POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

Studio comparativo *as-design – as built* su tempi e costi di realizzazione di una linea ferroviaria esistente: focus sull'interoperabilità tra software in chiave 4D e 5D

Relatore
prof. ing. Marco Bassani

Co-Relatore
ing. Riccardo Taglioli

Candidati
James Franco
matr.: 233024

Mattia Vitolo
matr.: 226716

2019

Indice

Abstract **9**

1. Concetti chiave del *Building Information Modeling* **11**

1.1 BIM: innovazione e dinamismo progettuale 11

1.1.1 Vantaggi del BIM: chiarezza di informazioni e accessibilità nel tempo 13

1.1.2 Esempio grafico dei vantaggi del BIM: curva di MacLeamy 15

1.1.3 Livelli di maturità del BIM 16

1.2 Normativa italiana sul BIM 18

1.3 Metodologia BIM: concetti chiave 21

1.3.1 Interoperabilità 21

1.3.2 Livelli di dettaglio (LOD) 23

1.3.3 Common Data Environment (CDE) 24

1.4 Descrizione dei software utilizzati 27

2. Caso studio **31**

2.1 La ferrovia *Shah Habshan* 32

2.2 Focus sul tratto GMB 35

2.2.1 La geologia del territorio: Sabkha Areas 35

2.2.2 Scelte progettuali dettate da considerazioni di contesto 36

2.2.3 Sede ferroviaria: Sezione tipo 37

3. Modellazione con OpenRail Designer (Bentley®) **39**

3.1 Modellazione del terreno 40

3.2 Modellazione della Mainline (CF06) 43

3.2.1 Creazione del tracciato planimetrico in ORD 43

3.2.2 Creazione del profilo altimetrico in ORD 44

3.2.3 Creazione della sezione tipo con OpenRail Designer 46

3.3 Modellazione del sovrappasso ferroviario (OBR05) 52

3.3.1 Creazione del profilo plano-altimetrico del sovrappasso ferroviario 52

3.3.2 Creazione delle sezioni tipo del sovrappasso ferroviario 53

3.3.3 Creazione modello 3D del sovrappasso ferroviario (OBR05) 56

3.4 Federazione dei modelli con Navisworks 57

3.4.1 Importazione del modello Al Gharbia Mainline (GMB) 58

3.4.2 Importazione dell'OverBridge 60
3.4.3 Unione dei modelli: Clash Detective 61
4. Analisi *as design*: calcolo tempi (4D) e costi (5D) 62
4.1 Il CESMM 4: obiettivo e metodologia 62
4.1.1 Utilizzo del CESMM 4 per la costruzione di un database 66
4.1.2 WBS: Embankment CF06 (EMB06) 68
4.1.3 WBS: Opera d'arte dell'Overbridge (OBR05) 74
4.1.4 WBS: Rampe dell'Overbridge (OBR05) 80
4.2 Produzione oraria 85
4.2.1 Produzione oraria Pala 950M 86
4.2.2 Produzione oraria del Rullo CAT CS56 88
4.2.3 Produzione oraria del Dozer D8T 89
4.2.4 Produzione oraria del Grader 14M3 91
4.2.1 Produzione oraria Escavatore Komatsu PC400LC-6 91
4.3 Analisi 5D: costi riferiti alle voci earthworks e trackworks 92
4.3.1 Earthworks 93
4.3.2 Trackworks 94
5. Simulazione 4D e 5D in Navisworks 95
5.1 Simulazione della costruzione dell'opera 95
6. Risultati ottenuti 102
6.1 Comparazione 4D as designed – as built 102
6.1.1 Tempistiche reperite dalle documentazioni 102
6.1.2 Confronto tra le produzioni orarie *as designed – as built* 103
6.1.3 Confronto *as designed – as built* sui tempi di costruzione 106
6.2 Comparazione 5D as designed – as built 109
6.2.1 Costi di costruzione del rilevato (Earthworks) 110
6.2.2 Costi della sovrastruttura ferroviaria (Trackworks) 111
7. Conclusioni 114
Bibliografia e sitografia 117
Allegati: 119

