sono i formati di output, come differenti informazioni possono essere usate e connesse a diversi oggetti, ecc. È in questo ambito che è stata sviluppata l'idea per il presente lavoro di tesi, cercando di trovare dei metodi di interoperabilità tra software di modellazione stratigrafica e quelli BIM-based e, più in generale, provando a realizzare un modello Geo-BIM di sottosuolo (comprensivo degli scavi di fondazione). È di interesse soprattutto la fase di data repository, necessaria per avere a disposizione in un unico ambiente di lavoro tutti i dati disponibili, relativi a qualsiasi ambito specifico di progettazione, riguardanti un'opera. La base di lavoro è un caso studio reale e pertanto la modellazione della stratigrafia sottostante la Torre delle Regione Piemonte di Torino, in modo da poter testare in modo efficace le diverse metodologie studiate, rilevandone pregi e criticità.

CAPITOLO 1. BIM: Building Information Modeling

1.1 Cos'è la metodologia BIM?

Il termine BIM è l'acronimo di Building Information Modeling/Model e identifica "una procedura ottimizzata per la pianificazione, realizzazione e gestione di costruzioni tramite l'ausilio di software dedicati alla modellazione digitale tridimensionale" (Osello, Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti, 2012).

Nell'uso comune, erroneamente, si intende il BIM come una serie di prodotti o programmi di rappresentazione 3D; è invece importante sottolineare che i software dedicati alla modellazione digitale tridimensionale sono solo il mezzo per realizzare questo tipo di procedura. Infatti, la metodologia BIM costituisce una vera e propria rivoluzione nel modo di disegnare e progettare le costruzioni: gli oggetti 3D rappresentati sono "parametrici", ossia ad essi sono associate regole e informazioni progettuali e relative all'intero ciclo di vita della struttura o manufatto.

Con il BIM è possibile creare un modello multidisciplinare dove vengono acquisite ed elaborate le informazioni relative all'intero ciclo di vita di un'opera, dalla progettazione all'eventuale rimozione (Figura 1).



Figura 1. Ciclo di vita di un'opera rappresentabile con la metodologia BIM (Fonte: https://www.youbuildweb.it/2017/09/29/bim-progettazione-integrata/)

Il modello creato, oltre alla mera rappresentazione geometrica in 3D, è interdisciplinare, condiviso e caratterizzato da un dinamismo che consente anche l'integrazione in qualsiasi momento di informazioni aggiuntive. L'idea è quella di avere un modello virtuale dell'opera ancor prima di realizzarla, attraverso la collaborazione di tutti i soggetti coinvolti nella progettazione.

Questo è possibile grazie a diverse applicazioni per la digitalizzazione e l'elaborazione dei dati. Gli strumenti BIM si distinguono in due classi: software BIM authoring e BIM tools. I primi permettono di realizzare modelli tridimensionali dotati di proprietà relative ad una specifica disciplina (architettonica, strutturale, impiantistica, ecc.), definendo il database di progetto. I secondi, invece, sono ausiliari e collegati ai primi e consentono di eseguire diversi tipi di analisi specifiche (strutturali, energetiche, ecc.) che altrimenti non si potrebbero realizzare.

1.2 Diffusione del BIM nei diversi ambiti progettuali

Il metodo BIM ha portato una tale rivoluzione nell'ambito delle costruzioni che l'intera comunità internazionale si è mossa per standardizzare, adottare e integrare questa tecnologia. In Europa, i pionieri in materia sono stati i Paesi del Nord: la Finlandia ha reso obbligatorio l'utilizzo del BIM già nel 2007, mentre la Norvegia l'ha fatto per tutti i progetti promossi dall'ente che gestisce il patrimonio immobiliare dello Stato. A ciò è seguita una direttiva europea nel 2014, così di seguito la Gran Bretagna ha imposto il BIM nei progetti di governo dal 2016. In Francia sono stati realizzati diversi progetti pilota ed è stata creata una commissione per analizzare l'implementazione della metodologia; non vi è però un obbligo ufficiale ad utilizzare il BIM per gli appalti pubblici, anche se molte esperienze lo prevedono anche senza la legge (es. Grand Paris). Si segnala inoltre la normativa internazionale in ambito BIM denominata Information management using building information modelling (ISO 19650).

In Italia, il processo è stato più lento, risale infatti al 2017 (in ritardo rispetto al resto dell'Europa e del mondo) il Decreto BIM (<u>DM 560/2017</u>), che ha reso obbligatorio l'utilizzo di questa metodologia per le opere pubbliche a partire dal 2019. L'introduzione di questa tecnologia segue una scansione temporale che terminerà nel 2025:

- dal 2019 per le opere oltre i 100 milioni di euro;
- dal 2020 per i lavori complessi oltre i 50 milioni di euro;
- dal 2021 per i lavori complessi oltre i 15 milioni di euro;
- dal 2022 per le opere oltre i 5,2 milioni di euro;
- dal 2023 per le opere oltre 1 milione di euro;
- dal 2025 per tutte le nuove opere.

Inizialmente il BIM veniva utilizzato quasi esclusivamente nell'ambito delle costruzioni edilizie, ma con il tempo l'efficienza del metodo ha portato all'espansione dello stesso anche in altri ambiti, soprattutto quello dell'Ingegneria Civile. Sono nate pertanto in generale le seguenti permutazioni del termine:

 Geo-BIM: consente la gestione delle azioni che possono governare/modificare il sottosuolo e tutti i dati ad esso geo-relazionati, come quelli geologici, gli oggetti e le proprietà idrogeologiche e geotecniche (Zobl, Marshchallinger 2008);

- InfraBIM: è il sistema di gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni infrastrutturali. Esso interessa tutta la vita dell'infrastruttura, dal progetto alla manutenzione;
- LIM: è l'utilizzo delle caratteristiche del BIM nella progettazione del paesaggio, con l'obiettivo di fornire un modello di informazioni per la progettazione paesaggistica, consentendo un'integrazione della progettazione paesaggistica con quella urbana e la realizzazione dl costruito (Zajickovà, Achten 2013);
- H-BIM (Historic Information Modeling): si sofferma sulla fase della conoscenza geometrica, materica e storica dell'edificio, attraverso il rilievo, la definizione del tipo e dello stato di conservazione dei materiali, rappresentando un repository tridimensionale principalmente orientato alla documentazione del bene e alla pianificazione degli interventi di restauro consapevoli (Continenza, Giannangeli, Tata, Trizio 2016) (Dore Murphy 2012);
- SeismicBIM: l'attenzione viene concentrata sulla parte strutturale degli edifici resistente alle azioni sismiche (Welch, et al 2014).

1.3 Interoperabilità

Come precedentemente sottolineato, uno dei punti di forza della metodologia BIM, rispetto ai metodi di progettazione passati, è la possibilità di collaborazione tra i diversi professionisti coinvolti sia in fase di progettazione che di mantenimento dell'opera. Essi devono quindi essere in grado di scambiarsi informazioni e file in modo semplice ed efficace. È pertanto necessario definire il concetto di interoperabilità, ossia lo scambio dei dati del modello provenienti dalle diverse piattaforme software con le quali si è operato nei diversi ambiti dell'attività. Il problema fondamentale per l'interazione delle informazioni è la compatibilità, che si limita all'utilizzo solo di determinati software creati appositamente per comunicare tra loro, previo accordo di collaborazione tra le case produttrici.

Tradizionalmente la risposta a questa necessità in ambito BIM è costituita dall'utilizzo da parte dei progettisti di un unico software con diverse sezioni, ognuna dedicata ad un ambito specifico, grazie al quale ogni soggetto può collaborare con gli altri aggiungendo la propria parte di informazioni e progettando su un unico modello condiviso da tutti. In alternativa, vi sono specifici formati file per realizzare processi di trasformazione e integrazione dei "sottomodelli" in un unico modello federato.

Tuttavia, negli ultimi anni, si sta facendo strada anche un altro tipo di concetto, ossia l'Open BIM, che esprime al massimo grado l'idea di interoperabilità. Alla base di tale metodo vi è un'idea nata negli anni '90 e poi sviluppata nel 2005 dall'associazione no-profit BuildingSMART International, cioè quella di utilizzare un unico formato di interscambio dati, il cosiddetto IFC (Industry Foundation Classes). La proprietà principale di questo formato è quella di essere un formato aperto non proprietario, cioè basato su una tecnica di pubblico dominio, libera da restrizioni legali per il suo utilizzo e realizzata in accordo ad uno specifico standard internazionale (ISO16739:2013).



Figura 2. IFC (Industry Foundation Classes) (Fonte: <u>https://www.ingenio-web.it/19950-il-dizionario-della-digitalizzazione-i-come-ifc</u>)

Questo processo prevede la possibilità di lavorare con diversi software e poi poter scambiare file tra essi. In questo modo il formato IFC consente al progettista da un lato di continuare a lavorare con

alcuni degli strumenti che gli sono familiari, dall'altro permette la fruizione di tutte le informazioni contenute nel progetto. L'utente può inoltre mettere in relazione i dati con altre piattaforme software dedicate ad altri aspetti dell'opera, sia nel corso del proprio lavoro sia in fase di collaborazione con altri.



Figura 3. Interoperabilità in Open BIM con il formato IFC (Fonte: https://www.cadenas.de/fr/actualites/communiques/reader/items/cadenas-supporta-il-formato-di-scambio-ifc-per-il-bim)

Tuttavia, l'utilizzo di questo formato presenta anche delle criticità. Mentre nello scambio di file tra programmi sviluppati dalla stessa casa software non vi sono problemi di condivisione, o sono comunque ridotti, in uno scenario Open BIM, il passaggio di dati tra diversi applicativi avviene, come detto, con files standard in formato non proprietario. L'IFC è strutturato secondo una struttura dati molto articolata e complessa, organizzata in classi, cioè categorie di informazioni in cui vengono codificati i dati relativi ad un'opera. Se però ci si vuole addentrare in un grado di maggiore dettaglio, si nota che alcune informazioni troppo specifiche vengono perse, in quanto le classi di informazioni adibite a veicolarlo non sono sviluppate per raggiungere il grado di approfondimento nativo. In alcuni casi addirittura il trasferimento non è proprio concesso e le informazioni vengono perse nello scambio tra software. Quindi, il fatto che l'IFC sia un formato aperto non proprietario ne rappresenta un punto debole, a causa della considerevole perdita di informazioni.

Attualmente il concetto di Open BIM non è ancora completamente diffuso, in quanto molte case produttrici continuano ad optare per file in formato proprietario, ma ultimamente sempre più programmi supportano anche la modalità IFC, orientandosi verso una prospettiva Open BIM.

Una specifica forma di interoperabilità su cui si lavora da tempo è quella tra GIS (Geographic information System) e BIM. Infatti, da un lato le informazioni GIS sono fondamentali per la pianificazione e la gestione delle infrastrutture nel contesto in cui sono collocate, dall'altro le informazioni BIM sono necessarie per il progetto e la realizzazione di tali opere. Di conseguenza unendo i due elementi si ha un contesto geospaziale integrato nel modello BIM. Inoltre, i dati BIM si applicano alla progettazione e alla costruzione di una singola opera, mentre, integrandoli con il GIS, si può ottenere una rappresentazione in scala urbana, regionale e nazionale e la struttura viene gestita in un contesto più ampio e intelligente. Tutto ciò porta ad una maggiore efficienza nella progettazione e ad un risparmio di tempi e costi, aspetti fondamentali nell'attuale industria delle costruzioni.

1.4 Il BIM applicato alla Geotecnica: Metodologia Geo-BIM

Nella redazione di un progetto è fondamentale tenere in conto dell'inquadramento geotecnico dell'opera, in quanto quest'ultimo influenza sia i tempi che i costi dell'intera progettazione. Conoscere, infatti, la complessità geologica del sottosuolo è fondamentale per impostare una strategia di pianificazione, progettare e gestire opere private e territoriali, come scavi in sotterraneo, valutazione delle risorse idriche, bonifica, rischio sismico, ecc. Inoltre, modellando in 3D il sottosuolo si può ottenere una rappresentazione della realtà più coerente ed esaustiva rispetto ai tradizionali metodi 2D, in quanto vengono convogliate in un unico file tutte le informazioni che generalmente vengono visualizzate con sezioni geologiche, sondaggi, linee sismiche e così via. Questo tipo di modellazione inoltre è di più semplice lettura e può essere compresa anche da figure estranee agli ambiti specialistici, come amministratori, committenti, ecc.

Individuare precisamente la stratigrafia di un terreno a seguito dei rilievi in situ e delle prove di laboratorio, prevederne il comportamento e studiarne l'interazione con le sovrastrutture sono tutte operazioni fondamentali ma che comportano diversi problemi progettuali legati all'imprevedibilità dell'elemento naturale. Quindi, se già di per sé l'ambito geotecnico ha numerose difficoltà, non stupisce che anche la metodologia BIM fatichi a interagire in modo ottimale con questa materia.

Attualmente, è uso comune tra i fruitori del BIM, progettare e rappresentare unicamente le sovrastrutture, relegando alla modellazione del sottosuolo un ruolo marginale e approssimandolo ad un mezzo unico ed omogeneo. È fondamentale invece avere consapevolezza che il terreno è un mezzo disomogeneo ed anisotropo, con variazioni spaziali e temporali che influenzano la sicurezza e la stabilità delle opere sovrastanti. Le informazioni sulla stratigrafia del sottosuolo e sulla caratterizzazione dei diversi strati sono indispensabili non solo in fase di progettazione, ma anche nel corso delle successive fasi di manutenzione, pertanto esse devono essere sempre fruibili per gli addetti ai lavori.

È impensabile che in un modus operandi così fluido e veloce di scambio dei dati tra progettisti, come quello che la rivoluzione del BIM ha portato, un professionista debba ancora consultare pagine e pagine di relazioni geotecniche per trovare i dati necessari. Non meno importante è la possibilità di interpretare meglio questi dati, grazie all'interrogazione di un modello digitale informativo da cui è possibile estrarre viste tridimensionali a seconda dell'esigenza riscontrata. In quest' ottica, quindi, recentemente si è compresa l'importanza della presenza dei dati geotecnici nel modello generale, cercando di sviluppare l'interoperabilità tra BIM e Geotecnica. Infatti, attualmente in letteratura si

incontrano pochi articoli riguardo tale argomento e nella maggior parte dei casi tali pubblicazioni riguardano modelli analitici con attributi esclusivamente geometrici. Si faccia riferimento ai paper di Kavoura K. et al. (2017) "3D Subsurface geological modeling using GIS, remote sensing and boreholes data" e di Fjeldsted E. et al (2016) "Visualizing Boreholes in 3D Using GIS", entrambi relativi alla modellazione della stratigrafia del sottosuolo utilizzando software GIS. Si segnala inoltre la tesi di laurea magistrale di Azaronak N. (2015) "Building 3D models from geotechnical data", in cui vengono indagate diverse metodologie di modellazione Geo-BIM.

Con Metodologia Geo-BIM si vuole intendere la creazione di un modello informativo tridimensionale che riproduca il terreno in ambiente BIM, che sia quindi caratterizzato da un database di attributi riguardanti le caratteristiche ottenute dai rilievi geologici e che sia in grado di interagire con il modello della sovrastruttura.

CAPITOLO 2. Caso Studio: Torre della Regione Piemonte

2.1 Inquadramento generale

Lo studio di interoperabilità tra BIM e Geotecnica è stato condotto per mezzo di un caso studio reale. Esso riguarda la modellazione BIM del sottosuolo dell'area di costruzione del Nuovo Palazzo della Regione Piemonte, sita nel Comune di Torino e prospiciente Via Nizza all'altezza della zona "Lingotto". In particolare, si fa riferimento al cosiddetto Lotto 3, individuabile in Figura 4 e così denominato dagli addetti ai lavori per distinguerlo dagli adiacenti Lotto 1 e Lotto 2 (Figura 4).



Figura 4. Vista aerea dell'area oggetto degli interventi di trasformazione urbana - Lotto 3 (Fonte: Relazione Geologica e Geotecnica della Regione Piemonte)

Volgendo uno sguardo d'insieme al progetto della Torre, esso si colloca in un piano più generale di riqualificazione urbana delle ex aree industriali Fiat Avio e RFI, con diversi ambiti di intervento tra i quali spicca appunto la realizzazione dell'edificio da adibire a nuova sede della Regione Piemonte.

Il progetto del grattacielo tuttavia non è sempre stato quello attuale, infatti la prima programmazione era differente dall'attuale, sia dal punto di vista progettuale che da quello della collocazione. Richiamando qualche cenno storico, la storia del Nuovo Palazzo della Regione Piemonte comincia nel 2001, quando la giunta regionale di Enzo Ghigo bandisce un concorso internazionale per la sua progettazione e realizzazione nell'area compresa tra Corso Mediterraneo, Corso Lione e via Mauri (ex-Meterferro). La gara viene vinta dallo studio di progettazione dell'architetto Massimiliano Fuksas, con un progetto di una torre alta 100 metri, in rispetto all'ordinanza comunale che impediva di costruire edifici più alti della Mole Antonelliana (167.5 m) per preservare la predominanza del simbolo torinese nello skyline cittadino. Il passaggio all'attuale progetto avviene nel 2005, quando vi è un cambio di giunta regionale. Con il nuovo Presidente Mercedes Bresso, il progetto viene ricollocato nella vecchia area industriale di Nizza Millefonti.



Figura 5. Modello del progetto della Torre dell'arch. Fuksas (Fonte: www.fuksas.it/it/Nuova-Sede-Regione-Piemonte_Turin)

Nel 2006 l'architetto Fuksas viene incaricato di modificare il progetto originario per adattarlo alla nuova area di collocazione, anche in seguito alla variante del piano regolatore che restringeva al solo centro storico della città il divieto di realizzare edifici più alti della Mole. Questo ha consentito al team di Fuksas di presentare l'attuale progetto (Figura 5), con un grattacielo alto il doppio rispetto a quello precedentemente progettato, una struttura di rilevante sviluppo verticale di altezza pari a 205 m per un totale di 42 piani. La pianta dell'edificio è a sezione all'incirca quadrata con lati di 44 x 48 m (lato di 44 m sub-parallelo a Via Nizza). La torre risulta fondata su di una piastra di fondazione a pianta quadrata di 55 m di lato e spessa 4 m e presenta una corte interrata ai livelli interrati -1 e -2 dove sono stati progettati degli spazi a servizio della struttura principale. Annesso alla torre è il nuovo Centro Congressi (che include anche un asilo per i figli dei dipendenti), a pianta rettangolare di circa 54x36m e alto circa 26m, con fondazioni dirette su plinti. In ultimo, completa il quadro delle opere del Lotto 3 la nuova sede del Consiglio Regionale, a pianta quadrata 80 x 80 m, 5 piani fuori terra, con fondazioni dirette su plinti. A ciò si aggiunge anche la realizzazione di una nuova viabilità di superficie ed in sotterraneo.