Indice delle figure

Fig. 1: Confronto tra metodo tradizionale e metodologia BIM [1] 11
Fig. 2: Processo BIM che abbraccia l'intero ciclo di vita di un'opera [2] 13
Fig. 3: Curva di MacLeamy (2004) 15
Fig. 4: *Maturity levels* del BIM, Bew-Richards (2008) 16
Fig. 5: Obbligatorietà del BIM in Italia secondo le imposizioni del D.M. 560/2017 18
Fig. 6: Nuove figure professionali introdotte dalla Norma UNI 11337 – parte 5 [4] 19
Fig. 7: Logo BuildingSMART, ideatrice dello standard IFC 22
Fig. 8: Confronto normative sui *Livelli di dettaglio.* 23
Fig. 9: Struttura schematica del *CDE* [8] 24
Fig. 10: Esempio di workflow generato con BIM 360: One step approval 25
Fig. 11: Schema organizzativo dell'*ACDat* 26
Fig. 12: Visualizzazione del modello. Interfaccia OpenRail Designer 27
Fig. 13: Planimetria dell'OBR05 (Saipem S.p.A.) 28
Fig. 14: Processo di federazione di un modello 30
Fig. 15: UAE Railway network map (Saipem S.p.A.) 32
Fig. 16: Stage 1: Tratto RWS (Saipem S.p.A.) 33
Fig. 17: Stage 1: Tratto GMB (Saipem S.p.A.) 33
Fig. 18: Stage 1: Tratto SHA (Saipem S.p.A.) 34
Fig. 19: Schema delle ferrovie realizzate e da realizzarsi nel *Gulf Cooperation Council* (Saipem S.p.A.) 34
Fig. 20: Geologia degli Emirati Arabi Uniti con indicazione della ferrovia (in verde) [10] 35
Fig. 21: Sezione tipo dell'armamento ferroviario. Dal basso: strato inferiore della massicciata (*bottom ballast*); traverse in c.a.p. (*sleepers*); rotaie (*rails*); spalle della massicciata (*shoulders)*. Fonte: Saipem S.p.a. 37
Fig. 22: Dimensioni traversine in cemento armato precompresso 38
Fig. 23: Sezione tipo, tratto in rilevato (Saipem S.p.A.) 38
Fig. 24: Modello 3D della ferrovia 39
Fig. 25: Triangulated Irregular Network (TIN) [11] 40
Fig. 26: Linee e punti geo-referenziati nei pressi del sovrappasso ferroviario (OBR05) 41
Fig. 27: Schermata di impostazione dei filtri grafici 41
Fig. 28: Modello 3D del terreno nei pressi dell'OBR05 42
Fig. 29: Modello 3D dell'intero tratto GMB rappresentato dalla linea di contorno 42
Fig. 30: Linee di costruzione con il comando *Spiral-Arc-Spiral* 43
Fig. 31: Differenza di triangolazione tra OpenRail Designer ed AutoCAD 45

Fig. 32: Profilo longitudinale ottenuto unendo linee e raccordi parabolici 45
Fig. 33: *Template section* in ORD: focus sovrastruttura 46
Fig. 34: Impostazione dei vincoli (*Point Properties*) : pendenze trasversali 47
Fig. 35: Comandi di visualizzazione in ORD: spegnimento dei componenti 48
Fig. 36: Esempio applicativo di una *End Condition*..... 49
Fig. 37: Sezione in scavo: focus sulla visualizzazione dei componenti 49
Fig. 38: Modello 3D della ferrovia..... 50
Fig. 39: Adeguamento della *template section* al di sotto del sovrappasso ferroviario (OBR05) ... 50
Fig. 40: Opera d'arte geo-referenziata rispetto ai due assi plano-altimetrici 51
Fig. 41: Abachi di progetto (DM. N.6792/2001)..... 52
Fig. 42: Profilo Altimetrico OBR05 53
Fig. 43: Sezione Tipo in rilevato Semplice in Open Rail Designer 54
Fig. 44: Sezione Tipo in con pannelli per la terra armata. 55
Fig. 45: Sezione tipo nel sovrappasso. 55
Fig. 46: Modello dell'overbridge OBR05 56
Fig. 47: Modello della main line visualizzato in Navisworks 59
Fig. 48: Modello federato Main Line e OverBridge..... 60
Fig. 49: Esempio di *Clash detection* tra rilevato tronco-conico e recinzione ferrovia 61
Fig. 50: Suddivisione in classi del CESMM 4 63
Fig. 51 Classe H, calcestruzzo prefabbricato. Scheda fornita dal CESMM 4 64
Fig. 52: Site Clearance. Focus sulle Definition rules 65
Fig. 53 Particolare costruttivo della sezione: strati costitutivi del rilevato 70
Fig. 54 Schema di prove in situ per il tracciato GMB relative al *subgrade* e *subballast*..... 71
Fig. 55: WBS Rilevato: schema descrittivo a livelli e codifica CESMM 4 73
Fig. 56: Volume di terreno influenzato dall'opera[9] 74
Fig. 57: Schema tipo dell'elemento strutturale [12]..... 76
Fig. 58: completamento del fusto mediante paraghiaia [12] 77
Fig. 59: WBS OBR05 Opera d'arte: schema descrittivo a livelli e codifica CESMM 4 79
Fig. 60: Immagine rampa OBR05 (Google Heart) 80
Fig. 61: Rappresentazione grafica di una terra armata [13] 81
Fig. 62: Vibrofinitrice CAT AP655F [14]..... 82
Fig. 63: Rappresentazione grafica della composizione della strada sul sovrappasso [15] 83
Fig. 64: WBS OBR05 Rampe: schema descrittivo a livelli e codifica CESMM 4 84
Fig. 65: Manovre di lavoro Pala Caricatrice CAT 950M [16] 86
Fig. 66: Produzione oraria da Handbook Performance Caterpillar [17]..... 89

Fig. 67: Creazione di *set* in Navisworks 96
Fig. 68: Esempio di associazione tra gruppi e componenti del modello effettuato in Navisworks 96
Fig. 69: Estratto di foglio di calcolo redatto con Excel 97
Fig. 70: Formati di importazione supportati da Navisworks 97
Fig. 71: Associazione tra componenti dei *set* ed Excel 98
Fig. 72: Stralcio di calcolo tempi e costi parziali. 99
Fig. 73: Visualizzazione dei codici CESMM in Navisworks 99
Fig. 74: Tempi e Costi al 5° giorno 100
Fig. 75: Tempi e Costi al 10° giorno 101
Fig. 76: Tempi e Costi al 38° giorno 101
Fig. 77 Rappresentazione grafica spazio-tempo creata con Tilos (Saipem S.p.A.) 102
Fig. 78: Confronto delle produzioni orarie delle squadre-base 105
Fig. 79: Caso Studio e realtà dopo la calibrazione 107
Fig. 80: Modifica della stringa di codice ed effetto nel modello 116

Indice delle tabelle

Tabella 1: Mezzi utilizzati per la formazione del rilevato e sovrastruttura ferroviaria. 85
Tabella 2: Costi unitari materiale/lavoro riferiti agli *Earthworks* 93
Tabella 3: Costi materiale/lavoro riferiti ai *Trackworks* 94
Tabella 4: Costo materiale/lavoro riferito alle recinzioni esterne (*fences*)..... 94
Tabella 5: Tempistiche riferite alle lavorazioni per *Earthworks* e *Trackworks* 103
Tabella 6: Squadra base per la produzione oraria con metodo analitico. 103
Tabella 7: Squadra base per la produzione oraria (Saipem S.p.A.)..... 104
Tabella 8: Composizione squadra dopo l'adattamento per un solo fronte di lavoro..... 106
Tabella 9: Costo del CF06 riferito agli *Earthworks* 110
Tabella 10: Costo del CF06 riferito ai *Trackworks* 111
Tabella 11: Costo del CF06 riferito ai alle recinzioni esterne (fences) 111
Tabella 12: Confronto tra i costi: Caso studio vs. Realtà 112
Tabella 13: Calcolo dei giorni di lavoro per la squadra-tipo inizialmente ipotizzata..... 119
Tabella 14: Calcolo del tempo necessario per la costruzione di rilevato e sovrastruttura per la squadra di lavoro ipotizzata..... 119
Tabella 15: Calcolo del tempo necessario per la costruzione di rilevato e sovrastruttura per la squadra di lavoro aggiornata 120
Tabella 16: Produttività oraria squadra base 120
Tabella 17: Calcolo della produzione oraria dei mezzi dopo la calibrazione..... 121
Tabella 18: Produzione oraria per ogni componente fornita da Saipem S.p.a 121
Tabella 19: Report delle Quantità fornite da OpenRail Designer 122
Tabella 20: Tabella per la simulazione in Navisworks..... 123

Abstract

Il presente elaborato di tesi esplora le potenzialità attualmente raggiunte dall'Infra-BIM (Building Information Modeling), attuando i concetti alla base di tale metodologia ad un'opera ferroviaria esistente.