Figura 6. Visualizzazione della Torre e dell'area circostante (Fonte: Google Earth)

La progettazione del grattacielo è stata svolta secondo tecniche tradizionali, ma successivamente è stato ritenuto necessario avere a disposizione degli strumenti informatici più adatti al facilities management dell'intero edificio. Pertanto, il team di ricerca del laboratorio DrawingTOthefuture del Politecnico di Torino, è stato incaricato di sviluppare un modello della torre in ambiente BIM. Parti di lavoro sono state svolte anche in alcuni elaborati di tesi magistrale (Lauro G. (2017), Le Cause G. (2019), Morabito A. (2019), Quattrocchi A. (2019)). Il programma utilizzato a supporto di tale lavoro è il software BIM Autodesk Revit 2017, il quale ha consentito la creazione di un modello tridimensionale dell'edificio, con all'interno tutte le relative informazioni, al quale possono lavorare diversi soggetti modificando la parte di propria competenza. Per migliorare la gestione del progetto, il modello centrale è stato separato in diversi sottomodelli (collegati sempre a quello centrale) in base al diverso ambito di modellazione: architettonico, strutturale, impiantistico e un modello contenente gli elaborati CAD. Nel presente lavoro di tesi il modello del sottosuolo è stato fatto interagire con il modello strutturale della Torre, sia per la modellazione degli scavi che per avere una visione d'insieme dell'area. È in questo ambito che si va a studiare l'interoperabilità Geo-BIM, completando il modello della sovrastruttura con le informazioni geotecniche e geologiche del terreno su cui è fondata e aggiungendo un tassello al modello centrale. In questo modo si garantisce una migliore gestione e fruizione di tutti i dati del progetto nel corso di tutta la vita dell'opera.

2.2 Dati del rilievo geologico e geotecnico

Il presente lavoro di tesi si sviluppa a partire dai dati dell'indagine geognostica eseguita da Abrate s.r.l. nell'ambito della Progettazione Preliminare e di quella Definitiva del Nuovo Palazzo della Regione Piemonte. Il fulcro della modellazione, come già anticipato, è la stratigrafia del sottosuolo relativo al Lotto 3, con particolare attenzione all'area sottostante la Torre, dove sono collocati gli scavi della stessa.

Facendo riferimento alle relative Relazioni Geotecniche fornite dalla Regione Piemonte, si evince che per la caratterizzazione geotecnica del Lotto 3 sono state eseguite le seguenti prove in situ e di laboratorio:

- 13 sondaggi a carotaggio continuo (St1-13), spinti fino ad una profondità di 80m;
- 3 sondaggi (St14-16) per la caratterizzazione dell'adiacente edificio adibito a Centro Servizi/Congressi a fianco del Palazzo, spinti fino alla profondità di 40 m;
- 3 sondaggi (Sp1-3) per la caratterizzazione del terreno del parcheggio interrato, fino alla profondità di 30m;
- 9 sondaggi (Sv1-9) a carotaggio continuo compresi tra 20 e 30m dal p.c., per investigare le aree della nuova viabilità di superficie ed in sotterraneo
- Inoltre, sono state eseguite prove penetrometriche dinamiche SPT, prove pressiometriche, prove dilatometriche e prove di emungimento (prove Lefranc, eventuali Lugeon a livello dei settori cementati e nei materiali coesivi). Durante la perforazione è stato eseguito il prelievo di campioni rimaneggiati ed indisturbati per prove di laboratorio. Una serie dei fori è stata utilizzata per l' esecuzione di indagini geofisiche mediante rilievi di sismica cross-hole.
- 54 analisi granulometriche eseguite su campioni prelevati durante i carotaggi (di cui 10 relative a campioni per i quali è stata condotta un'analisi aerometrica);
- 10 determinazioni dei limiti di Atterberg;
- 16 prove triassiali;
- 8 prove edometriche.

Dall'analisi di tali prove si è potuta effettuare un'analisi del terreno preliminare, prima della progettazione dei complessi del Lotto 3. Per avere un quadro generale, si riporta la descrizione fornita nella Relazione Geotecnica:

"Il sottosuolo di Torino, nella fascia superiore costituita dai depositi fluvioglaciali quaternari (ghiaia, ciottoli e sabbie in matrice limosa) all'interno della quale si svilupperà la totalità del progetto, da un

punto di vista geologico generale può essere definito relativamente semplice ed omogeneo; tuttavia, ad una scala di osservazione più ridotta, questo terreno può talora presentare variazioni rilevanti, sia lateralmente, sia lungo la profondità; sia da un punto di vista granulometrico, sia per quanto riguardo il grado di cementazione e/o addensamento."



Figura 7. Schema dell'area di intervento, con spaccato delle fondazioni e del sottosuolo (Fonte: Relazione Geologica e Geotecnica della Regione Piemonte)

Dei dati a disposizione sono stati utilizzati esclusivamente quelli di caratterizzazione del terreno, quindi le informazioni stratigrafiche dei 28 boreholes St1-13, St14-16, Sp1-3, Sv1-9, opportunamente

elaborate (come spiegato nel capitolo successivo). Si riporta in Figura 8 la planimetria dei fori di sondaggio dei Lotti 1, 2 e 3 ed in Figura 9 il dettaglio della planimetria del Lotto 3, in modo da rendere meglio visibili i Boreholes di interesse.



Figura 8. Planimetria dei fori di sondaggio dei Lotti 1, 2, 3



Figura 9. Planimetria dei fori di sondaggio del Lotto 3

Si hanno a disposizione inoltre, i dati stratigrafici relativi ai Lotti 1 e 2, per i quali era stata già eseguita una modellazione in Civil 3D nel lavoro di ricerca del laboratorio DrawingTOthefuture "Modellazione Geo-BIM per il Parco della Salute, della Ricerca e dell'innovazione (PSRI)" e che verranno successivamente utilizzati per completare e contestualizzare il modello. La modellazione dei due lotti è riportata in Figura 10 e Figura 11.



Figura 10. Modellazione del Lotto 1 in Civil 3D

(Fonte: Modellazione Geo-BIM per il Parco della Salute, della Ricerca e dell'innovazione (PSRI), DrawingTOthefuture)



Figura 11. Modellazione del Lotto 2 in Civil 3D

(Fonte: Modellazione Geo-BIM per il Parco della Salute, della Ricerca e dell'innovazione (PSRI), DrawingTOthefuture)

CAPITOLO 3. Metodologia e workflow

Nel presente lavoro di tesi è stato seguito un flusso di lavoro (visualizzabile in Figura 12) che ha portato in ultimo ad avere un modello completo in cui fossero disponibili tutti i dati (geotecnici e non) relativi al caso studio (Repository). Partendo dalla digitalizzazione dei dati, si sono eseguiti diversi test di interoperabilità tra vari tipi di software al fine di trovare il giusto approccio per far comunicare il mondo della Geotecnica con quello del BIM. È stato stilato quindi in seguito un *benchmark* in cui si fornissero delle valutazioni e dei confronti tra i diversi metodi utilizzati, carpendo inoltre potenzialità e criticità dei diversi software utilizzati. Infine, è stata portata avanti la modellazione sia della stratigrafia del sottosuolo che degli scavi di fondazione, ottenendo infine un modello federato multidisciplinare, comprensivo anche del modello strutturale della Torre e dei modelli geotecnici dei lotti confinanti con il Lotto 3. Nel modello federato si hanno a disposizione tutti i dati relativi al progetto, i quali diventano così fruibili in qualsiasi momento in un unico ambiente di lavoro.



In particolare, nell'ambito dei test d'interoperabilità sono stati considerati tre livelli di interoperabilità (basso, medio, alto) tra i software testati e i software BIM-based, assegnati ad ogni prova in modo da avere una panoramica completa. Per una più chiara ed immediata interpretazione, sono stati attribuiti ai tre gradi di giudizio dei simboli grafici, riportati nella legenda di Figura 13.



Figura 13. Legenda dei tre livelli di interoperabilità utilizzati

3.1 Approccio e test d'interoperabilità

Uno degli scopi del lavoro di tesi, come già precedentemente sottolineato, è stato quello di indagare l'interoperabilità Geo-BIM, servendosi del caso studio presentato nel Capitolo 2. Sono stati fatti dei tentativi utilizzando diverse metodologie e diversi tipi di software.

3.1.1 Stato dell'arte

La fase preliminare del lavoro è stata quella di indagare l'attuale stato dell'arte riguardo l'interoperabilità tra software geotecnici e BIM, per mezzo di pubblicazioni scientifiche ed articoli sull'argomento. Si è riscontrato che le ricerche in merito sono di numero limitatissimo e tutte nell'ambito dell'interoperabilità tra GIS e BIM, utilizzando ad esempio impropriamente ArcGIS. Anche le case produttrici di software non hanno degli strumenti adatti allo scopo nella maggior parte dei casi. Si riporta l'esempio di Autodesk, che ha integrato i propri software di modellazione BIM con Geotechnical Module, un modulo aggiuntivo di Civil 3D che consente di ricostruire la stratigrafia del sottosuolo, in base ai sondaggi a disposizione e che tuttavia presenta delle criticità.

Per la determinazione della stratigrafia del sottosuolo del Lotto 3 e, quindi, per la modellazione dello stesso, si sono scelti tre differenti software, eseguendo per ognuno di essi dei test di interoperabilità. I software testati sono: ArcGIS (Esri), RockWorks (RockWare Inc.) e Novapoint (Trimble).

ArcGIS è un sistema informativo geografico (GIS) prodotto da <u>Esri</u>. È usato per la creazione e l'uso di mappe, compilazione di dati geografici; analisi di mappe, condivisione di informazioni geografiche e gestione delle informazioni geografiche in una base di dati. Esso si compone di *ArcView*, che si divide a sua volta in *ArcMap* (per la creazione di mappe e analisi geografiche) e *ArcCatalog* (per la gestione dei dati), e *ArcScene* con il quale è possibile solo la visualizzazione in 3D.



Figura 14. Logo di ArcGIS

RockWorks è un software utilizzato in campo petrolifero, ambientale, geotecnico e minerario. Esso consente la visualizzazione di boreholes, superfici topografiche e gli strati del sottuolo e fornisce inoltre mappe, cross sections, calcolo di volumi, ecc.



Figura 15. Logo di RockWorks

Novapoint è una piattaforma di BIM-authoring ideata per progetti di infrastrutture. Essa può sviluppare modelli 3D non solo di strutture, ponti, strade, ecc, ma anche del suolo e sottosuolo del terreno in cui l'opera è collocata. Il software, inoltre, è inserito nella piattaforma collaborativa Trimble Quadri, che consente una rapida condivisione dei dati tra diversi professionisti.



Figura 16. Logo di Novapoint

3.1.2 Digitalizzazione dei dati

I dati stratigrafici relativi all'indagine geognostica eseguita sul Lotto 3 sono stati forniti dalla Regione Piemonte in formato .pdf. Per ogni sondaggio è riportata la stratigrafia e la descrizione qualitativa fornita dal geologo di tutti gli strati. Si hanno a disposizione inoltre i risultati di altre prove di laboratorio e in situ eseguite sui campioni.

La prima operazione è stata la digitalizzazione dei dati in tabelle Excel, in modo da creare un database più facilmente fruibile e gestibile. Tale operazione non si riduce però ad una mera trascrizione dei dati, ma richiede anche una loro interpretazione e codifica.

L'idea iniziale era stata quella di utilizzare la classificazione AGI, per il quale è fondamentale la conoscenza dei risultati delle prove granulometriche e i limiti di Atterberg. Questo tipo di classificazione prevede la seguente nomenclatura: il nome dell'aggregato è dato dalla frazione granulometrica con percentuale maggiore; il nome è seguito da "con", quando la seconda frazione granulometrica è compresa tra il 50% e il 25% in peso.; viene usato il suffisso "-oso" se la percentuale in peso della frazione successiva è compresa tra il 25% e il 10%; il nome si compone con "debolmente" e da suffisso "-oso" se la percentuale in peso della frazione successiva è compresa tra il 25%.

Tuttavia, non è stato possibile adoperare questo metodo di classificazione per tutti gli strati in esame, in quanto le prove granulometriche e quelle per i limiti di Atterberg non erano state eseguite per tutti gli strati, quindi non si avevano informazioni sufficienti ed omogenee. Inoltre, si è voluto tener conto del fatto che i software da utilizzare per la determinazione della stratigrafia, si basano su metodi di interpolazione per triangolazione, quindi introdurre troppe tipologie di terreno sarebbe stato oneroso poi dal punto di vista computazionale e svantaggioso per i risultati finali.

È a questo punto del lavoro che si è adoperata un'interpretazione e semplificazione dei dati stratigrafici a disposizione. Ogni *borehole* è stato confrontato con quelli nel proprio intorno per individuare una continuità nei materiali, quindi è stato assegnato lo stesso nome agli strati vicini e con descrizione pressoché uguale. Con questo metodo sono state individuate le categorie (con relativa nomenclatura) riportate in Tabella 1. Codifica della nomenclatura degli strati di terreno del Lotto 3Tabella 1, a cui sono state assegnate delle abbreviazioni per semplificare e rendere più fluido il lavoro successivo.
Codifica	Descrizione			
R	Riporto (di qualsiasi genere)			
GS	Ghiaia in matrice sabbiosa			
GLS	Ghiaia in matrice limosa sabbiosa			
CC	Conglomerato cementato			
CLS	Soletta in calcestruzzo			
S	Sabbia			
SG	Sabbia ghiaiosa/ con ghiaia			
L	Limo			
LS Limo sabbioso				
LA	Limo argilloso			

Tabella 1. Codifica della nomenclatura degli strati di terreno del Lotto 3

In Tabella 2 si riporta il dettaglio di questa operazione per tutti i boreholes analizzati.

Borehole	Depth 1 (m)	Depth 2 (m)	Stratigraphy
BH_ST1	0,00	2,90	R
BH_ST1	2,90	7,70	GS
BH_ST1	7,70	10,60	GLS
BH_ST1	10,60	25,50	GS
BH_ST1	25,50	27,00	CC
BH_ST1	27,00	32,00	GLS
BH_ST1	32,00	37,00	S
BH_ST1	37,00	42,30	GLS
BH_ST1	42,30	68,00	L
BH_ST1	68,00	80,00	LS
BH_ST2	0,00	1,00	CLS
BH_ST2	1,00	10,00	GS
BH_ST2	10,00	26,40	GLS
BH_ST2	26,40	30,00	S
BH_ST2	30,00	34,10	GLS
BH_ST2	34,10	36,60	S
BH_ST2	36,60	40,80	GLS
BH_ST2	40,80	80,00	LS
BH_ST3	0,00	0,10	CLS
BH_ST3	0,10	1,20	R
BH_ST3	1,20	12,60	GS
BH_ST3	12,60	19,00	S
BH_ST3	19,00	26,50	GS
BH_ST3	26,50	28,40	S
BH_ST3	28,40	30,00	GS
BH_ST3	30,00	33,90	GLS

BH_ST3	33,90	35,50	S
BH_ST3	35,50	38,40	GLS
BH_ST3	38,40	80,00	L
BH_ST4	0,00	0,40	CLS
BH_ST4	0,40	1,00	R
BH_ST4	1,00	1,30	CLS
BH_ST4	1,30	2,50	R
BH_ST4	2,50	13,00	GS
BH_ST4	13,00	32,00	GLS
BH_ST4	32,00	41,20	SG
BH_ST4	41,20	80,00	LS
BH_ST5	0,00	0,50	CLS
BH_ST5	0,50	2,10	R
BH_ST5	2,10	4,00	GLS
BH_ST5	4,00	7,00	GS
BH_ST5	7,00	14,00	GLS
BH_ST5	14,00	18,00	S
BH_ST5	18,00	26,20	GLS
BH_ST5	26,20	29,00	S
BH_ST5	29,00	32,20	GLS
BH_ST5	32,30	36,60	S
BH_ST5	36,60	42,40	GLS
BH_ST5	42,40	80,00	L
BH_ST6	0,00	4,00	R
BH_ST6	4,00	14,50	GLS
BH_ST6	14,50	17,60	S
BH_ST6	17,60	24,00	GLS
BH_ST6	24,00	30,00	GS
BH_ST6	30,00	35,00	SG
BH_ST6	35,00	43,30	GLS
BH_ST6	43,30	80,00	LS
BH_ST7	0,00	4,80	R
BH_ST7	4,80	13,00	GS
BH_ST7	13,00	19,20	S
BH_ST7	19,20	27,00	GLS
BH_ST7	27,00	28,40	S
BH_ST7	28,40	32,50	GLS
BH_ST7	32,50	35,50	SG
BH_ST7	35,50	41,20	GLS
BH_ST7	41,20	50,00	LS
BH_ST7	50,00	80,00	L

BH_ST8	0,00	1,50	CLS
BH_ST8	1,50	13,00	GLS
BH_ST8	13,00	17,00	S
BH_ST8	17,00	30,00	GLS
BH_ST8	30,00	39,00	SG
BH_ST8	39,00	40,30	LA
BH_ST8	40,30	80,00	L
BH_ST9	0,00	0,30	CLS
BH_ST9	0,30	0,60	R
BH_ST9	0,60	0,80	CLS
BH_ST9	0,80	1,60	R
BH_ST9	1,60	1,80	CLS
BH_ST9	1,80	12,20	GLS
BH_ST9	12,20	15,90	S
BH_ST9	15,90	18,80	GS
BH_ST9	18,80	27,40	GLS
BH_ST9	27,40	30,00	S
BH_ST9	30,00	39,70	GLS
BH_ST9	39,70	80,00	L
BH_ST10	0,00	1,50	CLS
BH_ST10	1,50	12,50	GLS
BH_ST10	12,50	16,00	S
BH_ST10	16,00	29,80	GLS
BH_ST10	19,80	35,40	SG
BH_ST10	35,40	37,90	GS
BH_ST10	37,90	39,00	GLS
BH_ST10	39,00	47,50	LA
BH_ST10	47,50	80,00	L
BH_ST11	0,00	1,00	R
BH_ST11	1,00	4,30	GLS
BH_ST11	4,30	18,00	GS
BH_ST11	18,00	20,00	S
BH_ST11	20,00	26,20	GLS
BH_ST11	26,20	28,00	S
BH_ST11	28,00	30,20	GLS
BH_ST11	30,20	38,00	GS
BH_ST11	38,00	40,40	GLS
BH_ST11	40,40	41,00	LS
BH_ST11	41,00	80,00	L
BH_ST12	0,00	0,50	CLS
BH_ST12	0,50	1,40	R