Uno degli obbiettivi perseguiti è stato quello di verificare l'interoperabilità tra software sviluppati da diverse *software house*, simulando le fasi di progettazione secondo il BIM. Inoltre è stato effettuato un confronto tra modellazione e costruito (*as designed – as built*) con lo scopo di valutare le quantità di materiale modellate rispetto a quelle realmente utilizzate. Successivamente è stato condotto uno studio sui tempi (4D) e sui costi (5D) di realizzazione, con riferimento alla costruzione del rilevato e della sovrastruttura ferroviaria.

Il caso studio riguarda una linea ferroviaria realizzata da Saipem S.p.A, la *Shah Habshan Railway*. La ferrovia si compone di tre tratti: *Ruwais Branch* (*RWS*, 10 km), *Al Gharbia Mainline* (*GMB*, 110 km) e *Shah Branch* (*SHA*, 145 km).

A partire dalla descrizione del contesto geografico, utile alla comprensione delle scelte progettuali effettuate per la realizzazione dell'opera, la tesi concentra l'attenzione su uno dei tre tratti dell'intera linea ferroviaria, ovvero la *Al Gharbia Mainline* (GMB).

Del tratto GMB è stato considerato un segmento di estensione pari a 15 chilometri di cui si è stata eseguita la modellazione con OpenRail Designer.

A partire dai documenti di progetto, è stato ricostruito il modello tridimensionale attraverso l'andamento plano-altimetrico e le sezioni trasversali. Nello sviluppo di questa modellazione si è impostata un'ampiezza costante dell'intero corridoio ferroviario, diversamente da quanto riscontrabile nella realtà. Per quanto riguarda l'analisi sui tempi, è stata scelta una squadra di lavoro per ogni tipo di lavorazione, considerando le medesime macchine movimento terra utilizzate in fase di realizzazione. Questo ha reso lo studio più accurato possibile, permettendo di ricavare tutti i parametri necessari per il calcolo delle produzioni orarie di ogni mezzo.

Per quanto concerne i costi, si è tenuto conto della distanza geografica dalla quale i materiali di costruzione sono stati reperiti: questo aspetto ha fatto si che il costo unitario di alcuni materiali fosse notevolmente maggiorato in funzione del luogo di provenienza.

Nell'ambito della modellazione sono state effettuate alcune semplificazioni: le opere idrauliche per il convogliamento delle acque meteoriche (tombini), le interferenze elettriche e telefoniche che attraversano il rilevato e gli scambi ferroviari non sono stati infatti modellati, concentrando maggiormente l'attenzione sulle fasi di costruzione del rilevato e della sovrastruttura. Per la stima dei tempi è stata definita una squadra di macchine movimento terra sulla base delle conoscenze teoriche in possesso. Per tale motivo la composizione della squadra teorica differisce rispetto a

quella reale in quanto i mezzi di rifornimento di acqua, carburante e le lavorazioni manuali non sono stati considerati.

L'analisi sui tempi è stata incentrata sulla simulazione virtuale delle fasi di costruzione dell'opera, mentre quella sui costi è stata effettuata tramite i volumi ricavati dal modello virtuale.

L'utilizzo di software dedicati alla visualizzazione dei modelli tridimensionali e alla gestione dei relativi tempi di costruzione ha consentito di valutarne l'interoperabilità, uno degli aspetti fondamentali su cui si basa l'intera metodologia BIM.

L'interoperabilità è stata analizzata per ciò che riguarda la perdita/conservazione dei dati nel passaggio da un software all'altro. Nello specifico, sebbene sia stata conservata la geometria tridimensionale, correttamente georeferenziata, le informazioni utili per eseguire un processo totalmente automatizzato sono state perse.

Per lo studio condotto si è riscontrata mancanza di interoperabilità soprattutto tra software appartenenti a diverse *software house* evidenziando, in fase di importazione, una perdita di informazioni. Ciò si è verificato anche attraverso l'utilizzo di file nel formato "non proprietario" "ifc"; tale formato dovrebbe garantire l'interscambio di dati tra software, con la possibilità di trasferire informazioni tra tutti i software utilizzati nella progettazione.