BH_ST12	1,40	3,20	GLS
BH_ST12	3,20	6,40	GS
BH_ST12	6,40	15,20	GLS
BH_ST12	15,20	19,50	S
BH_ST12	19,50	31,20	GLS
BH_ST12	31,20	36,40	S
BH_ST12	36,40	37,00	GS
BH_ST12	37,00	40,50	GLS
BH_ST12	40,50	45,00	LS
BH_ST12	45,00	76,60	L
BH_ST12	76,60	80,00	LS
BH_ST13	0,00	2,00	R
BH_ST13	2,00	2,50	CLS
BH_ST13	2,50	4,00	R
BH_ST13	4,00	15,00	GS
BH_ST13	15,00	19,00	S
BH_ST13	19,00	35,50	GLS
BH_ST13	35,50	39,80	SG
BH_ST13	39,80	40,40	LA
BH_ST13	40,40	80,00	L
BH_ST14	0,00	2,00	R
BH_ST14	2,00	3,20	GLS
BH_ST14	3,20	6,00	GS
BH_ST14	6,00	9,00	GLS
BH_ST14	9,00	20,00	GS
BH_ST14	20,00	31,10	GLS
BH_ST14	31,10	32,80	S
BH_ST14	32,80	35,00	SG
BH_ST14	35,00	39,50	GLS
BH_ST14	39,50	40,00	L
BH_ST15	0,00	0,50	CLS
BH_ST15	0,50	2,00	R
BH_ST15	2,00	6,00	GS
BH_ST15	6,00	34,00	GLS
BH_ST15	34,00	38,00	SG
BH_ST15	38,00	40,00	GS
BH_ST16	0,00	1,00	CLS
BH_ST16	1,00	2,60	R
BH_ST16	2,60	6,90	GS
BH_ST16	6,90	8,00	GLS
BH_ST16	8,00	9,50	GS

BH_ST16	9,50	19,00	GLS
BH_ST16	19,00	20,60	CC
BH_ST16	20,60	33,00	GLS
BH_ST16	33,00	34,50	S
BH_ST16	34,50	38,40	SG
BH_ST16	38,40	40,00	GLS
BH_SP1	0,00	2,20	R
BH_SP1	2,20	4,10	GS
BH_SP1	4,10	10,10	GLS
BH_SP1	10,10	15,50	GS
BH_SP1	15,50	30,00	GLS
BH_SP2	0,00	2,80	R
BH_SP2	2,80	6,00	GS
BH_SP2	6,00	10,20	GLS
BH_SP2	10,20	15,00	GS
BH_SP2	15,00	30,00	GLS
BH_SP3	0,00	1,70	R
BH_SP3	1,70	9,80	GS
BH_SP3	9,80	10,60	GLS
BH_SP3	10,60	12,20	GS
BH_SP3	12,20	15,00	GLS
BH_SP3	15,00	16,70	GS
BH_SP3	16,70	30,00	GLS
BH_SV1	0,00	0,40	R
BH_SV1	0,40	0,70	CLS
BH_SV1	0,70	4,00	R
BH_SV1	4,00	4,20	CLS
BH_SV1	4,20	4,60	R
BH_SV1	4,60	5,40	GLS
BH_SV1	5,40	7,40	GS
BH_SV1	7,40	11,40	GLS
BH_SV1	11,40	15,40	GS
BH_SV1	15,40	30,00	GLS
BH_SV2	0,00	1,00	R
BH_SV2	1,00	2,00	GLS
BH_SV2	2,00	2,50	GS
BH_SV2	2,50	3,00	GLS
BH_SV2	3,00	12,00	GS
BH_SV2	12,00	22,00	GLS
BH_SV2	22,00	26,40	GS
BH_SV2	26,40	30,00	GLS

		1	
BH_SV3	0,00	1,20	R
BH_SV3	1,20	9,30	GS
BH_SV3	9,30	10,00	GLS
BH_SV3	10,00	15,00	GS
BH_SV3	15,00	30,00	GLS
BH_SV4	0,00	0,80	R
BH_SV4	0,80	12,00	GS
BH_SV4	12,00	16,00	GLS
BH_SV4	16,00	17,50	GS
BH_SV4	17,50	30,00	GLS
BH_SV5	0,00	1,00	R
BH_SV5	1,00	20,00	GS
BH_SV6	0,00	1,60	R
BH_SV6	1,60	6,20	GS
BH_SV6	6,20	7,00	GLS
BH_SV6	7,00	7,50	GS
BH_SV6	7,50	8,50	GLS
BH_SV6	8,50	10,30	GS
BH_SV6	10,30	13,00	GLS
BH_SV6	13,00	16,20	GS
BH_SV6	16,20	20,00	GLS
BH_SV8	0,00	3,80	R
BH_SV8	3,80	8,50	CLS
BH_SV8	8,50	15,00	GS
BH_SV8	15,00	17,50	GLS
BH_SV8	17,50	19,50	GS
BH_SV8	19,50	30,00	GLS
BH_SV9	0,00	0,40	CLS
BH_SV9	0,40	1,80	R
BH_SV9	1,80	15,70	GS
BH_SV9	15,70	30,00	GLS

Tabella 2. Stratigrafia dei Boreholes del Lotto 3

Il posizionamento dei boreholes sopracitati è stato ricavato dal file Autocad "Tavola di Lavoro" fornito dalla Regione Piemonte (Figura 9). I dati del rilievo sono in coordinate piane, espresse in coppie X (Est) e Y (Nord), associate al Datum WGS84, sistema di riferimento UTM 32N, espresse in coordinate metriche (WGS84/UTM 32N). Anch' esse sono state digitalizzate e riportate in Tabella 3, insieme all'elevazione (Elevation), alla profondità (Depht), alla "distanza dal collo" (Total Depht,

ossia la profondità della parte sottostante del foro sotto l'elevazione del punto di riferimento) e alla quota piezometrica (tutti dati ricavati dagli allegati della relazione tecnica).

Borehole	X (East) Y (North)		Z (Elevation)	Depth	Total Depth	Quota piezometrica	
BH_ST1	394681,8253	4986591,7139	234,8	80,0	154,8	219,1	
BH_ST2	394676,0585	4986572,9788	234,8	80,0	154,8	218,8	
BH_ST3	394671,4151	4986555,9029	234,8	80,0	154,8	219,5	
BH_ST4	394690,8693	4986577,9381	234,0	80,0	154,0	218,3	
BH_ST5	394684,9583	4986558,7239	234,0	80,0	154,0	219,0	
BH_ST6	394703,7585	4986581,4545	234,7	80,0	154,7	219,1	
BH_ST7	394699,4402	4986566,4101	234,7	80,0	154,7	219,5	
BH_ST8	394694,3002	4986549,3820	234,7	80,0	154,7	219,9	
BH_ST9	394708,2856	4986573,3104	234,0	80,0	154,0	219	
BH_ST10	394702,5367	4986554,9082	234,0	80,0	154,0	219,1	
BH_ST11	394717,1301	4986520,7708	234,6	80,0	154,6	219.6	
BH_ST12	BH_ST12 394712,3762 4986562,3685		234,6	80,0	154,6	219,6	
BH_ST13	BH_ST13 394705,6875 4986542,2558		234,6	80,0	154,6	219,6	
BH_ST14	ST14 394613.3617 4986562,0933		234,9	40,0	194,9	218,9	
BH_ST15	T15 394636.9101 4986582.9271		234,9	40,0	194,9	219,7	
BH_ST16	394662,5390 4986605,0023 234,9 40,0 194,9		219,7				
BH_SP1	394500,3234	234 4986648,8758 234,9 30,0 204		204,9	220,6		
BH_SP2	394580,7852	4986631,6565	235,6	30,0	205,6	220,4	
BH_SP3	394523,9033	4986585,1206	236,1	30,0	206,1	220,8	
BH SV1	394563,6513	4986935,0894	234,6	30,0	204,6	220,6	
BH SV2	394495,3691	4986773,1325	234,8	30,0	204,8	221,3	
BH_SV3	394433,3995	4986625,8512	234,9	30,0	204,9	220,4	
BH SV4	394400,0473	4986532,4284	235,1	30,0	205,1	221,5	
BH_SV5	394299,6873	4986614,8493	235,0	20,0	215,0	219,6	
BH_SV6	394275,0633	4986464,4028	241,9	20,0	221,9	228,4	
BH_SV8	394495,2940	4986556,9582	236,3	30,0	206,3	220,8	
BH SV9	394607,7671	4986524,0667	234,7	30,0	204,7	218,9	

Tabella 3. Posizionamento in coordinate piane (WGS84/UTM 32N), elevazione, profondità e quota piezometrica dei boreholes del Lotto 3

Per completezza, si sono digitalizzati anche i dati delle altre prove per le quali i risultati si prestavano a tale operazione, nell'ottica di inserirli successivamente nel modello finale, in modo da renderlo "interrogabile". In particolare, si riportano i valori ottenuti dalle seguenti prove:

 Prova Lefranc, una prova di permeabilità in situ a carico variabile eseguita nel foro di sondaggio, nei casi in cui la falda freatica sia situata poco al di sotto del piano campagna (Risultati in Tabella 4);

Borehole	Prof. (m)	Permeabilità K (m/s)
BH_ST1	10,25	2,90E-05
BH_ST2	17,60	9,99E-06
BH_ST4	14,00	8,01E-06
BH_ST6	17,75	1,27E-05
BH_ST7	10,05	7,46E-06
BH_ST14	12,95	1,62E-06
BH_ST14	24,95	5,18E-06
BH_ST15	14,10	2,02E-06
BH_ST15	20,90	1,10E-05
BH_ST16	12,85	5,11E-06
BH_ST16	24,95	5,31E-06
BH_SP1	12,50	3,81E-06
BH_SP1	22,75	2,53E-06
BH_SP2	11,75	6,14E-06
BH_SP2	25,75	1,18E-06
BH_SP3	11,10	3,08E-06
BH_SP3	24,75	1,94E-06
BH_SV1	16,50	3,52E-06
BH_SV1	20,25	1,30E-06
BH_SV2	10,75	1,30E-05
BH_SV2	24,50	1,39E-06
BH_SV3	14,50	2,57E-06
BH_SV3	20,50	2,13E-06
BH_SV4	11,50	1,16E-05
BH_SV4	20,50	4,59E-06
BH_SV5	14,35	5,07E-06
BH_SV6	14,40	1,11E-05
BH_SV9	7,75	2,38E-06
BH_SV9	21.90	8.84E-06

Tabella 4. Risultati della Prova Lefranc

 Prova pressiometrica MPM, una prova in situ consistente nel misurare le deformazioni radiali provocate nel terreno dall'espansione di una sonda cilindrica dilatabile (detta pressiometro) installata nel foro di sondaggio e che misura la pressione radiale e la variazione di volume nella cella, la cui interpretazione fornisce il modulo di taglio e il modulo pressiometrico del terreno (Tabella 5);

Borehole	Prof. (m)	Mod. Di Taglio G (MPa)	Mod. Pressiometrico E (Mpa)
BH_ST1	48,70	22,91	60,95
BH_ST2	50,80	22,19	59,02
BH_ST3	45,00	17,37	46,20
BH_ST4	49,00	15,90	42,29
BH_ST6	53,50	12,57	33,43
BH_ST7	52,00	19,83	52,75
BH_ST8	43,50	21,41	56,95
BH_ST9	49,00	18,32	48,72
BH_ST10	44,00	53,80	143,12
BH_ST11	52,00	21,76	57,87
BH_ST12	19,00	10,25	27,26
BH_ST12	55,00	20,81	55,35
BH_ST13	45,80	6,24	16,61

Tabella 5. Risultati della prova pressiometrica MPM

Limiti di Atterberg, ossia i valori limite del contenuto d'acqua per il quale si registra un passaggio dello stato fisico del terreno. Di particolare interesse sono il limite plastico (passaggio dallo stato semisolido a quello plastico), il limite liquido (passaggio dallo stato plastico a quello liquido) e l'indice di plasticità IP (differenza tra i due precedenti limiti). I limiti di Atterberg si ricavano da una prova di essiccamento in laboratorio, in cui il provino viene gradualmente essiccato in una serie di sequenze e contemporaneamente si misurano i contenuti d'acqua alla fine di ogni sequenza (Risultati in Tabella 6);

Borehole	Provino	z i (m)	z f (m)	LL (%)	IP (%)	
BH_ST1	i0030	18,00	18,20	25,00	10,82	
BH_ST1	ioo31	35,00	35,20	17,00	N.D.	
BH_ST1	ioo28	68,00	68,50	28,40	6,14	
BH_ST2	ioo36	52,10	52,50	27,50	6,70	
BH_ST4	i0029	51,50	52,00	26,00	6,75	
BH_ST14	ioo11	6,00	-	22,12	5,87	
BH_ST14	ioo13	32,20	32,40	21,00	N.D.	
BH_ST14	ioo14	39,70	39,80	26,20	4,22	
BH_ST15	ioo17	9,00	-	17,62	2,40	
BH_ST16	ioo26	15,00	15,20	20,60	6,83	
BH_ST16	i0027	37,00	37,20	13,60	1,96	
BH_SP2	ioo24	11,00	11,20	21,80	6,78	
BH_SP2	i0025	18,40	18,60	17,10	3,06	
BH_SP3	i0035	29,70	30,00	23,15	6,59	
BH_SV3	i007	6,00	6,20	20,40	4,00	
BH_SV3	ioo8	9,00	9,20	19,10	2,80 2,67	
BH_SV4	ioo9	6,00	6,20	17,80		
BH_SV4	ioo10	9,00	9,20	18,43	3,58	
BH_SV5	ioo15	6,00	6,20	20,00	1,71	
BH_SV6	i0020	4,80	5,00	17,60	3,42	
BH_SV6	ioo21	12,60	12,80	19,60	6,31	
BH_SV8	i0023	20,00	20,30	19,60	4,41	
BH_SV9	i0032	17,00	17,20	20,10	6,55	
BH_SV9	i0033	26,40	26,60	19,50	N.D.	

Tabella 6. Limiti di Atterberg

3.1.3 Test di interoperabilità e visualizzazione dei dati geotecnici

Il primo test eseguito sui software è stato quello legato all'importazione dei dati geotecnici, andando ad analizzare in particolare la formattazione dei dati, variabile da programma a programma. A seguito dell'importazione si è verificata la corretta visualizzazione dei dati in 3D ed i metodi di gestione degli stessi. Infine, ci si è focalizzati sui diversi formati di esportazione dei dati, per verificare l'interoperabilità con alcuni software BIM-based. Si precisa che in questa fase, per semplicità, i test sono stati eseguiti importando solo 5 boreholes (ST1, ST2, ST3, ST4, ST5).

Come visto precedentemente, recentemente il trend è quello di provare a mettere i software GIS a disposizione della Geotecnica, in un contesto poi più ampio di interoperabilità GIS-BIM. Alla luce di queste nuove tendenze, nonostante questo software non sia stato programmato per la modellazione del terreno, si è provato a fare un passo in tale direzione testando **ArcGIS**. La base di lavoro per questo metodo è stato il paper "Visualizing Boreholes in 3D Using GIS" di Erik Fjeldsted, Tyler Hansen, Craig Hebbert e Scott VanderDoes dell'Università dello Utah (USA).

Il processo seguito per l'importazione e la visualizzazione dei dati è riportato schematicamente in Figura 17 (la cui legenda è espressa in Figura 13).



Figura 17. Processo per i test di interoperabilità su ArcGIS

Sono state utilizzate due applicazioni di ArcGIS, ossia *ArcView*, che si divide a sua volta in *ArcMap* per la creazione di mappe e analisi geografiche e *ArcCatalog* per la gestione dei dati, e *ArcScene* con il quale è possibile solo la visualizzazione in 3D. Seguendo la linea adottata dai ricercatori dello Utah, sono state tentate tre diverse strade per l'importazione dei boreholes in ArcScene.

Il primo metodo consisteva nell'utilizzare uno specifico tool, denominato "*3D Borehole Tool*", prodotto da Jennifer Carrell dell'Illinois State Geological Survey, il quale prometteva non solo di importare e visualizzare in 3D i sondaggi su ArcScene ma anche di creare una superficie topografica interpolando i punti in superficie dei boreholes. Il download del tool è andato a buon fine, ma poi si sono riscontrati gli stessi problemi incontrati dagli autori del paper. Infatti, il tool per essere supportato da ArcGIS necessita del codice VBA, che nelle versioni precedenti del software era presente, mentre nell'ultima versione utilizzata, ArcGIS 10.6.1, non è supportato; inoltre non è possibile avere una versione precedente del programma, in quanto il Politecnico di Torino possiede solo la licenza più recente. Di conseguenza non si può utilizzare questo tool e questa metodologia è stata abbandonata.

Il secondo percorso intrapreso ha previsto l'utilizzo del software commerciale gratuito di Aquaveo "*Groundwater Analyst*". Nel paper si legge che i ricercatori, nonostante fossero riusciti a scaricare il tool, non hanno avuto una buona esperienza d'uso dello stesso. Inoltre, erano riusciti nell'intento di importare i boreholes, ma per analizzare e visualizzare la stratigrafia sarebbe stato necessario un altro software della stessa casa madre ma non gratuito. Nel nostro caso invece i problemi sono sorti già nel download del tool gratuito, infatti si è riscontrato un errore di server quando si è provato a scaricarlo e quindi non è stato possibile testarlo.

Infine, si è proceduto a verificare un metodo messo a punto proprio da Fjeldsted et al. (2016), apportando però delle variazioni. In ArcScene sono stati importati separatamente i dati geotecnici relativi ai sondaggi e la superfice topografica. Per la determinazione del DEM (Digital Elevation Model) si è partiti da *Google Earth Pro*, applicazione gratuita di Google. Una volta individuata l'area del Lotto 3 su cui sorge il Palazzo della Regione Piemonte, si è utilizzato il tool "Path" per campire tutta la zona interessata (anche in modo non sistematico) e rilevare cosi dei punti con le relative coordinate geografiche e si è salvato tale "percorso" in formato .kml. Successivamente si è utilizzato il tool *TCX Converter* per estrarre, oltre alla latitutine e alla longitudine (già presenti nel file) anche

l'elevazione e per convertire tale file in .csv. Aprendo ArcMap, si è importato il file (*Layer* \rightarrow *Add Data* \rightarrow *Display XY Data*), visualizzando i punti georeferenziati del path di Google Earth. Di seguito si è impostato il sistema di riferimento dei punti, ossia lo stesso di Google Earth, i cui dati sono in coordinate geografiche (long/x/est, lat/y/nord) associate al Datum WGS84 espresse in gradi decimali (WGS84-G). Bisogna tenere in considerazione però che i dati dei rilievi sono in coordinate piane, pertanto si sono dovuti adeguare i dati e proiettare i punti nel sistema WGS84/UTM 32N (*ArcToolBox* \rightarrow *3D Analyst Tool* \rightarrow *Data Management Tool* \rightarrow *Projection and Transformation* \rightarrow *Project*). Il passaggio successivo è stato quello di creare una TIN, cioè una superficie ottenuta per triangolazione dei punti georeferenziati precedentemente importati (*ArcToolBox* \rightarrow *3D Analyst Tool* \rightarrow *Data Management Tool* \rightarrow *IIN* \rightarrow *Create TIN*). Il DEM che è stato creato in questo modo su ArcMap è in formato.TIN ed è riportato in Figura 18.



Figura 18. DEM creato su ArcMap

Il file è stato poi importato su ArcScene, ottenendo la superficie topografica su cui localizzare i boreholes (Figura 19). È fondamentale sottolineare che il formato di importazione del DEM deve essere .TIN e non .shp, in quanto un errore in questo passaggio renderebbe vano tutto il processo.



Figura 19. DEM importato su ArcScene

A questo punto del lavoro, si sono importati i dati stratigrafici dei boreholes. Il formato di importazione per Excel richiesto da ArcScene è .csv. Quindi i dati sono stati prima formattati come mostrato in Figura 20 (formato .xlsx), poi convertiti in .csv (Figura 21) ed importati. Come si può notare, per questo tentativo si è cercato di semplificare molto anche la nomenclatura e la classificazione degli strati.

	Α	В	С	D	E	F	G	Н	1	J
1	Borehole	Х	Y	Тор	Bottom	Thickness	Stratum	Elevation	Top_elev	Bot_elev
2	BH_ST1	394681,8253	4986591,7139	0,00	2,90	2,90	Riporto	234,76	234,76	231,86
3	BH_ST1	394681,8253	4986591,7139	2,90	25,50	22,60	Ghiaie	234,76	231,86	209,26
4	BH_ST1	394681,8253	4986591,7139	25,50	27,00	1,50	Conglomerato cementato	234,76	209,26	207,76
5	BH_ST1	394681,8253	4986591,7139	27,00	32,00	5,00	Ghiaie	234,76	207,76	202,76
6	BH_ST1	394681,8253	4986591,7139	32,00	37,00	5,00	Sabbie	234,76	202,76	197,76
7	BH_ST1	394681,8253	4986591,7139	37,00	42,30	5,30	Ghiaie	234,76	197,76	192,46
8	BH_ST1	394681,8253	4986591,7139	42,30	80,00	37,70	Limi	234,76	192,46	154,76
9	BH_ST2	394676,0585	4986572,9788	0,00	1,00	1,00	Soletta CLS	234,84	234,84	233,84
10	BH_ST2	394676,0585	4986572,9788	1,00	26,40	25,40	Ghiaie	234,84	233,84	208,44
11	BH_ST2	394676,0585	4986572,9788	26,40	30,00	3,60	Sabbie	234,84	208,44	204,84
12	BH_ST2	394676,0585	4986572,9788	30,00	34,10	4,10	Ghiaie	234,84	204,84	200,74
13	BH_ST2	394676,0585	4986572,9788	34,10	36,60	2,50	Sabbie	234,84	200,74	198,24
14	BH_ST2	394676,0585	4986572,9788	36,60	40,80	4,20	Ghiaie	234,84	198,24	194,04
15	BH_ST2	394676,0585	4986572,9788	40,80	80,00	39,20	Limi	234,84	194,04	154,84
16	BH_ST3	394671,4151	4986555,9029	0,00	0,10	0,10	Soletta CLS	234,84	234,84	234,74
17	BH_ST3	394671,4151	4986555,9029	0,10	12,60	12,50	Ghiaie	234,84	234,74	222,24
18	BH_ST3	394671,4151	4986555,9029	12,60	19,00	6,40	Sabbie	234,84	222,24	215,84
19	BH_ST3	394671,4151	4986555,9029	19,00	26,50	7,50	Ghiaie	234,84	215,84	208,34
20	BH_ST3	394671,4151	4986555,9029	26,50	28,40	1,90	Sabbie	234,84	208,34	206,44
21	BH_ST3	394671,4151	4986555,9029	28,40	33,90	5,50	Ghiaie	234,84	206,44	200,94
22	BH_ST3	394671,4151	4986555,9029	33,90	35,50	1,60	Sabbie	234,84	200,94	199,34
23	BH_ST3	394671,4151	4986555,9029	35,50	38,40	2,90	Ghiaie	234,84	199,34	196,44
24	BH_ST3	394671,4151	4986555,9029	38,40	80,00	41,60	Limi	234,84	196,44	154,84

Figura 20. Formattazione dei dati in Excel (.xlsx) per l'importazione su ArcScene

1	BoreholeXYLATLONTopBottomThicknessStratumElevationTop_elevBot_elev		
2	BH_ST1394681,82534986591,71445,023167,66222702,92,9Riporto234,76234,76231,86		
3	BH_ST1394681,82534986591,71445,023167,6622272,925,522,6Ghiaie234,76231,86209,26		
4	BH_ST1394681,82534986591,71445,023167,66222725,5271,5Conglomerato cementato234,76209	26207,76	
5	BH_ST1394681,82534986591,71445,023167,66222727325Ghiaie234,76207,76202,76		
6	BH_ST1394681,82534986591,71445,023167,66222732375Sabbie234,76202,76197,76		
7	BH_ST1394681,82534986591,71445,023167,6622273742,35,3Ghiaie234,76197,76192,46		
8	BH_ST1394681,82534986591,71445,023167,66222742,38037,7Limi 234,76192,46154,76		
9	BH_ST2394676,05854986572,97945,022997,662081011Soletta CLS234,84234,84233,84		
10	BH_ST2394676,05854986572,97945,022997,662081126,425,4Ghiaie234,84233,84208,44		
11	BH_ST2394676,05854986572,97945,022997,66208126,4303,6Sabbie234,84208,44204,84		
12	BH_ST2394676,05854986572,97945,022997,6620813034,14,1Ghiaie234,84204,84200,74		
13	BH_ST2394676,05854986572,97945,022997,66208134,136,62,5Sabbie234,84200,74198,24		
14	BH_ST2394676,05854986572,97945,022997,66208136,640,84,2Ghiaie234,84198,24194,04		
15	BH_ST2394676,05854986572,97945,022997,66208140,88039,2Limi234,84194,04154,84		
16	BH_ST3394671,41514986555,90345,0228357,66202600,10,1Soletta CLS234,84234,84234,74		
17	BH_ST3394671,41514986555,90345,0228357,6620260,112,612,5Ghiaie234,84234,74222,24		
18	BH_ST3394671,41514986555,90345,0228357,66202612,6196,4Sabbie234,84222,24215,84		
19	BH_ST3394671,41514986555,90345,0228357,6620261926,57,5Ghiaie234,84215,84208,34		
20	BH_ST3394671,41514986555,90345,0228357,66202626,528,41,9Sabbie234,84208,34206,44		
21	BH_ST3394671,41514986555,90345,0228357,66202628,433,95,5Ghiaie234,84206,44200,94		
22	BH_ST3394671,41514986555,90345,0228357,66202633,935,51,6Sabbie234,84200,94199,34		
23	BH_ST3394671,41514986555,90345,0228357,66202635,538,42,9Ghiaie234,84199,34196,44		
24	BH_ST3394671,41514986555,90345,0228357,66202638,48041,6Limi234,84196,44154,84		
25	BH_ST4394690,86934986577,93845,0230377,66226800,40,4Soletta CLS234,77234,77234,37		
26	BH_ST4394690,86934986577,93845,0230377,6622680,410,6Riporto234,77234,37233,77		
27	BH_ST4394690,86934986577,93845,0230377,66226811,30,3Soletta CLS234,77233,77233,47		
28	BH_ST4394690,86934986577,93845,0230377,6622681,32,51,2Riporto234,77233,47232,27		
29	BH_ST4394690,86934986577,93845,0230377,6622682,541,238,7Ghiaie234,77232,27193,57		

Figura 21. Formattazione dei dati in .csv per l'importazione dei boreholes in ArcScene

In ArcScene i sondaggi sono stati importati usando ArcCatalog (*Create feature from XY table*) e georeferenziati impostando il sistema di riferimento WGS84/UTM 32N. Per la visualizzazione in 3D però è stato necessario aggiungere l'informazione sulla coordinata Z, assegnando ad ogni punto la sua elevazione per legarlo alla superficie topografica precedentemente importata (*Arctoolbox* \rightarrow 3D *Analyst* \rightarrow 3D *Features* \rightarrow Add Z information). I diversi strati sono stati letti dal software come punti, pertanto è stato necessario estruderli, andando su *Properties* \rightarrow *Base Heights* \rightarrow *No elevation values from surface*. Qui è stata introdotta un'espressione costante, (Bot_elev-Top_elev)*50, dove 50 è un fattore moltiplicativo per esagerare i valori ottenuti e vedere meglio gli strati nello spazio. Il risultato ottenuto, riportato in Figura 22 e Figura 23, è sicuramente migliore dei precedenti, ma non soddisfa le aspettative. La visualizzazione in 3D infatti non è ottimale e le potenzialità del software si fermano qui, in quanto non è possibile in nessun modo, con i mezzi a disposizione, interpolare i dati per ricavare una stratigrafia e non vi sono formati di esportazione dei dati congrui ad un'importazione in un qualsiasi software BIM-based.

Se 🤤 🖳	
Layer della scena	
XY5_boreholes_shape	
<tutti i="" p="" rimanenti<="" valori=""></tutti>	
Stratum, Borehole	
Conglomerato cement	
🔴 Ghiaie, BH_ST1	
🔴 Ghiaie, BH_ST2	
Ghiaie, BH_ST3	
Ghiaie, BH_ST4	
🔴 Ghiaie, BH_ST5	
limi, BH_ST1	
Limi, BH_ST2	
🔴 Limi, BH_ST3	
Limi, BH_ST4	
🔴 Limi, BH_ST5	
😑 Riporto, BH_ST1	
Riporto, BH_ST4	
Riporto, BH_ST5	
Sabbie, BH_ST1	
Sabbie, BH_ST2	
Sabbie, BH_ST3	
Sabbie, BH_ST5	
Soletta CLS, BH_ST2	
Soletta CLS, BH_ST3	
Soletta CLS, BH_ST4	
Soletta CLS, BH_ST5	
	L L
Elevazione	
240,84 - 241	
240,68 - 240,84	
240,52 - 240,68	
240,36 - 240,52	
240,2 - 240,36	
240,04 - 240,2	
239,88 - 240,04	
239,72 - 239,88	
239,56 - 239,72	

Figura 22. Visualizzazione dei boreholes in 3D su ArcScene



Figura 23. Dettaglio della visualizzazione dei boreholes in 3D su ArcScene

Già da questi primi test, si deduce che ArcGIS non è un software idoneo agli scopi preposti, quindi si è deciso di escluderlo dalla successiva trattazione. Si riconosce tuttavia che migliorando gli strumenti a disposizione, la collaborazione GIS-BIM può avere grandi potenzialità da sfruttare in ambito geotecnico.

Un'altra strada intrapresa è stata la verifica del software **RockWorks**. Il test di interoperabilità è stato condotto secondo il processo schematizzato in Figura 24 (la cui legenda è espressa in Figura 13).



Figura 24. Processo per i test d'interoperabilità su RockWorks.

Il software è in grado di importare dati geotecnici in formato .xlsx, quindi avendo digitalizzato i dati in tabelle Excel questa è una funzionalità vantaggiosa, ma bisogna utilizzare una ben specifica formattazione degli stessi. È necessario infatti disporre i dati in tre diversi fogli dello stesso file Excel, separando tra loro posizione dei boreholes (Location), stratigrafia (Stratigraphy) e tipologia litografica (Lith Type). Un esempio dettagliato di formattazione dei dati è riportato in Figura 25, Figura 26 e Figura 27, dove la nomenclatura degli strati è nuovamente semplificata ed i parametri di caratterizzazione dei vari strati sono stati reperiti dalla relazione geotecnica della Regione Piemonte. Bisogna inoltre avere l'accortezza di creare una cartella contenente il file Excel avente lo stesso nome sia di quest'ultimo che del modello che si andrà a creare su RockWorks (il nome non potrà più essere modificato, pena il mal funzionamento del modello).

	А	В	с	D	E
1	Borehole	Easting	Northing	Elevation	Total Depth
2	BH_ST1	394.639,3087	4.986.544,7123	234,76	154,76
3	BH_ST2	394.666,9249	4.986.556,3856	234,84	154,84
4	BH_ST3	394.801,3872	4.986.727,8204	234,84	154,84
5	BH_ST4	394.784,7160	4.986.816,5349	234,77	154,77
6	BH_ST5	394.784,7160	4.986.816,5349	237,78	157,78
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
	< → Location	Stratigraphy Lith	Type 🕂		

Figura 25. Formattazione dei dati in Excel (.xlsx) per l'importazione su RockWorks (Location)

	А	В	С	D
1	Borehole	Depth 1	Depth 2	Stratigraphy
2	BH_ST1	0,00	2,90	Riporto
3	BH_ST1	2,90	25,50	Ghiaie
4	BH_ST1	25,50	27,00	Conglomerato cementato
5	BH_ST1	27,00	32,00	Ghiaie
6	BH_ST1	32,00	37,00	Sabbie
7	BH_ST1	37,00	42,30	Ghiaie
8	BH_ST1	42,30	80,00	Limi
9	BH_ST2	0,00	1,00	Soletta CLS
10	BH_ST2	1,00	26,40	Ghiaie
11	BH_ST2	26,40	30,00	Sabbie
12	BH_ST2	30,00	34,10	Ghiaie
13	BH_ST2	34,10	36,60	Sabbie
14	BH_ST2	36,60	40,80	Ghiaie
15	BH_ST2	40,80	80,00	Limi
16	BH_ST3	0,00	0,10	Soletta CLS
17	BH_ST3	0,10	12,60	Ghiaie
18	BH_ST3	12,60	19,00	Sabbie
19	BH_ST3	19,00	26,50	Ghiaie
20	BH_ST3	26,50	28,40	Sabbie
21	BH_ST3	28,40	33,90	Ghiaie
22	BH_ST3	33,90	35,50	Sabbie
23	BH_ST3	35,50	38,40	Ghiaie
24	BH_ST3	38,40	80,00	Limi
25	BH_ST4	0,00	0,40	Soletta CLS
26	BH_ST4	0,40	1,00	Riporto
27	BH_ST4	1,00	1,30	Soletta CLS
28	RH ST4	1 30	2.50	Riporto
	\leftarrow	Location	Stratigraphy	Lith Type 🛛 🕂

Figura 26. Formattazione dei dati in Excel (.xlsx) per l'importazione su RockWorks (Stratigraphy)

	А	В	с	D	E	F
1	Name	Density	Young Modulus	Poisson ratio	Shear modulus	Cohesion
2	Soletta CLS	18	12	0,25	34	0
3	Ghiaie	19,5	160	0,35	36	15
4	Sabbie	19,5	160	0,35	36	15
5	Riporto	18	12	0,25	34	0
6	Conglomerato cementato	18	12	0,25	34	0
7	Limi	19	19	0,32	31,5	30
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
20						
20						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
	 Location Stratigra 	phy Lit	h Type 🛛 🕂			

Figura 27. Formattazione dei dati in Excel (.xlsx) per l'importazione su RockWorks (Lith Type)

Una volta importati i dati (Borehole Manager \rightarrow File \rightarrow Import \rightarrow Excel \rightarrow Multiple Tables), la pagina si presenta come in Figura 28. Da notare che si possono impostare le dimensioni del modello e della relativa griglia in funzione della posizione dei boreholes con il comando Scan Boreholes, inoltre è necessario specificare il sistema di riferimento (Coordinates) e le unità di misura con il quale si vuole lavorare (Units). Come si può osservare, inoltre, tutti i dati presenti su Excel sono ora visualizzabili nelle diverse sezioni del Borehole Menager.

Settings Coord	dinates: UTM M	eters, WGS-84 1984, Zor	ne 32 X: 394.600 .	0 - 394.700.0 Y: 4.986.500.0 - 4.986.600.0 Z: 80.0 - 240.0 Nodes: 2x2x17	Run Script
Image Image Image Image	Grid & Model D Minimun X: 394. V: 4.986. Z: Scan Datashe	imensions h Maximum 600 394.700 500 4.986.600 6 80 240 6 et \$\$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$ \$	Spacing Nodes 100 2 100 2 101 17 Import Ex	Range Units 100 100 100 100 100 100 100 10	
Project Manager - Project Table - Datasheet Fil - Grid Models Ghiaia cor	es ^ les (0 Files (15 Files) n sabbia l	Home K Utili Map StripLogs Lit File Edit View	ties Soreho bology Stratigra SQLite Borehole Data	ole Manager \ 2 ③ 3t: A ③ 3 phy I-Data T-Data P-Data Fractures Aquifers Colors Vectors Production	5 boreholes (5 Enabled)
Ghiaia sat	bbiosa lim bbiosa lim bbiosa_Ba bbiosa_To	► BH_ST1 BH_ST2 BH_ST3 BH_ST4 BH_ST5	Location Orientation Lithology	Borehole Location Information Borehole Name* [H-JST1 [Raster: () Vector: ()	
Limo con Limo con Sabbia co Sabbia co	sabbia de sabbia de on limo e a on limo e a ebolmente	□ RH ² 12	Stratigraphy I-Data I-Text	Collar Coordinates Comments Other Coordinate Projections Horizontal: UTM Meters, Datum: WGS-84 1984, Zone: 32 Easting* 394.681.8233 Meters	
Sabbia de Soletta CL Soletta CL Soletta CL Surface.Ru	ebolmente LS_Base.Rv LS_Top.Rw wGrd s (2 Files)		P-Data P-Text Colors	Northing* 4.986.591.7139 Meters - Vertical: Meters Z (Elevation)* 234.76 Meters	
 2-D Diagram Borehole 3-D Diagram 3-D Diagram boreholes 	is (1 File) location n is (2 Files) s.Rw3D v		Fractures Water Levels Symbols	Collar Elevation* 0.0 Meters Total Depth* 154.76 Meters * Required fields.	
<	sh 🔍	Q	Patterns	Cyptional Fields Show Location in Google Earth	

Figura 28. Importazione boreholes in RockWorks

La visualizzazione dei boreholes in RockWorks è semplice e automatizzata, in quanto questo software è stato programmato proprio per l'analisi geotecnica che ci si appresta a fare. Innanzitutto, sono state personalizzate le caratteristiche grafiche di ogni tipologia litografica (*Borehole Menager* \rightarrow *Borehole Data* \rightarrow *Stratigraphy* \rightarrow *Stratigraphy Types*), poi sono stati creati degli Striplogs (grafici rappresentativi della stratigrafia) sia in 2D che in 3D (*Borehole Menager* \rightarrow *Striplogs* \rightarrow *2D Dimensional/3D* \rightarrow *Dimenional* \rightarrow *Multiple Logs*) di cui si possono vedere degli esempi in Figura 29.