1. Concetti chiave del *Building Information Modeling*

1.1 BIM: innovazione e dinamismo progettuale

La metodologia BIM rappresenta una delle maggiori innovazioni di recente introduzione nella progettazione edilizia e infrastrutturale.

Il BIM, acronimo di *Building Information Modeling*, è l'ultimo gradino di un percorso evolutivo che sta trasformando la progettazione architettonica, ingegneristica e impiantistica, verso un diverso modo di gestire il progetto e l'opera in tutte le sue fasi, partendo dalla sua concettualizzazione per arrivare sino alla sua gestione.

Si sta infatti assistendo al definitivo passaggio dal metodo tradizionale di progettazione, basato cioè su disegni in cui gli oggetti non contengono nessun tipo di informazione/parametro o relazione, a quello basato su una metodologia che, pur continuando a considerare il disegno al centro del processo progettuale, attribuisce agli oggetti informazioni non solo geometriche ma anche spaziali, quantitative e costitutive (in riferimento ai materiali).

La progettazione di un'opera può diventare un processo ottimizzato poiché condiviso da tutti i professionisti coinvolti. Con il BIM è ampliata la base dei contenuti dei modelli tridimensionali: tutti i soggetti hanno la possibilità di lavorare sullo stesso modello in tutte le fasi progettuali, con una ottimizzazione di tempi e costi. In passato questo aspetto era gestito attraverso riunioni periodiche e qualora fossero necessarie delle modifiche ai disegni, le variazioni dovevano essere prima concordate tra tutti e poi eseguite su ogni singolo elaborato.

Con i software *BIM - oriented* ogni modifica al progetto viene automaticamente trasferita a qualunque rappresentazione e immediatamente condivisa tra i diversi componenti del gruppo di progettazione (Fig. 1). Ciò consente di ottimizzare le risorse disponibili, ovvero tempi e costi.

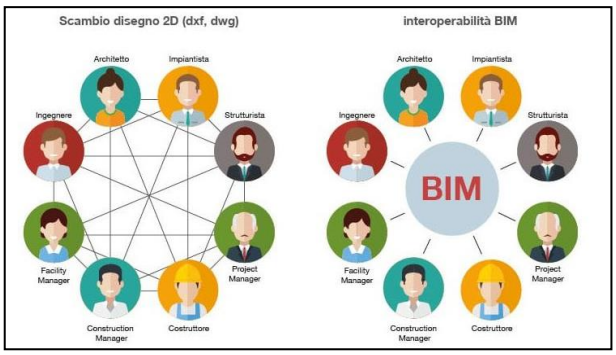

Fig. 1: Confronto tra metodo tradizionale e metodologia BIM [1]

Ottimizzare implica dunque eliminare quasi totalmente le possibili incongruenze e interferenze che possono verificarsi: infatti il BIM manager ha la possibilità di organizzare flussi di lavoro assegnando a ciascun modellatore la gestione di un singolo aspetto progettuale. Gli elaborati possono essere modificati solo dai professionisti incaricati; in seguito il materiale aggiornato può essere condiviso e consultabile dagli altri soggetti del team.

Un ulteriore aspetto positivo riguarda la possibilità di evitare che le tipiche difficoltà, che si possono potenzialmente verificare in fase esecutiva, vengano spianate sin dagli stadi preliminari del progetto, ove un più ampio ventaglio di alternative può esser preso in considerazione dal team di lavoro, potendo modificare a monte le scelte da effettuare.

Una delle prerogative della metodologia BIM è la digitalizzazione delle opere, cioè la virtuale rappresentazione di un'opera da realizzare (e di tutte le informazioni in essa contenute) prim'ancora che questa sia compiuta, valutandone sin dalle fasi preliminari tutte le caratteristiche e capire quale, tra le possibili alternative progettuali, soddisfi meglio le esigenze degli attori coinvolti.

1.1.1 Vantaggi del BIM: chiarezza di informazioni e accessibilità nel tempo

Rispetto alla metodologia progettuale tradizionale, i software *BIM based* pongono al centro del progetto l'opera e la sua rappresentazione nello spazio 3D: in essa ogni componente possiede proprietà non solo dimensionali ma anche informative, (es. i materiali costitutivi e le loro relative proprietà meccaniche), i fornitori[1], i costi, nonché le tempistiche e le fasi di lavorazione da rispettare per la messa in opera dei componenti stessi.