Figura 29. Visualizzazione dei boreholes in 2D e 3D in RockWorks

Per avere inoltre un modello da esportare, per verificare l'interoperabilità con il BIM, è stato elaborato un primo modello di stratigrafia semplificato (Figura 30), visti sia l'esiguo numero di sondaggi importati, sia la semplificazione nella nomenclatura (*Borehole Manager* \rightarrow *Borehole Data* \rightarrow *Stratigraphy* \rightarrow *Model*). Anche questa operazione è abbastanza automatizzata, anche se vi è la possibilità di modificare alcuni parametri. Tuttavia, non ci si sofferma ora a descrivere dettagliatamente le assunzioni fatte, in quanto questa parte sarà oggetto di trattazione nei paragrafi successivi.



Figura 30. Modello semplificato di stratigrafia con RockWorks

Tra i diversi formati di esportazione del software, i due più conformi ad una interoperabilità con il BIM sono il formato .dxf (sviluppato da Autodesk come formato di scambio tra i propri software ed altri) ed il formato .dae (COLLADA, formato file d'interscambio tra applicazioni 3D).

Dopo aver esportato in .dxf da RockWorks sia il modello della stratigrafia che quello dei boreholes in 3D, sono poi stati importati nella piattaforma di BIM authoring della casa Autodesk, ossia Revit, e poi nei software 3DS Studio e Civil 3D.

Importando in Revit il modello, si è riscontrato che esso veniva letto come un unico layer, quindi per distinguere i diversi strati è stato necessario esportare da RockWorks ogni singolo strato in .dxf e fare delle importazioni separate in un unico foglio di lavoro di Revit. In aggiunta a questa criticità, si è anche osservato che gli attributi del file (in questo caso il materiale degli strati) vengono perduti nella fase di import e non riescono ad essere visualizzati. La visualizzazione in Revit appare come in Figura 31.



Figura 31. Visualizzazione delle importazioni dei file di RockWorks (.dxf) in Revit

Come secondo tentativo, per cercare di mantenere gli attributi, si è importato l'intero modello in formato .dxf su *3DS Studio* (Figura 32), dove i diversi layers corrispondenti agli strati mantenevano le loro informazioni sul materiale. Tali layers sono stati poi esportati in formato .sat ed importati su Revit come famiglie (Figura 33). Tuttavia, anche in questo caso, l'import su Revit non ha consentito di conservare le caratteristiche degli strati.



Figura 32. Visualizzazione delle importazioni del modello di RockWorks (.dxf) in 3D Studio



Figura 33. Visualizzazione dell'importazione del modello di 3D Studio (.sat) in Revit

Infine, il file .dxf è stato importato su *Civil 3D*. In questo caso è stato possibile importare il modello come unico file ed avere poi in Civil 3D la suddivisione dei diversi strati in layers (Figura 34). Inoltre, anche gli attributi sono stati mantenuti in fase di import, constatando il miglior risultato in termini di interoperabilità. Si precisa che con attributi si intende qui il materiale dei singoli strati, in quanto altri tipi di dati geotecnici vengono importati e visualizzati come tabelle in RockWorks ma non è possibile poi attribuirli al modello in 3D ed esportarli in qualsiasi modo.



Figura 34. Visualizzazione delle importazioni del modello di RockWorks (.dxf) in Civil 3D

In ultimo, si è tentato di importare il modello in formato COLLADA, sia in Revit che in Civil 3D, non ottenendo nessun risultato e dando quindi un esito negativo al test d'interoperabilità in questo frangente.

È stato infine testato il software **Novapoint**, che è una piattaforma di BIM authoring, ma si è tentato di ampliare il suo utilizzo anche alla modellazione geotecnica del sottosuolo. Il processo per la verifica di interoperabilità con altri software BIM è visualizzato in Figura 35 (la cui legenda è espressa in Figura 13).



Figura 35. Processo per i test di interoperabilità su Novapoint

Avendo a disposizione i dati geotecnici organizzati in Tabelle Excel, si è provato ad effettuare un'importazione diretta, ma le modalità di settaggio dei dati non erano esplicitate nel manuale utente, pertanto si sono cercate delle alternative. Innanzitutto, si è provato a sfruttare il *Civil3D Connector* di Novapoint, un'estensione del software base che permette di importare oggetti nativi di Civil 3D in modo diretto e dinamico, conservando tutti gli attributi. Per fare questo però è stato prima necessario importare e visualizzare i boreholes in Civil 3D. Esiste per quest'ultimo un plug-in sviluppato dalla Keynetix, denominato *Geotechnical Module*, che mette a disposizione un set di tool per la catalogazione dei dati di sondaggio e delle analisi geologiche. Per utilizzarlo è stato necessario formattare i dati in .xlsx in uno specifico modo, riportato in Figura 36, distinguendo in tre fogli di

calcolo (Field Geological Descriptions, Location Details, Orientation and Inclination) e trasformando poi ogni file.xlsx in un file .csv, che è quello supportato.

1	Location ID	Depth Top	Depth Base	Legend Code	Geology Code	1	Location ID	Location Type	Easting	Northing	Ground Level	Final Depth	Location ID	Orientation	Inclination	
2	BH_ST1	0,00	2,90	Riporto	R	2	BH ST1	BH	394681,83	4986591,71	234,80	154,80	BH_ST1	0	90	
3	BH_ST1	2,90	7,70	Ghiaia in matrice Sabbiosa	GS	3	BH_ST2	BH	394676,06	4986572,98	234,80	154,80	BH_ST2	0	90	
4	BH_ST1	7,70	10,60	Ghiaia in matrice Limosa Sabbiosa	GLS	4	BH_ST3	BH	394671,42	4986555,90	234,80	154,80	BH_ST4	0	90	
5	BH_ST1	10,60	25,50	2-Ghiaia in matrice Sabbiosa	2-GS	5	BH_ST4	BH	394690,87	4986577,94	234,00	154,00	BH_ST6	0	90	
6	BH_ST1	25,50	27,00	Conglomerato Cementato	CC	6	BH_ST5	BH	394684,96	4986558,72	234,00	154,00	BH_ST7	0	90	
7	BH_ST1	27,00	32,00	Ghiaia in matrice Limosa Sabbiosa	2-GLS	7	BH_ST6	BH	394703,76	4986581,45	234,70	154,70	BH_ST14	0	90	
8	BH_ST1	32,00	37,00	Sabbia	S	8	BH_ST7	BH	394699,44	4986566,41	234,70	154,70	BH_ST14	0	90	
9	BH_ST1	37,00	42,30	Ghiaia in matrice Limosa Sabbiosa	3-GLS	9	BH_ST8	BH	394694,30	4986549,38	234,70	154,70	BH_ST15	0	90	
10	BH_ST1	42,30	68,00	Limo	L	10	BH_ST9	BH	394708,29	4986573,31	234,00	154,00	BH_ST15	0	90	
11	BH_ST1	68,00	80,00	Limo Sabbioso	LS	1	BH_ST10	BH	394702,54	4986554,91	234,00	154,00	BH_ST16	0	90	
12	BH_ST2	0,00	1,00	Soletta in calcestruzzo	CLS	13	2 BH_ST11	BH	394717,13	4986520,77	234,60	154,60	BH_ST16	0	90	
13	BH_ST2	1,00	10,00	Ghiaia in matrice Sabbiosa	GS	13	BH_ST12	BH	394712,38	4986562,37	234,60	154,60	BH_SP1	0	90	
14	BH_ST2	10,00	26,40	Ghiaia in matrice Limosa Sabbiosa	GLS	14	4 BH_ST13	BH	394705,69	4986542,26	234,60	154,60	BH_SP1	0	90	
15	BH_ST2	26,40	30,00	Sabbia	S	1	5 BH_ST14	BH	394613,36	4986562,09	234,90	194,90	BH_SP2	0	90	
16	BH_ST2	30,00	34,10	Ghiaia in matrice Limosa Sabbiosa	2-GLS	10	6 BH_ST15	BH	394636,91	4986582,93	234,90	194,90	BH_SP2	0	90	
17	BH_ST2	34,10	36,60	Sabbia	2-S	1	7 BH_ST16	BH	394662,54	4986605,00	234,90	194,90	BH_SP3	0	90	
18	BH_ST2	36,60	40,80	Ghiaia in matrice Limosa Sabbiosa	3-GLS	18	BH_SP1	BH	394500,32	4986648,88	234,90	204,90	BH_SP3	0	90	
19	BH_ST2	40,80	80,00	Limo Sabbioso	LS	19	BH_SP2	BH	394580,79	4986631,66	235,60	205,60	BH_SV1	0	90	
20	BH_ST3	0,00	0,10	Soletta in calcestruzzo	CLS	20	BH_SP3	BH	394523,90	4986585,12	236,10	206,10	BH_SV1	0	90	
21	BH ST3	0,10	1,20	Riporto	R	2	1 BH_SV1	BH	394563,65	4986935,09	234,60	204,60	BH_SV2	0	90	
22	BH_ST3	1,20	12,60	Ghiaia in matrice Sabbiosa	GS	23	2 BH_SV2	BH	394495,37	4986773,13	234,80	204,80	BH_SV2	0	90	
23	BH ST3	12,60	19,00	Sabbia	S	2	3 BH_SV3	BH	394433,40	4986625,85	234,90	204,90	BH_SV3	0	90	
24	BH ST3	19,00	26,50	Ghiaia in matrice Sabbiosa	2-GS	24	4 BH_SV4	BH	394400,05	4986532,43	235,10	205,10	BH_SV3	0	90	
25	BH ST3	26,50	28,40	Sabbia	2-S	2	5 BH_SV5	BH	394299,69	4986614,85	235,00	215,00	BH_SV4	0	90	
26	BH_ST3	28,40	30,00	Ghiaia in matrice Sabbiosa	3-GS	20	5 BH_SV6	BH	394275,06	4986464,40	241,90	221,90	BH_SV4	0	90	
27	BH_ST3	30,00	33,90	Ghiaia in matrice Limosa Sabbiosa	GLS	2	7 BH_SV8	BH	394495,29	4986556,96	236,30	206,30	BH_SV5	0	90	
20	RH ST3	33.00	35.50	Sabhia	3 5	_2	BH SV9	BH	394607.77	4986524.07	234.70	204.70	BH SV6	0	90	
	4 F	Field Geolog	gical Descriptio	n 🕀				Location Details	. +				4	Orientation a	nd Inclinatio	'n

Figura 36. Formattazione dei dati per l'importazione in Civil 3D con Geotechnical Module

Si noti, inoltre, che è stato necessario utilizzare una classificazione più dettagliata per i diversi strati, in quanto la ripetizione di una stessa unità geologica in un borehole comporta la creazione di un modello non corretto. Quindi alla nomenclatura precedentemente adottata, si è anteposto un numero crescente all'aumentare della profondità del sondaggio, se vi era la ripetizione di uno stesso materiale nello stesso foro di sondaggio. La nuova codifica della nomenclatura (che verrà adottata da ora in poi) è riportata in Tabella 7.

Codifica	Descrizione
R	Riporto (di qualsiasi genere)
GS	Ghiaia in matrice sabbiosa
GLS	Ghiaia in matrice limosa sabbiosa
CC	Conglomerato cementato
CLS	Soletta in calcestruzzo
S	Sabbia
SG	Sabbia ghiaiosa/ con ghiaia
L	Limo
LS	Limo sabbioso
LA	Limo argilloso
2-GS	Secondo strato di Ghiaia in matrice sabbiosa
2-GLS	Secondo strato di Ghiaia in matrice limosa sabbiosa
2-CLS	Secondo strato di Soletta in calcestruzzo
2-S	Secondo strato di Sabbia
2-R	Secondo strato di Riporto (di qualsiasi genere)
2-LS	Secondo strato di Limo sabbioso
3-GS	Terzo strato di Ghiaia in matrice sabbiosa
3-GLS	Terzo strato di Ghiaia in matrice limosa sabbiosa
3-CLS	Terzo strato di Soletta in calcestruzzo
3-S	Terzo strato di Sabbia
3-R	Terzo strato di Riporto (di qualsiasi genere)
4-GS	Quarto strato di Ghiaia in matrice sabbiosa
4-GLS	Quarto strato di Ghiaia in matrice limosa sabbiosa
5-GLS	Quinto strato di Ghiaia in matrice limosa sabbiosa

Tabella 7. Nuova codifica per la nomenclatura dei materiali della stratigrafia

Prima del caricamento dei dati relativi ai fori di sondaggio, si è definito il sistema di riferimento geografico (WGS48/ UTM32N) e le unità di misura. In questo modo il Modulo Geotecnico ha importato i dati dei sondaggi effettuati e li ha posizionati in un contesto georeferenziato. La visualizzazione dei boreholes in Civil 3D è mostrata in Figura 37.

×	Layer	corrente: 0			Cerca layer 🔍 🔍	_> 💠 Sposta	🔿 Ruota 🛛 😽 Taglia +
34			6 6 6 6		3 円 🛱	🕂 - 😚 Copia	⚠ Specchio 🦳 Raccorda 🕶 👔
*	Filtri	**	S Nome	A D C B S Colore	Tino di I Spessore Traspa C D ^	🕅 🚽 🗔 Stira	Scala 🔡 Serie 🔹 🤇
			KNY-2DWELLS-2-CLS		Continu Defa 0		
t,		Tutti	KNX-3DWELLS-2-CLS		Continu — Defa 0		Modifica 🔻
í.					Continu. Defa 0		
			KNX-3DWELLS-2-05		Continu — Defa 0 P		
		Layer			Continu. Defa 0		
		🔮 Modif	KNX-3DWELLS-2-S		Continu — Defa 0		
			KNX-3DWELLS-2-CLS	• 🛋 🗗 =	Continu — Defa 0 🔤		
			KNX-3DWELLS-3-GLS		Continu — Defa 0		
8			KNX-3DWELLS-3-GS		Continu — Defa 0		
			KNX-3DWELLS-3-R		Continu — Defa 0		
			KNX-3DWELLS-3-S		Continu. — Defa. 0		
			KNX-3DWFLLS-4-GLS	• 🐨 🖶 = 10	Continu Defa 0		
			KNX-3DWELLS-4-GS	🔹 🚔 🚍 🚍 12	Continu — Defa 0		
			KNX-3DWELLS-5-GLS	🔹 🐳 🚅 🗮 🚺 10	Continu — Defa 0 🛛		
			KNX-3DWELLS-CC	• 🐳 🚅 🚍 = 250	Continu — Defa 0		
			KNX-3DWELLS-CLS	🕈 👻 🖶 🚍 252	Continu — Defa 0		
			KNX-3DWELLS-GLS	💌 👻 🚅 🗮 10	Continu — Defa 0 🛛		
į.			KNX-3DWELLS-GS	🔹 🏟 🚅 🖶 🛑 12	Continu — Defa 0 🕠		
			KNX-3DWELLS-L	🕴 🎃 🛖 🚍 170	Continu — Defa 0 🛛		
æ			KNX-3DWELLS-LA	130	Continu Defa 0		and a staff
AME			KNX-3DWELLS-LS	📍 👾 🔐 🖶 150	Continu — Defa 0 🛛 💀		
ÅL			KNX-3DWELLS-R	🥊 👾 🔐 🖶 🧧 92	Continu — Defa 0 🛛 🧠		
SIET			KNX-3DWELLS-S	🍷 👾 🔐 🖶 💶 40	Continu — Defa 0 🛛 🗛		
OPI			KNX-3DWELLS-SG	🕴 🌞 🔐 🚍 50	Continu — Defa 0 🛛 🗛		
PR			KNX-PL-WELLS-LABELS	🕴 👾 🔐 🖶 🚺 150	Continu — Defa 0 🛛 🗛		
SR	<	>	KNX-PL-WELLS-MARKERS	🌵 👾 🔐 🖶 📒 150	Continu — Defa 0 🛛 🕵 🗸		
EST	Inv	verti f «	<	- 12 Mart 12	>		
9	-						
Ð	Tutti:	237 layer vi	sualizzato/i su un totale di 237 layer				
			<u>de</u>				
			evo				
			2				

Figura 37. Visualizzazione in 3D dei boreholes su Civil 3D con Geotechnical Module

A questo punto si è utilizzato il Civil 3D Connector di Novapoint, creando prima il collegamento tra i due software in Novapoint e poi da qui aprendo Civil 3D. Con questo procedimento è comparso automaticamente in Civil 3D il tool Novapoint ed è stato quindi possibile usare la funzione Import. L'importazione è andata a buon fine e i fori di sondaggio venivano visualizzati correttamente anche in Novapoint, tuttavia si è constatato che da questi non era possibile poi procedere alla modellazione delle superfici della stratigrafia, pertanto si è optato per un altro tipo di importazione.

È stato quindi utilizzato un altro metodo, ossia sono stati creati diversi file .dwg con *Autocad*, uno per ogni borehole. Ogni foro di sondaggio è stato discretizzato come una serie di punti, tutti con stesse coordinate X e Y (quelle geografiche proprie di ogni borehole), ma con Z diverse, in base al materiale. Il primo punto è quello di superficie, con Z = Ground Level; il secondo punto ha Z = Ground Level – Depht Base (primo materiale); il terzo punto ha Z = Ground Level – Depht Base (secondo materiale); e così via. Ogni punto è stato disegnato su un diverso layer, denominato con il nome del materiale di cui il punto costituiva il limite inferiore nel borehole. Si noti come questa procedura sia particolarmente onerosa a livello di tempo e presupponga dei passaggi manuali che potrebbero essere affetti anche da errori dell'operatore. Sicuramente questo metodo è meno rapido e semplice degli altri, in cui si è riusciti ad importare agevolmente delle tabelle Excel. In fase di importazione (*Insert* \rightarrow *Import File* \rightarrow *Select File*) è stato necessario modificare le unità di misura da *undetermine* a metri, per evitare che il software impostasse automaticamente la finestra di lavoro in millimetri. È stato fondamentale anche in questo caso, come nel precedente, rivedere la formattazione della nomenclatura, attribuendo agli strati di materiale che si ripetono in uno stesso boreholes un numero crescente che precedesse la sigla che lo rappresentava (Tabella 7). L'importazione in questo modo è andata a buon fine (Figura 38) e i punti sono stati utilizzati per le successive modellazioni.



Figura 38. Visualizzazione dei punti rappresentativi dei boreholes importati (.dwg) in Novapoint

Per completezza, si riporta in questa fase che il programma riesce anche ad importare file .ifc, ma la trattazione completa verrà fatta successivamente, in quanto compete ad un'altra fase del lavoro.

In fase di export, il software è in grado di generare file di diversi formati, tra cui ci si è interessati dei file di tipo .ifc e di quelli .dwg, ossia di quelli che permettessero l'interoperabilità con altri software BIM-based.

Il file .dwg esportato da Novapoint è visualizzabile in *Civil 3D*, tuttavia viene importata solo la geometria, ma non gli attributi, infatti non è possibile distinguere i materiali dei vari strati.

Una volta generato il file .ifc dal comando di output di Novapoint, si è provato dapprima a visualizzarlo con *BIM Vision* (un visualizzatore gratuito di file .ifc) per verificarne la corretta creazione, poi si è provato ad importarlo sia in *Revit* che in *Civil 3D*. Quasi in tutti i casi è stato possibile esportare sia la geometria che gli attributi, tranne nel caso di Civil 3D, in cui gli attributi non venivano visualizzati. Un punto a favore di Novapoint è che è possibile attribuire delle

caratteristiche al modello (ad esempio informazioni sui materiali o su altre prove geotecniche) e successivamente esportarle nel file .ifc e questo è un vantaggio fondamentale ai fini di avere un modello finale interrogabile e fruibile in ogni momento della vita dell'opera.

Anche di queste fasi di export si è riportato qui i risultati per completezza, ma i test sono stati fatti dopo la modellazione, pertanto la trattazione verrà completata in seguito.

3.1.4 Potenzialità e criticità nella modellazione della stratigrafia

Una volta portati a termine i test di interoperabilità, si è proceduto con la modellazione del sottosuolo. Il primo tentativo è stato fatto con **RockWorks**, in quanto è un software specifico per questa operazione. Si sono importati dapprima tutti i boreholes (Figura 39), poi si è proceduto alla modellazione della stratigrafia.



Figura 39. Visualizzazione dei boreholes in 3D in RockWorks

In RockWorks, come precedentemente anticipato, la fase di modellazione è stata piuttosto immediata ed intuitiva, infatti il modello del sottosuolo con i relativi volumi è stato creato in maniera automatizzata. Inizialmente, per la codifica della nomenclatura, si è utilizzata quella base, riportata in Tabella 1 e Tabella 2. Dopo aver seguito il percorso *Borehole Manager* \rightarrow *Borehole Data* \rightarrow *Stratigraphy* \rightarrow *Model*, si è presentata una schermata di settaggi nella quale, alla voce Options di Interpolate Surfaces, è stato possibile scegliere il metodo di interpolazione dai dati. Generalmente in fase di modellazione geologica si utilizza come metodologia il Kriging, cioè un insieme di procedimenti geostatistici che assumono la presenza di una correlazione spaziale tra i valori misurati, stimata attraverso la costruzione dei variogrammi (Figura 40).

Kratigraphic Modeling C	ptions			>
	Algorithms		Additional Options	
Gridding Options	C Closest Point	ピ View Instructional Video Variography	Dimensions	View Instructional Video
	C Cumulative	O Automatic O Manual	F - - - -	
Modeling Sequence	C Dip	Tolerance	I Decluster	Adjust/Examine Output Dimensions
wodening sequence	C Directional	Spoke Spacing: 45 225	Cogarithmic	
	C Distance to Point	Maximum Distance: 10000	□ High Fidelity	○ Variable (Based On Data Coordinates)
Constraining Surface	C Inverse Distance	Variogram: Gaussian With Nugget 🗸 🗸	Polvenhance	Average Minimum Distance
	• Kriging	Pre-Model Points for Variograms	,	Scalar: 1.00E+
Polygon Filter	C Plane	Edit/Examine Variograms	☐ Smooth	Manual Node Density: 50
	C Sample Density	Reporting Options	Densify	O Current (Last Used)
Baseplate	C Trend Polynomial	2D Variogram Matrix	Max. Distance	Confirm Grid Dimensions
	C Trend Residuals	Items: Exponential With Nugget, Exponential With		
	C Triangulation	Variograms Per Row: 10 🔹	☐ Z = Color	
Volumetrics	C Hybrid	Kriging Options Neighbors: 16	□ Faulted	
✓ <u>O</u> k X ⊆	ancel ? Help			

Figura 40. Metodo di interpolazione dei dati in RockWorks - Kriging

Quindi il primo modello (Figura 41) è stato ottenuto con questo metodo, tuttavia la stratigrafia non convince in quanto comparandola con i boreholes non si ha una corrispondenza tra gli strati (Si noti in particolare l'ultimo strato di sabbia, il cui volume è sproporzionato rispetto alle aspettative e prende il posto che dovrebbe essere dei limi).



Figura 41. Modello del terreno in RockWorks con interpolazione Kriging

Pertanto si è cambiato metodo di interpolazione, scegliendo la Triangolazione, che è una tecnica che sfrutta le proprietà dei triangoli per il calcolo di distanze tra punti (Figura 42)

	Algorithms		Additional Options	
Gridding Options	C Closest Point	View Instructional Video	Dimensions	View Instructional Video
	C Cumulative	Interpolate Edge Nodes using Inverse Distance	_	Based On Output Dimensions
Modeling Sequence	C Dip	○ No Interpolation of Edge Nodes	Decluster	Adjust/Examine Output Dimensions
violening sequence	C Directional	Default Z O User-Defined	✓ Logarithmic	
	C Distance to Point	Null (Undefined)	🗆 High Fidelity	○ Variable (Based On Data Coordinates)
Constraining Surface	C Inverse Distance	About Triangulation Based Gridding	Polyenhance	Average Minimum Distance
	C Kriging			Scalar: 1.00E+
Polygon Filter	C Plane		☐ Smooth	Manual Node Density: 50
	C Sample Density	Triangulation starts with control points	🗖 Densify	Current (Last Used)
	C Trend Polynomial			Confirm Grid Dimensions
Baseplate	C Trend Residuals		, Max. Distance	
	• Triangulation		☐ Z = Color	
Volumetrics	C Hybrid	and creates a matrix of triangles connecting these points.	Faulted	

Figura 42. Metodo di interpolazione dei dati in RockWorks - Triangolazione

Come si può notare in Figura 43, in questo caso la modellazione è più coerente con i dati geotecnici in ingresso. In entrambi i casi si riporta che il volume di Conglomerato Cementato (CC) non è stato creato in quanto per entrambi i metodi servono almeno tre punti per l'interpolazione e in questo caso non si hanno a disposizione.



Figura 43. Modello del terreno in RockWorks con Triangolazione

Tuttavia, osservando meglio il modello ci si rende conto che il software non riporta l'alternanza di uno stesso materiale a diverse profondità, ma si limita ad interpolare le caratteristiche puntuali in unico strato. Ciò che ne risulta è una stratigrafia composta da una successione di strati che si ripetono una sola volta, perdendo così tutte le informazioni sulla ripetizione di uno stesso materiale lungo la profondità complessiva.

Per questo motivo si è adottata anche in questo caso la codifica per la nomenclatura più complessa, riportata in Tabella 7, in modo da recuperare e differenziare tutte le informazioni stratigrafiche. Importando però i fori di sondaggio così settati, si è riscontrato l'errore mostrato in Figura 44, dovuto alla complessità del modello importato. Questa è una criticità del software che appare grave, in quanto non consente la modellazione di stratigrafie complesse e solitamente nei casi reali i terreni non sono mai una successione lineare di strati, ma presentano delle caratteristiche variabili tipiche dell'elemento naturale.



Figura 44. Errore in RockWorks nell'importazione dei boreholes, dovuto alla complessità del modello

Si è passati dunque alla modellazione su Novapoint, dove tutti i boreholes erano stati già importati nella fase precedente come punti in formato .dwg. In Novapoint i volumi dei diversi strati non vengono generati automaticamente dal software ma è stato messo a punto un procedimento manuale, creando dapprima le superfici superiore e inferiore di ogni strato e poi i volumi intermedi. Per la creazione delle superfici l'idea è stata quella di unire tutti i punti con lo stesso layer Autocad, quindi con lo stesso materiale, distinguendo nel software la superficie topografica (Ground surface) dagli strati del sottosuolo (Subsurface). La superficie è stata creata come Ground Surface, da Modeling \rightarrow Existing Situation \rightarrow Ground surface, dove in Features sono stati selezionati come Tasks tutti i boreholes importati, mentre su ProxyFeatures sono stati considerati per ogni borehole solo i layer "Surface". Stesso procedimento è stato adottato anche per le altre superfici, da Modeling \rightarrow Existing Situation \rightarrow Subsurface, dove in Features sono stati selezionati, anche in questo caso, come Tasks tutti i boreholes importati, mentre su ProxyFeatures sono stati considerati per ogni borehole solo i layer relativi al materiale considerato. Inoltre, è stata impostata come Surface to follow la Ground Surface e per ogni superficie si sono scelti Material Type e Classification, dove però i tipi di terreno sono generici e preimpostati nel software (Sand, Gravel, Silt, ecc). Le superfici create sono state generate dal programma per triangolazione dei punti, quindi necessariamente i materiali con meno di tre punti sono andati persi. Il modello ottenuto alla fine del processo, con legenda e strati superficiali creati, è riportato in Figura 45.



Figura 45. Creazione delle superfici stratigrafiche in Novapoint

Dopo aver creato le superfici, dove ognuna di esse è la base inferiore del relativo strato di materiale, si è passati alla modellazione dei volumi tra superfici con il comando Create Volume, che permette di generare un volume tra due superfici. Come si può notare, però le diverse superfici non sono disposte in modo consecutivo e lineare, ma si intersecano in molti punti, e la loro successione varia quindi da sezione a sezione. Dopo aver tracciato diverse cross sections, si è scelto di seguire nella creazione dei volumi quella riportata in Figura 46, in quanto appariva quella maggiormente comprensiva di tutte le superfici, ad esclusione delle superfici 2 - S e 2 – LS in quanto troppo piccole e non visualizzabili.



Figura 46. Cross section della stratigrafia

La pecca del sofware è che non vengono visualizzate delle etichette con il nome dei materiali nella cross-section, pertanto le diverse superfici sono state individuate manualmente, selezionando ogni feature, e la successione viene riportata in Figura 47.

Successione strati cross section
Surface
R
CLS
2R
GS
GLS
S
2-GLS
2-GS
3-GLS
3-GS
4-GLS
SG
LA
LS
L

Figura 47. Successione degli strati nella cross section

Si è poi deciso di assegnare dei colori ad ogni materiale, in modo da personalizzare le viste e distinguere anche visivamente i differenti tipi di terreno. Ad ogni tipo di materiale, si è assegnato un materiale tra quelli standard preimpostati del software, anche se non perfettamente corrispondente a quello reale. Si sono poi customizzate le Drawing Rules, cambiando nome e colore di ogni materiale (*View* \rightarrow *Drawing Rule Editor* \rightarrow *Edit* \rightarrow *All Type* \rightarrow *All Object* \rightarrow *Existing* \rightarrow *Geotechnical Interpretation* \rightarrow *Subsurface* \rightarrow *Layer Classification*). La legenda delle modifiche fatte è riportata in Figura 48.


Figura 48. Customizzazione dei layer in Novapoint

Per la creazione dei diversi volumi, quindi, si è usato il percorso *Modelling* \rightarrow *Create Volumes*, impostando come Base Surface e Comparison Surface le due superfici tra le quali si intendeva creare il volume. Il software in questa fase crea due tipi di feature, Cut e Fill, la prima quando la Comparison Surface è posizionata sotto la Base Suface, la seconda nel caso opposto. Nel caso esaminato, come già spiegato, le superfici si intersecano tra loro, pertanto in quasi tutti i casi si hanno, per due superfici consecutive, sia dei volumi Cut che dei volumi Fill. In questa fase si riscontra però una criticità. I boreholes in corrispondenza della Torre hanno una profondità di scavo di 80 metri e una successione di strati più complessa, a differenza invece dei restanti che hanno una profondità di massimo 40 metri e quindi meno strati indagati. A causa di questa differenza, gli strati creati hanno dimensioni molto diverse tra loro e si intersecano in molti punti, data la vastità dell'area che ricoprono. Per questo motivo, molti dei volumi tra superfici non vengono creati, andando a perdere le informazioni sulle lenti di sabbia e sui limi degli strati più profondi. I dettagli sulla creazione dei volumi sono riportati per maggiore chiarezza in Tabella 8.

Base Surface	Comparison Surface	Volume	Creazione del volume	
Surface	R	R Volume	SI	
R	CLS	CLS Volume	NO	
CLS	2-R	2-R Volume	NO	
2-R	GS	GS Volume	NO	
GS	GLS	GLS Volume	SI	
GLS	S	S Volume	NO	
S	2-GLS	2-GLS Volume	NO	
2-GLS	2-GS	2-GS Volume	SI	
2-GS	3-GLS	3-GLS Volume	SI	
3-GLS	3-GS	3-GS Volume	SI	
3-GS	4-GLS	4-GLS Volume	SI	
4-GLS	SG	SG Volume	NO	
SG	LA	LA Volume	NO	
LA	LS	LS Volume	NO	
LS	L	L Volume	NO	

Tabella 8. Criticità nella creazione dei volumi su tutta l'area di indagine

Si è pertanto adottata un'altra soluzione, dividendo l'area di indagine in due sotto-aree: quella corrispondente alle fondazioni della Torre, comprendente i boreholes di tipo ST (che è anche la zona di maggiore interesse per gli scavi) e la restante parte caratterizzata dai boreholes di tipo SP, SV e ST14, ST15, ST16 (boreholes in comune con la prima area, in modo da collegare le due stratigrafie). In questo modo, come si può notare nelle Tabella 9 e Tabella 10, quasi tutti i volumi dell'area principale e di maggiore interesse vengono generati e anche l'area secondaria assume una sua caratterizzazione (i volumi e le superfici dell'area secondaria vengono affiancati da * per distinguerli da quelli dell'altra zona).

Base Surface	Comparison Surface	Volume	Creazione del volume
Surface	R	R Volume	SI
R	CLS	CLS Volume	SI
CLS	2-R	2-R Volume	SI
2-R	GS	GS Volume	SI
GS	GLS	GLS Volume	SI
GLS	S	S Volume	SI
S	2-GLS	2-GLS Volume	SI
2-GLS	2-GS	2-GS Volume	SI
2-GS	3-GLS	3-GLS Volume	SI
3-GLS	3-GS	3-GS Volume	NO
3-GS	4-GLS	4-GLS Volume	NO
4-GLS	SG	SG Volume	SI
SG	LA	LA Volume	SI
LA	LS	LS Volume	SI
LS	L	L Volume	SI

Tabella 9. Schema creazione dei volumi dell'area principale

Base Surface	Comparison Surface	Volume	Creazione del volume
Surface *	R *	R Volume *	SI
R *	CLS *	CLS Volume *	SI
CLS *	GS *	GS Volume *	SI
GS *	GLS *	GLS Volume *	SI
GLS *	2-GLS *	2-GLS Volume *	SI
2-GLS *	2-GS *	2-GS Volume *	SI
2-GS *	3-GLS *	3-GLS Volume *	SI
3-GLS *	3-GS *	3-GS Volume *	SI
3-GS *	SG *	SG Volume *	NO

Tabella 10. Schema creazione dei volumi dell'area secondaria

Per ogni volume rappresentato è stato possibile poi aggiungere come attributo (che comparirà nelle properties del volume) il tipo di materiale di cui si compone lo strato (*Volume interessato* \rightarrow *Edit task* \rightarrow *Settings* \rightarrow *Fill/Cut feature and attributes* \rightarrow *Generic Attributes* \rightarrow *Save to Task*). Questo procedimento, seppur lungo, è stato poi molto utile in fase sia di visualizzazione che di esportazione, infatti tutte le proprietà attribuite ai volumi in questo modo sono diventate delle informazioni reperibili in qualsiasi momento nel modello, nel pieno spirito del BIM.

Le stratigrafie così ottenute sono state riportate in Figura 49 (Superfici) e Figura 50 (Volumi). Nel caso dei volumi non è stato possibile attribuire una diversa colorazione ai diversi strati per poterli distinguere anche visivamente, ma è necessario selezionare ogni singolo strato per vederne le proprietà, come ad esempio il materiale.