Da ciò scaturiscono altri vantaggi: (i) si possono analizzare un maggior numero di proposte; (ii) il monitoraggio dei costi di realizzazione nell'intero *ciclo di vita*[2] dell'opera (Fig. 2); (iii) si possono programmare meglio gli interventi di gestione o dismissione della medesima opera.

La possibilità di immagazzinare le informazioni in un database è un ulteriore vantaggio di cui i soggetti coinvolti nel *facility management* possono beneficiare.

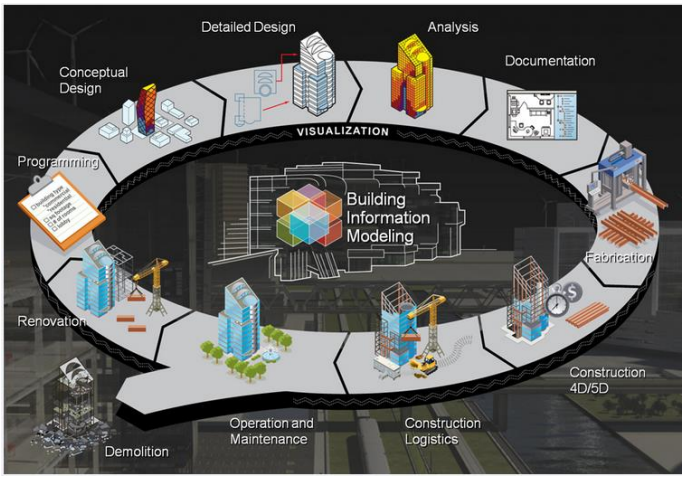

Fig. 2: Processo BIM che abbraccia l'intero ciclo di vita di un'opera [2]

La chiarezza delle informazioni è un altro aspetto di rilievo che si traduce in una visualizzazione più dettagliata delle proposte, accompagnata comunque dalla possibilità di poter estrarre, a partire dal modello tridimensionale, tutti gli elaborati 2D necessari, quali ad esempio piante e sezioni, la cui importanza resta in ogni modo immutata rispetto al passato e il cui apporto imprescindibile.

---

[1] I fornitori possono essere inseriti solo a partire dal progetto costruttivo altrimenti è reato.

[2] Per "ciclo di vita" si intendono "tutte le fasi consecutive o interconnesse, compresi la ricerca e lo sviluppo da realizzare, la produzione, gli scambi e le relative condizioni, il trasporto, l'utilizzazione e la manutenzione, della vita del prodotto o del lavoro o della prestazione del servizio, dall'acquisizione della materia prima o dalla generazione delle risorse fino allo smaltimento, allo smantellamento e alla fine del servizio o utilizzazione", art. 3 del D.Lgs. n.50/2016.

Il CIFE (*Centre for Integrated Facilities Engineering*) ha condotto un'indagine su diversi progetti che hanno utilizzato la metodologia BIM, riscontrando impatti estremamente positivi sotto molti punti di vista:

1. abbattimento del 40% delle modifiche non preventivate in fase di progetto (cambiamenti di budget per la realizzazione dell'opera);
2. precisione della stima dei costi reali non distanti del 3% rispetto a quelli ipotizzati;
3. riduzione fino all'80% del tempo richiesto per la formulazione di un preventivo di spesa;
4. riduzione del tempo complessivo di progetto del 7%;
5. risparmio fino al 10% del valore del contratto attraverso la *clash detection*, ossia l'analisi delle interferenze.

1.1.2 Esempio grafico dei vantaggi del BIM: curva di MacLeamy

Una rappresentazione grafica spesso utilizzata come esempio per spiegare i vantaggi scaturiti dall'uso della metodologia BIM è fornita dalla curva di MacLeamy (2004).

Patrick MacLeamy, architetto americano, è considerato uno dei principali teorici di questa metodologia basata sull'ottimizzazione del processo progettuale. Attraverso il suo grafico, infatti, è possibile comprendere come un approccio BIM consenta di migliorare il flusso di lavoro, in tutte sue fasi, incidendo positivamente sui costi che possono presentarsi a causa di variazioni progettuali.