Figura 49. Superfici del modello stratigrafico in Novapoint



Figura 50. Volumi del modello stratigrafico in Novapoint

Punto fondamentale per il completamento del modello è la visualizzazione anche dei fori di sondaggio con le relative caratteristiche, tuttavia i boreholes sono stati importati come punti e non è stato possibile in nessun modo estruderli, in quanto il comando di estrusione di Novapoint lavora solo sui volumi e i punti, ovviamente, ne sono privi. Si hanno quindi i dati relativi alle informazioni sui materiali, ma non una visualizzazione 3D rappresentativa. Per questo motivo si è deciso di importare il file .dxf esportato da RockWorks e trasformato in .dwg importandolo in Civil 3D, in cui i fori di sondaggio sono ben visibili. Come visto precedentemente, in Civil 3D vengono importati correttamente sia la geometria che gli attributi, tuttavia i layer che si generano non si basano sui materiali ma sul range di profondità di ogni strato di ogni borehole. Importando il modello su Novapoint si perdono tutte le informazioni e anche i nomi dei layers diventano poco utili. In fase di importazione si è tentato di modificare manualmente il nome dei layer (DWG Reader Settings \rightarrow *Polyline/3Dface* \rightarrow *Select layers to merge* \rightarrow *Layer name*) ma ciò non è stato consentito dal software. Pertanto, ogni singolo layer è stato modificato su Civil 3D a monte dell'importazione in Novapoint, sommando al nome del layer quello del borehole di appartenenza e aggiungendo una descrizione con il nome del materiale. Questo si è rivelato un procedimento lungo e macchinoso, soggetto peraltro al rischio di errore da parte dell'operatore, ma in questo modo i boreholes sono stati visualizzati correttamente in 3D in Novapoint e l'attributo del materiale è visibile nella property list di ogni strato (Figura 51). Come si può osservare in Figura 52, anche in questo caso, trattandosi di volumi, non vi sono differenziazioni di colore per i diversi materiali e non è stato possibile customizzare questo parametro. Si sottolinea inoltre che i boreholes non hanno perso, nelle diverse fasi di import ed export, la propria georeferenziazione e in questo senso l'accortezza da assumere è quella di lavorare sempre nello stesso sistema di riferimento e con lo stesso tipo di coordinate.



Figura 51. Esempio di visualizzazione delle proprietà di uno strato in Novapoint



Figura 52. Visualizzazione dei borehole importati su Novapoint e creati su RockWorks

Una volta finito il modello, si sono completati i test d'interoperabilità lasciati in sospeso nel precedente paragrafo riguardanti la fase di import ed export di Novapoint.

Per quanto riguarda i formati di esportazione del modello, tra i diversi formati di output del software, quelli di interesse sono stati .ifc e .dwg.

Per l'esportazione in formato .ifc, si è seguito un particolare procedimento che consente di mantenere le proprietà assegnate alle feature, nel nostro caso la proprietà Material Type assegnata ad ogni volume della stratigrafia, e che compaiono come genericPropertyList. Nel Conversion Rule Editor, in fase di esportazione, si è agito nella regola suddetta, configurando gli attributi della feature prescelta (es. Cut o FillLayer). Nel caso in esame, selezionando *View* \rightarrow *Attributes Conversion per Feature*, è stato interpretato l'attributo sorgente della feature (*Source Attribute* \rightarrow *GenericPropertyList*), ossia Material Type. La regola di conversione prevede di destinare quel particolare attributo a un propertySetDataList (Destination Attribute) con il medesimo nome nel campo Attribute Conversion Key Name e il valore di default (Default Value) presente in Novapoint (nel caso in esame i diversi nomi dei materiali assegnati ai volumi). Impostando cosi la regola (Figura 53) si è generato un file .ifc all'interno del quale si ha un PropertySet chiamato Material Type e, all'interno di esso, i diversi tipi di terreno impostati.

Conversio	on Rule Editor Mar	aging Conversion	Rules Cut&Fill 2 IFC	Сору								?	>	<
New Rule	X Delete Rule X Delete All Rules	Re-order	Create Rules from Preview model	m Crea from	ate Ru	ules Match Spatials Source I File	Destination Feature	Conversion per Feature 👻 Att	ribute Spatial Attribute Locate Feature View to Network	es Create Net Elements				
Active	Source Feature	Conversion Key Value	Destination ^ Feature	A	dd A	Attribute Row								
	TopOfSoilCutSI		lfcObject	Only	у [Source Attribute	Attribute Conversion Key	Dectination Attribute	Attribute Conversion Key	Default Value	D	F	M	^
	StakeOutString		lfcObject	F2F		Source Attribute	Name	Destination Attribute	Name	Derault value	· ·	1	m	
		XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	lfcObject			earthenMaterial.civilEngine		propertySetDataList	Color					
		XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	lfcObject]	genericPropertyList	Material Type	propertySetDataList	Material Type					11
	a	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	lfcObject		ו	earthenMaterial.civilEngine		propertySetDataList	Novapoint Road CivilEngin			1	Í T	1
	StructureLayer		IfcObject			classification	0	propertySetDataList	Novapoint Road/FieldCode			十	i –	1
	StakeOutString	xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	lfcObject			classification	1	propertySetDataList	Novapoint Road/FieldCode			1	t	1
		xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	lfcObject		1	classification	2	propertySetDataList	Novapoint Road/FieldCode			╈	┢	1
		xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx	lfcObject		1	classification	3	nronertySetDataList	Novanoint Road/FieldCode		-	┢	┢	
	FillLayer		lfcObject		-	classification	5	property SetDataList	Novapolitic Roadil Telucode		-	┢	┢	$\left\{ \right\}$
	Cut 🔻		lfcObject			earthenMaterial.detailedM		propertysetDataList	Novapoint RoadjMaterialD			┢	┡	
	SubgradeDeep		lfcObject			partOfCorridor		propertySetDataList	Novapoint Road RoadTask			L	L	
	-EdgeOfDeepBl		lfcObject 🗸			textureName		propertySetDataList	Novapoint Road/TextureNa					~
<			>											
	122 row(s)													
										Save	ок	(Close	

Figura 53. Conversione Rule Editor di Novapoint

Si è importato il file .ifc così ottenuto prima in un visualizzatore IFC (*BIM Vision*) per verificare che le proprietà fossero state effettivamente esportate. Come si vede da Figura 54, il processo è andato a buon fine.



Figura 54. Visualizzazione dell'importazione del modello di Novapoint (.ifc) in BIM Vision

È stato poi eseguito il vero e proprio test d'interoperabilità con *Revit* e *Civil 3D*. Nel primo caso il modello è stato importato correttamente con le relative proprietà (Figura 55), nel secondo caso invece, così come era stato nel caso di RockWorks, è stata visualizzata la geometria ma non gli attributi (Figura 56).



Figura 55. Visualizzazione dell'importazione del modello di Novapoint (.ifc) in Revit



Figura 56. Visualizzazione dell'importazione del modello di Novapoint (.ifc) in Civil 3D

Stesso risultato si è avuto esportando da Novapoint il modello in formato .dwg e importandolo in Civil 3D (Figura 57), non riuscendo a conservare le proprietà assegnate ai diversi strati.



Figura 57. Visualizzazione dell'importazione del modello di Novapoint (.dwg) in Civil 3D

Per quanto riguarda, invece, il completamento dei test d'interoperabilità sull'import, questa parte non è stata trattata nel precedente paragrafo perché si tratta di un altro tipo di importazione rispetto ai boreholes. Non si tratta infatti di un elemento geotecnico ma del modello strutturale della Torre della Regione Piemonte, a cui hanno lavorato diverse figure del laboratorio DrawingTOthefuture utilizzando il software Revit.

Prima di procedere all'esportazione del file .ifc da Revit, le feature con il quale è stata modellata la Torre sono state convertite in classi di esportazione IFC (*File* \rightarrow *Esporta* \rightarrow *Opzioni* \rightarrow *Opzioni IFC*).

In fase di export, è stato scelto un formato IFC 2x3, spuntando "Esporta gruppi di proprietà di Revit" nella finestra Gruppi di proprietà, in modo da esportare anche tutti gli attributi assegnati agli elementi della Torre.

In Revit il modello non era geolocalizzato (il punto base aveva coordinate (0;0;0)), quindi si sono riscontrate delle criticità nell'importazione in Novapoint.

Si è tentato dapprima quindi di assegnare delle coordinate al progetto, ma questa operazione non si è potuta svolgere direttamente in Revit, in quanto quest'ultimo nasce considerando la base di lavoro piatta e limitata a circa 20 miglia quadrate. Il problema è stato affrontato ricorrendo all'ausilio

dell'altro prodotto Autodesk che invece utilizza le coordinate geografiche, Civil 3D. È stato creato un collegamento tra i due tramite il plug-in *Autodesk Shared Reference Point for Autodesk Revit*, di cui di seguito si spiega il procedimento operativo. Dapprima è stato esportato il modello della Torre da Revit in formato .dwg, poi è stato aperto il file Civil 3D in cui era presente la superficie e i boreholes estratti da RockWorks e quindi georeferenziati. Con il comando XREF si è trovato il .dwg esportato da Revit e lo si è trascinato e ruotato in modo da posizionarlo spazialmente sulla superficie. A questo punto è stato impostato un punto di coordinate condivise, con *Strumenti → Strumenti → Gestione estensioni sottoscrizioni → Punto di riferimento condiviso Autodesk → Esporta punti di riferimento condivisi per Autodesk Revit*, scegliendo un punto base e un punto quasi-nord. Il file così creato è stato salvato in formato XML e usato poi su Revit. Il punto di coordinate condivise infatti è stato importato su Revit come *Barra multifunzione → Componenti aggiuntivi → Importa coordinate condivise dal file XML*, selezionando il file XML sopracitato e creando così un nuovo sistema di coordinate condiviso. Quest'ultimo è stato reso corrente infine su Revit con *Barra multifunzione → Gestisci → Posizione → Sito → selezionare il sistema di coordinate condiviso → Rendi corrente → OK*.

Il modello del Palazzo della Regione Piemonte in questo modo è stato georeferenziato, tuttavia una volta importato in Novapoint come .ifc non è stato possibile visualizzarlo.

Pertanto, si è tentata un'altra strada: si è importato il modello non georeferenziato ma il sistema di coordinate globali è stato impostato nei Settings di importazione, inserendo le coordinate piane che il punto base doveva assumere sulla superficie topografica e l'informazione sul True Nord (ricavata dal modello Revit), come mostrato in Figura 58.

IFC Reader Settings		? >	<
Feature existence	Assign Global Coordinate		
Elevation			
Spatial metadata	To get the correct placement of the IFC, assign the origin of the IFC-model to global coordinates.		^
Spalar metadata	Origin of the IFC-model file		
Re-import	The origin of the IFC-model is the origin of the World Coordinates defined in the ifc file		
Assign Global Coordinate	X = b Calculate Origin	۱	
	Y = 0		
	Z = 0		
	Origin in the file should be moved to this coordinate		
	Instruct the IFC reader to move the insertion point. Move the insertion point by offset Move the insertion point to 		
	ΔX = 394699.4402		
	ΔY = 4986566.4101 Select in plan wind	DW	
	ΔΖ = 234.7		
	True North The angle between north (y-axis) of the ifc-model and the real north within the xy-plane in degrees. 16.26		~
Preview after Reading File(s)	ОК	Cancel	

Figura 58. Geolocalizzazione della Torre nel modello di Novapoint (IFC Reader Settings)

Anche in questo modo non si riusciva a visualizzare la Torre in Novapoint con il metodo *tasto destro* \rightarrow *View in 3D*, l'unico modo per farlo è stato quello di visualizzare in 3D un qualsiasi elemento del modello (es. Surface) e poi trascinare il file di import nella finestra di visualizzazione (Figura 59).



Figura 59. Visualizzazione della Torre importata da Revit (.ifc) in Novapoint

Oltre alla geometria è importante sottolineare che sono stati importati tutti gli attributi, come ad esempio i materiali costituenti i diversi elementi.

3.2 Benchmark

In questa fase del lavoro sono state valutate e confrontate le prestazioni dei diversi software testati in ambito di interoperabilità. Per farlo, sono stati utilizzati diversi parametri qualitativi di confronto, in modo da avere un quadro completo degli strumenti che si hanno a disposizione per una modellazione Geo-BIM, con le loro potenzialità e criticità. In questo contesto, non si vuole decretare la superiorità di un software rispetto agli altri in senso assoluto, ma lo spirito è quello di individuare le potenzialità e le criticità di ognuno, in modo da poter scegliere quello più idoneo ad uno specifico BIM use. Per avere un confronto più chiaro e schematico, le caratteristiche dei diversi software sono state riportate in Figura 60. I parametri scelti riguardano diversi aspetti che sono stati verificati durante il lavoro.

Si possono fare delle considerazioni riguardo le prestazioni analizzate, per capire fino a dove ci si può spingere con ogni software.

ArcGIS non può certamente essere utilizzato per la modellazione, con gli strumenti ora a disposizione, ma può essere utile importarvi i boreholes nei casi in cui si abbiano ad esempio i dati di rilievo della zona considerata e lo scopo del progetto sia solo quello di elaborare questi tipi di dati avendo anche a disposizione le informazioni geotecniche della zona interessata.

RockWorks è sicuramente un software user-friendly, facile ed intuitivo da utilizzare per l'utente e consente di ottenere dei modelli di sottosuolo con pochi passaggi, ma è adatto solo per stratigrafie semplici. Sicuramente è un ottimo software per la visualizzazione 3D dei boreholes e ha una buona interoperabilità con i programmi BIM-based.

Novapoint, infine, è già un sofware BIM-based, ma interagisce anche con altri della stessa categoria e può essere utilizzato per modellare, seppur con qualche criticità, la parte geotecnica. È possibile customizzare molte task, ma non sempre questa operazione è intuitiva e richiede uno studio approfondito dei manuali e molte volte i passaggi non sono lineari. Non sempre ottimale è la visualizzazione dei diversi elementi e risulta difficile una distinzione visiva degli stessi senza il supporto dei dati correlati. Risulta sicuramente utile per la collaborazione tra più soggetti coinvolti nello stesso progetto.

	ArcGIS	RockWorks	Novapoint		
File format (Interoperabilità con altri programmi)	Lavora nel proprio formato	Lavora nel proprio formato. Possibilità di esportare dati in .dxf e .dae. Possibilità di importare dati GIS (.shp), .ags, punti linee e polilinee in .dxf	Lavora nel proprio formato. Possibilità di esportare dati in .ifc e .dwg. Possibilità di importare dati in .dwg con le relative proprietà e in .ags. Importazione diretta di modelli creati su Civil 3D con il Civil3D Connector		
Dati geotecnici	Possibilità di importare dati geotecnici in .csv	Possibilità di importare dati geotecnici in .xlsx o inserirli manualmente	Possibilità di importare dati geotecnici come punti in formato .dwg		
Presentazione dei boreoles in 3D	Possibilità di visualizzare i boreholes ma non in modo ottimale	Possibilità di visualizzare i boreholes in 3D	Possibilità di visualizzare i boreholes solo come punti e non in 3D. Visualizzazione in 3D solo con importazione della modellazione fatta con altri software		
Creazione del modello 3D	NO (con i metodi attualmente a disposizione)	Creazione del modello per interpolazione dei boreholes. Possibilità di visualizzare il modello in 3D e cross sections e di creare degli striplogs. Difficoltà di analisi per un numero troppo elevato di dati e per stratigrafie complesse	Creazione del modello con triangolazione di punti e generazione di volumi. Possibilità di visualizzare il modello in 3D. Possibilità di individuare le superfici stratigrafiche attraverso cross sections, ma senza una distinzione chiara tra i diversi strati. Analisi di stratigrafie complesse con introduzione di un elevato numero di informazioni		
Aggiornamento del modello	Non testato	Possibilità di aggiornare facilmente il modello inserendo manualmente ulteriori boreholes in fasi successive	Possibilità di aggiornare facilmente il modello importando successivamente nuovi dati, semplicemente editando nuovamente i diversi task del software		
User-friendliness	Non di facile utilizzo per gli scopi preposti	Intuitivo e di facile utilizzo nelle funzioni fondamentali. Dotato di spiegazioni ed esempi nell'interfaccia, utili soprattutto per le impostazioni più specifiche	Non di immediata usabilità senza la consultazione della User Guide. Di difficile utilizzo nelle funzioni più avanzate		
Versatilità	Molto difficile da utilizzare con modalità e per scopi diversi da quelli per il quale è stato programmato	Impossibile da utilizzare con modalità e per scopi diversi da quelli per il quale è stato programmato	Ottima possibilità di adeguare le task alle proprie esigenze ma con diverse difficoltà nella modifica dei settaggi predefiniti		
Tempi di modellazione	Metodi di utilizzo per gli scopi preposti molto complessi, con conseguente rallentamento nelle fasi di lavoro	Automatizzazione dei passaggi e tempi di modellazione rapidi	Modifica manuale di diversi parametri senza la possibilità di velocizzare i processi uniformando i dati uguali, con conseguente rallentamento delle diverse fasi di modellazione		

Figura 60. Benchmark

3.3 Valutazione della performance delle piattaforme software

La valutazione della performance dei software è stata effettuata, oltre che in modo qualitativo, anche in modo più schematico e quantitativo. Sono stati stabiliti dei criteri di valutazione, suddivisi in sottocriteri. Ogni sottocriterio è stato seguito dal corrispondente valore e da una valutazione in una scala crescente da 1 a 5. Le valutazioni parziali poi sono state sommate in modo da avere un punteggio finale e poter avere un'idea delle performance di ogni programma. I risultati sono riportati in Tabella 11.

CRITERI	SOTTOCRITERI	VALORI		VALUTAZIONI			
		ArcGIS	RockWorks	Novapoint	ArcGIS	RockWorks	Novapoint
	Tempo formattazione dati per import	30 min	30 min	3 h	5	5	2
Tempo	Tempo modellazione stratigrafia	-	15 min	1 h	1	5	3
	Tempo attribuzione informazioni	-	-	1 h	1	1	3
Ventaglio di possibilità per	Nr. Formati utili in import	1	1	3	2	2	4
l'interoperabilità	Nr. Formati utili in export	0	1	2	1	2	4
Visualizzaziona	Visualizzazione boreholes	2D	3D	1D	2	5	1
grafica	Visualizzazione 3D Model	NO	SI	SI	1	3	4
	Attributi aggiuntivi	NO	NO	SI	1	1	5
	Nr. di possibili modifiche medie per ogni comando	0	1	4	1	2	4
Customizzazione delle task	Personalizzazione del modello stratigrafico (variazione colori, aggiunta attributi, ecc)	0%	30%	70%	1	2	4
Punteggio Totale					16	28	34

Tabella 11. Valutazione della performance delle piattaforme software

Preme sottolineare che i parametri per la valutazione della performance dei software sono stati scelti in relazione alle funzionalità testate per gli scopi di questo lavoro di tesi, non si intende quindi dare una valutazione generale dei programmi.

CAPITOLO 4. Risultati

4.1 Modellazione

Giunti a conclusione del lavoro di tesi, uno dei risultati principali è stato quello di ottenere un modello digitale informativo della stratigrafia del sottosuolo del Lotto 3 dell'area di costruzione del Palazzo della Regione Piemonte, correlato dalle informazioni che si volevano rendere reperibili anche in futuro nel progetto. È stato inoltre ricavato il volume di scavo, visualizzandolo anche in 3 dimensioni. Tale modellazione è stata poi completata con gli altri modelli relativi all'area di studio, fornendo un modello federato multidisciplinare.

4.1.1 Stratigrafia

Come visto nel capitolo precedente, la modellazione della stratigrafia è stata completata su Novapoint passando attraverso la creazione delle superfici alla base degli strati di terreno considerati, dei volumi intermedi, completando infine il modello con l'importazione dei fori di sondaggio generati su RockWorks. Il modello completo è riportato in Figura 61, mentre in Figura 62 e Figura 63 si riportano rispettivamente il modello delle sole superfici e quello della ground surface con i boreholes.



Figura 61. Modello della stratigrafia del Lotto 3 in Novapoint



Figura 62. Modello delle superfici stratigrafiche del Lotto 3 in Novapoint



Figura 63. Modello della superfice topografica e dei boreholes del Lotto 3 in Novapoint

Si noti che nel modello vi sono delle discontinuità, tuttavia bisogna tenere in conto che tale modello è una schematizzazione e non va inteso come una replica della realtà, ma serve per avere delle informazioni generali sugli strati di terreno presenti, sulla loro distribuzione e sui loro attributi. Esso infatti risulta utile per lo scopo generale di fare interagire tale modello geotecnico con quello generale.

Vengono riportate in Figura 64, Figura 65 e Figura 66 anche tre long sections, ma nella visualizzazione delle quali si riscontra una criticità, ossia non vengono visualizzate le superfici (che quindi aiuterebbero in un'individuazione dei materiali) e si è potuto dividere cromaticamente i volumi solo in Cut (marrone) e Fill (azzurro).



Figura 64. Long section 1



4.1.2 Interazione del modello geotecnico con gli scavi

Per la modellazione degli scavi non c'è un comando specifico, ma, come fatto per gli strati di terreno, si è adottato un procedimento sostitutivo che facesse giungere al risultato desiderato.

Avendo importato la Torre, si aveva a disposizione il volume della base inferiore, un parallelepipedo che comprende una corte interrata. Sono stati disegnati otto punti con il comando Draw Object e scegliendo come feature "SupportedExcavationAnalysisResult" (*Modelling* \rightarrow *Draw Object* \rightarrow *Result feature* \rightarrow *SupportedExcavationAnalysisResult* \rightarrow *Point*). I primi quattro punti sono i quattro spigoli del rettangolo della base superiore, i quattro successivi quelli della base inferiore. Tali punti sono stati poi spostati in pianta per avere delle dimensioni maggiori di quelle del solido reale, in quanto il volume scavato è maggiore di quello della struttura (*Point Escavation* \rightarrow *tasto destro del mouse* \rightarrow *Edit task* \rightarrow *Draw Object (Edit)*). Infine, sia i punti superiori che quelli inferiori sono stati raccordati in superfici con la task Subsurface. È stato poi generato il volume tra i due, il quale è appunto il volume di scavo.



Figura 67. Modellazione del volume di scavo in Novapoint

Oltre a visualizzarlo in 3 dimensioni, è anche possibile avere un dato indicativo sui m³ da estrarre (in questo caso approssimativamente 200000 m³), il quale può essere un'informazione utile in fase di programmazione dei lavori (Figura 68).



Figura 68. Tabella con il valore del volume di scavo

Si riporta infine il modello dello scavo in relazione alla Torre (Figura 69) e alla superficie topografica (Figura 70).



Figura 69. Interazione tra scavi e Torre



Figura 70. Interazione tra scavi, ground surface e Torre

4.1.3 Modello federato multidisciplinare

Dopo la creazione del modello stratigrafico, quest'ultimo è stato completato importando il modello strutturale del grattacielo (modellato su Revit) ed i modelli dei lotti 1 e 2 (creati su Civil 3D ed importati con il Civil 3D Connector). Si ha così a disposizione un modello federato multidisciplinare, che va a coprire diversi ambiti progettuali. Proprio questo costituisce un punto di forza di Novapoint, in quanto è in grado di importare modelli provenienti da diversi software mantenendo gli attributi e le geometrie dei diversi elementi. Il modello completo di tutte le sue parti è riportato in Figura 71, mentre in Figura 72 e Figura 73 si riporta solo il modello stratigrafico dei lotti 1, 2 e 3, nel primo caso completo, nel secondo inclusivo solo di ground surface (visualizzata in modalità sketch) e boreholes.



Figura 72. Modello stratigrafico dei Lotti 1, 2 e 3 in Novapoint



Figura 73. Ground surface e boreholes di Lotto 1, 2 e 3 in Novapoint

4.2 Data Repository

Uno degli scopi fondamentali del presente lavoro di tesi è stato quello di depositare tutte le informazioni di progetto all'interno di un unico ambiente di lavoro, per la definizione di un database che contenesse le informazioni relative al manufatto in oggetto. Si hanno a disposizione infatti tutti dati relativi ai diversi ambiti progettuali dell'opera studiata.

Oltre ad avere nel software gli attributi degli elementi dei modelli, con lo scopo di completare il progetto ed attribuirgli quante più informazioni possibili, è stato aggiunto un file Excel con tutti i risultati delle prove geotecniche (relativo a Tabella 4, Tabella 5 e Tabella 6). Novapoint infatti è in grado di caricare dei file esterni (fino ad un massimo di 20 file e 30 MB per progetto), che poi possono essere scaricati e condivisi. Essendo test relativi ai fori di sondaggio, l'ideale sarebbe stato attribuire il file ai boreholes, ma questa funzione non è garantita per le importazioni, pertanto lo si è associato alla superficie dell'area principale. Una volta assegnato alla task (*Surface* \rightarrow *tasto destro del mouse* \rightarrow *Edit task* \rightarrow *Documentation* \rightarrow *Add*), il file .xlsx diventa un "Attachment", viene visualizzato nelle propriet della superficie (Figura 74) e può essere consultato in qualsiasi momento.

Properties 👻 🕂 🕇			
a Modelling Ground	✓ Interview → Details ▼		
General	^		
Name	Surface		
Description			
Туре	Modelling Ground		
Creation Date	07/11/2019 12:20		
Last Execution Time	02/12/2019 23:04		
Subtask of	201 GROUND SURFACE		
Model	Prova Punti Autocad		
Sequence Number	0		
Predecessors	Import BH_ST16.dwg, I		
Successors			
Attachments	1		
	Prove boreholes.xlsx		
Version	1.20		

Figura 74. Attachment del file .xlsx delle prove geotecniche in Novapoint

CAPITOLO 5. Conclusioni

Come visto nella parte introduttiva, le metodologie per la creazione di un modello Geo-BIM attualmente sono limitate e non vi sono molti studi a riguardo. Nel presente lavoro di tesi sono stati analizzati alcuni processi, mirati a trovare una possibile soluzione al problema, cercando di integrare l'ambito geotecnico nel mondo BIM. Partendo da un caso studio reale, ossia la creazione del modello stratigrafico della Regione Piemonte di Torino avendo a disposizione i dati relativi ai fori di sondaggio dell'area, sono stati testati diversi software, verificandone l'interazione con il metodo BIM.

I test si sono basati su prove di importazione dei dati, visualizzazione e creazione del modello ed esportazione dello stesso. Come primo risultato si è ottenuto quindi un benchmark dei diversi software (ArcGIS, RockWorks e Novapoint) e delle relative proprietà, criticità e possibilità offerte in questa direzione da ognuno di essi. In questo frangente si è riscontrato che, con gli strumenti attualmente a disposizione, ArcGIS non può usato per la modellazione, ma le sue potenzialità si fermano all'importazione e parziale visualizzazione dei dati geologici, pertanto può essere sfruttato solo per un'eventuale interazione dei boreholes georeferenziati con dati di rilievo geomatico. RockWorks, invece, consente un'agevole ed intuitiva creazione del modello stratigrafico e, seppur con qualche limitazione, consente l'esportazione BIM-oriented. Tuttavia, vengono riscontrate delle criticità per stratigrafie complesse come quelle del caso studio trattato. Rimane in ogni caso un ottimo software per la visualizzazione 3D delle stratigrafie dei boreholes e per il posizionamento spaziale degli stessi. Novapoint, infine, è gia un sofware BIM-based, ma sia in import che in export collabora con altri software sia BIM che non. Non è predisposto per la modellazione geotecnica, ma si è sviluppato un metodo per raggiungere questo scopo, grazie alla possibilità di personalizzarne le task. Quest'ultimo è insieme uno dei punti di forza e una delle maggiori criticità del programma, in quanto la customizzazione dei comandi risulta spesso di non facile utilizzo. Un'ulteriore criticità è la visualizzazione talvolta troppo uniforme dei dati, senza distinzione di colore tra i diversi elementi, rendendo più difficile l'interpretazione visiva delle informazioni.

Per gli scopi preposti il software più idoneo è risultato dunque Novapoint, grazie al quale è stata modellata la stratigrafia del sottosuolo della Torre. Il modello ottenuto non pretende di essere fedele alla realtà, ma va osservato con spirito critico, interpretandolo e tenendo sempre presenti tutti i limiti che un software non specificatamente geotecnico può avere. Lo scopo principale infatti è quello di

avere delle informazioni generali sulla stratigrafia e sulle caratteristiche ad essa relative, ma questo metodo non sostituisce il progettista nelle sue analisi. Il dato più importante di riferimento per le informazioni rimangono i boreholes, la cui successione di materiali rimane fedele alle analisi del geologo.

Dopo aver creato il modello, è stato ricavato il volume di scavo, che tuttavia non interagisce bene con la stratigrafia, in quanto il software non consente di creare un vuoto nel terreno, quindi il risultato non appare ottimale soprattutto a livello di visualizzazione.

È stato poi realizzato un modello federato multidisciplinare, riuscendo ad importare in diversi tipi di formati, il modello strutturale della Torre e i modelli dei lotti adiacenti a quello analizzato. In questo caso il software reagisce bene, importando non solo le geometrie ma anche gli attributi degli elementi assegnati ai modelli in altri software. Questo aspetto è stato fondamentale per l'ultimo step, ossia per la fase di repository. È stato possibile infatti avere in un unico software tutti i dati che si hanno a disposizione finora per il caso studio, i quali diventano così consultabili e aggiornabili in qualsiasi fase della vita dell'opera, nel pieno dello spirito della metodologia BIM.

Ci si auspica che in futuro sia il settore della ricerca che le software house continuino a percorrere la strada dell'interoperabilità Geo-BIM, affinché la Geotecnica contribuisca sempre più alla rivoluzione progettuale che il BIM ha già cominciato nell'ambito delle costruzioni edili e civili.

Bibliografia

Azaronak N. (2015): *Building 3D models from geotechnical data*, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm (Sweden).

Di Luggo A. et al. (2017): Territori e frontiere della rappresentazione. Atti del 39° Convegno Internazionale dei docenti delle discipline della rappresentazione, XIV Congresso UID, Napoli.

De Conciliis L. (2018): *BIM per le opere in sotterraneo. Approccio metodologico alla modellazione strutturale: la stazione Italia '61*, Politecnico di Torino, Torino.

Dettori C. (2018): *BIM per le opere in sotterraneo. Approccio metodologico alla modellazione strutturale: la stazione Italia '61*, Politecnico di Torino, Torino.

Fjeldsted E. et al (2016): Visualizing Boreholes in 3D Using GIS, Università dello Utah (USA).

Lauro G. (2017): *BIM: analisi del formato ifc e ottimizzazione della gestione dei dati al fine del code checking strutturale. Caso studio: Palazzo della Regione Piemonte, Torino,* Politecnico di Torino, Torino.

Le Cause G. (2019): La modellazione di dettaglio con il BIM Il caso studio della Torre Regione *Piemonte*, Politecnico di Torino, Torino.

Morabito A. (2019): Sviluppo di standard finalizzati al processo di modellazione e gestione dei dati attraverso la metodologia BIM. Caso studio: Torre Regione Piemonte, Politecnico di Torino, Torino.

Osello A. (2012): *Il futuro del disegno con il BIM per ingegneri e architetti*, Dario Flaccovio Editore, Torino.

Quattrocchi A. (2019): *BIM per il Construction Management Modellazione parametrica e gestione dei dati con il BIM orientato al Construction Management Il caso studio: Torre Regione Piemonte*, Politecnico di Torino, Torino.

Regione Piemonte (2008): *Nuovo palazzo per uffici Regione Piemonte - lotto 3, Progetto Definitivo, Relazione geotecnica*, Torino.

Regione Piemonte (2008): *Nuovo palazzo per uffici Regione Piemonte - lotto 3, Progetto Preliminare, Relazione geotecnica*, Torino.

Kavoura K. et al. (2016): 3D Subsurface geological modeling using GIS, remote sensing and boreholes data, University of Patras, Greece

Sitografia

BIM e interoperabilità, https://www.str.it/magazine-edilizia/bim/interoperabilita

Bim, l'ultima frontiera della progettazione integrata, <u>https://www.youbuildweb.it/2017/09/29/bim-progettazione-integrata/</u>

Geotecnica: come classificare un terreno, www.intrageo.it

La progettazione strutturale nello scenario Open BIM, <u>https://www.ingenio-web.it/23841-la-progettazione-strutturale-nello-scenario-open-bim</u>

L'integrazione tra GIS e BIM trasformerà il modo di progettare e costruire le infrastrutture, https://www.autodesk.it/redshift/integrazione-gis-e-bim/

Ringraziamenti

Alla fine del mio percorso di tesi, desidero ringraziare quanti mi hanno aiutato in questi mesi di lavoro: a loro va la mia gratitudine, ma spetta a me la responsabilità per ogni errore in essa contenuto.

Ringrazio, anzitutto, la Prof. ssa Anna Osello, Relatrice, per avermi fatto scoprire il mondo del BIM, per avermi aperto le porte del Laboratorio DrawingTOthefuture, dove è stato semplice sentirsi a casa, e perché in questi mesi ha rappresentato un modello forte di ingegnere donna che è stato per me fonte di ispirazione.

Un sentito ringraziamento è riservato alla Dott. ssa Arianna Fonsati, Correlatrice, per la disponibilità, la pazienza e la gentilezza con le quali ha seguito ogni passo del percorso di tesi. Il sostegno fornito, sia a livello professionale che umano, è stato fondamentale per giungere alla fine di questo lavoro.

Desidero ringraziare il Prof. Renato Maria Cosentini, Correlatore, per il prezioso supporto fornito nel corso del lavoro di tesi riguardo gli aspetti geotecnici del progetto.

Un doveroso ringraziamento va alla Regione Piemonte, per aver messo a disposizione le Relazioni Tecniche e tutti i dati geotecnici necessari a sviluppare il caso studio.

Vorrei ringraziare, inoltre, l'azienda Harpaceas, nella persona dell'Ing. Roberto Redaelli, per avermi fornito, sempre con la massima disponibilità, assistenza e supporto nell'utilizzo del software Novapoint.

In un lavoro di tesi, il supporto tecnico è fondamentale, ma altrettanto prezioso è l'incoraggiamento delle persone care, pertanto desidero aggiungere ancora degli importanti ringraziamenti.

Il mio più sentito grazie va alla mia famiglia, senza la quale tutto questo non sarebbe stato possibile. Devo a loro tutto ciò che sono e tutto ciò che ho raggiunto: questo non è il mio, ma il *nostro* traguardo. Grazie mamma, per aver condiviso con me ogni momento, da quelli di più totale sconforto a quelli pieni di soddisfazioni, per aver trasformato le nostre lunghe telefonate mattutine in momenti in cui la distanza non esisteva e potevo sentire il tuo amore più forte che mai. Grazie papà, per aver sempre creduto in me e per tutti i sacrifici che hai fatto per consentirmi di avere il futuro che hai sempre sognato per me. Grazie alla mia sister, Marta, per aver sempre trovato il modo di farmi ridere anche nei momenti no, per la spensieratezza e la forza che sei sempre riuscita a trasmettermi anche solo con un messaggio o una telefonata, perché sei una delle poche persone al mondo che riesce a capirmi in ogni mio stato d'animo. Grazie nonna Rita, per l'amore e la dolcezza con il quale mi hai sempre incoraggiata e capita, da quando ero piccola ad oggi, per l'esempio di donna forte che sei sempre stata per me. Grazie nonno Michele, sento sempre la tua forza dentro di me, so che continui a proteggermi.

Un immenso grazie è per il mio amore, Luigi. Grazie perché da quando sei entrato nella mia vita sei riuscito a farmi riscoprire una forza d'animo che non pensavo più di avere. Grazie per le serate di studio intenso in cui abbiamo combattuto insieme sonno e stanchezza. Grazie per tutte le volte che hai inventato mille modi per farmi ridere quando credevo di non farcela. Grazie per ogni momento stupendo trascorso insieme, per le scelte condivise, per l'amore sconfinato che ci regaliamo ogni giorno. Arrivare insieme a questo traguardo è la cosa più bella che potesse succederci, ma ancora più bello sarà continuare a costruire insieme il nostro futuro.

Un sincero grazie a Tina, Vittorio, Maria Nunzia, Francesca e Nunzio, una famiglia stupenda che mi ha fatto sentire a casa, che mi ha sempre incoraggiata in tutti i momenti difficili e che ha condiviso le gioie di questo percorso.

Un ringraziamento speciale va alla mia amica Serena, che da anni ormai è uno dei pilastri della mia vita. Grazie per la tua presenza costante e mai scontata, per tutti i momenti in cui mi sei stata vicina, mi hai sostenuta e hai creduto in me. Grazie per aver provato a capire di cosa parlasse la mia tesi nonostante sembrasse arabo, pur di essere parte di questa avventura.

Grazie, infine, a tutti gli amici che hanno reso speciale questo percorso, dalle amiche storiche che mi hanno fatto sentire la loro vicinanza anche da lontano (Claudia, Giulia, Valentina parlo proprio di voi!), alle persone che ho conosciuto a Torino nel corso di questi anni, che non mi hanno mai fatto sentire sola e che mi hanno dimostrato amicizia e affetto (senza di voi non sarebbe stata la stessa cosa!).

"In silentio et in spe erit fortituto vestra" - Nel silenzio e nell'attesa voi sarete forti - (Is 30,15.)

Torino, 16 dicembre 2019.

Chiara Tundo