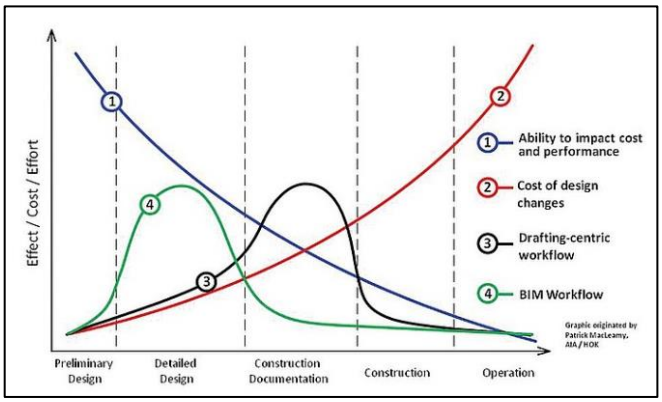

Fig. 3: Curva di MacLeamy (2004)

Analizzando il grafico riportato in Fig. 3, i metodi progettuali tradizionale (curva nera) e integrato (curva verde) vengono messi in relazione con due parabole di opposto andamento: la prima, in blu, indica l'abilità di poter incidere sui costi e sulle performance progettuali nel tempo. Andando avanti nelle diverse fasi, si osserva che le possibilità di abbattere i costi e modificare le scelte progettuali decrescono. Ciò è intuibile in quanto le decisioni da prendere e i costi da sostenere per la realizzazione di un'opera sono da stabilire negli stadi iniziali del progetto.

La curva rossa, invece, indica l'andamento dei costi apportati dalle varianti progettuali; questi sono un aspetto altamente negativo in quanto possono sorgere a causa di valutazioni erronee fatte in principio o variazioni in corso d'opera che tuttavia hanno ripercussioni sia sui costi sia sui tempi di realizzazione. Sull'asse delle ascisse sono evidenziate le successive fasi di realizzazione di un'opera, che partono dalla concettualizzazione fino alle fasi operative di costruzione della stessa.

Il grande contributo apportato dall'uso di tale metodologia non consiste nel diminuire il carico di lavoro (le due curve a campana presentano difatti caratteristiche pressoché identiche) ma contribuisce positivamente facendo "traslare" la curva totalmente a sinistra del punto di intersezione delle due parabole. Questo vuol dire che, attraverso un approccio integrato, lo sforzo progettuale si concentra nelle fasi iniziali della progettazione, incidendo positivamente sui costi

(riducendoli). Ciò che si verifica con il flusso di lavoro tradizionale è l'ultimazione e il perfezionamento del progetto nelle fasi più avanzate, con costi decisamente maggiori.

1.1.3 Livelli di maturità del BIM

Il BIM è un metodo di lavoro in continuo sviluppo basato sulla cooperazione; per tale motivo ci si può riferire a livelli di collaborazione utili a comprendere il livello di maturità raggiunto in uno specifico progetto o al *modus operandi* del team di lavoro. Il modello teorico più utilizzato per analizzare il *BIM maturity level* è quello di Bew-Richards (2008) che identifica quattro livelli del BIM in base al tipo di informazioni che si è in grado di condividere durante lo sviluppo di un progetto.

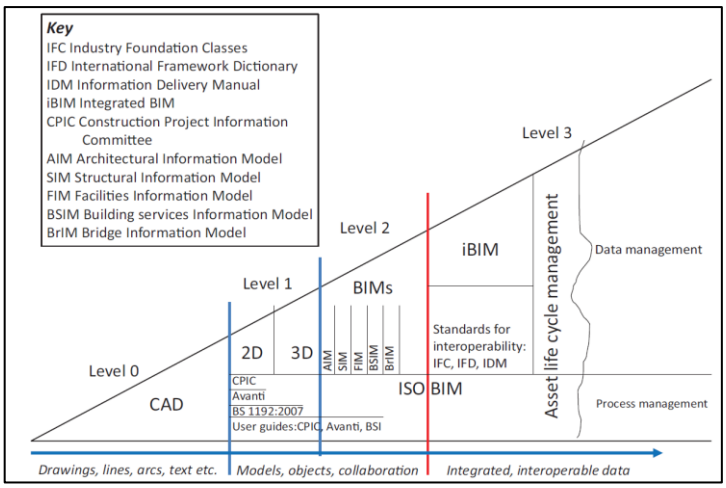

Fig. 4: *Maturity levels* del BIM, Bew-Richards (2008)

Come si osserva in Fig. 4, i quattro livelli del BIM sono:

- Livello 0: questo stadio identifica un livello di collaborazione praticamente nullo; i progettisti utilizzano e scambiano tra loro elaborati grafici che, pur essendo basati sullo stesso progetto, non interagiscono. La variazione di un aspetto progettuale si traduce pertanto in modifiche manuali da apportare in tutti gli elaborati influenzati da tale variazione;
- Livello 1: a tale ambito si attribuisce una collaborazione parziale basata sulla gestione delle informazioni relative al progetto. Prendendo come riferimento la normativa inglese BS1192:2007, in questo livello viene stabilita la metodologia per la gestione della produzione, condivisione e qualità delle informazioni costruttive, incluse quelle generate da sistemi CAD. In questo livello viene definito il *Common Data Environment* (CDE), ovvero un ambiente di condivisione online consultabile da tutti i professionisti del team, in cui è possibile reperire tutto ciò che serve per lavorare e condividere i propri elaborati. In Italia la normativa UNI 11337 definisce l'Ambiente di Condivisione Dati (ACDat)

come l'analogo del CDE. Il livello 1 ha il limite di basare la progettazione su modelli 2D o 3D che non "parlano" tra loro; il lavoro quindi si basa su più modelli non *federati*, cioè non uniti tra loro;

- Livello 2: questo livello di maturità è costituito da un processo collaborativo totale, con piena condivisione di tutte le informazioni e con piena autonomia di tutti i componenti del team. La novità sostanziale di questo livello di maturità risiede nella possibilità di produrre modelli generati dall'importazione di più file IFC al fine di ottenere un unico modello, lasciando ai soggetti coinvolti nella progettazione la possibilità di lavorare in piena autonomia, aggiornando lo stesso modello in maniera automatica. In questo livello di maturità è inoltre possibile effettuare analisi su tempi di lavorazione (4D) e sui costi (5D) per la realizzazione delle opere;
- Livello 3: questo livello rappresenta il massimo traguardo a cui questa metodologia possa ambire, dando luogo ad un approccio BIM pienamente *integrato* (iBIM). In questo stadio la progettazione è condotta lavorando su un unico modello condiviso, dove tutte le parti in gioco possono intervenire contemporaneamente lavorando in ambiente *cloud* (piattaforme web) e senza interferenze reciproche. Questo darà la possibilità di seguire tutte le fasi di realizzazione di un'opera, dalla concettualizzazione fino alla cantierizzazione.

Attualmente l'ambizione è quella di consolidare e implementare le potenzialità del livello 2; per ambire al completo sviluppo della metodologia sarà infatti necessario garantire la totale interoperabilità tra software, anche di quelli appartenenti a *software house* differenti. Questo aspetto, per come si vedrà in seguito, ad oggi non è pienamente raggiunto.

1.2 Normativa italiana sul BIM

Al di là dei numerosi benefici operativi che la metodologia BIM comporta, è la normativa ad incentivare, o comunque indirizzare, questo cambiamento, fornendo limiti e tempi entro cui è necessario utilizzare il BIM per partecipare ai bandi di gara.

Il Decreto Ministeriale n° 560 del 1° dicembre 2017, detto "Decreto BIM", si prefigura in tal senso.

"Il provvedimento indica, per appalti e concessioni, le modalità e i tempi di progressiva introduzione dell'obbligatorietà dei metodi e strumenti elettronici e disciplina gli adempimenti preliminari delle stazioni appaltanti che dovranno adottare un piano di formazione del personale, un piano di acquisizione o di manutenzione di hardware e software di gestione dei processi decisionali e informativi, e un atto organizzativo che espliciti il processo di controllo e gestione, i gestori dei dati e la gestione dei conflitti. È previsto l'utilizzo di piattaforme interoperabili a mezzo di formati aperti non proprietari da parte delle stazioni appaltanti ed è definito l'utilizzo dei dati e delle informazioni prodotte e condivise tra tutti i partecipanti al progetto, alla costruzione e alla gestione dell'intervento" [3].

La normativa italiana impone che dal 2025 sarà obbligatorio adottare tale metodologia per tutte le opere pubbliche di qualsiasi importo (Fig. 5).

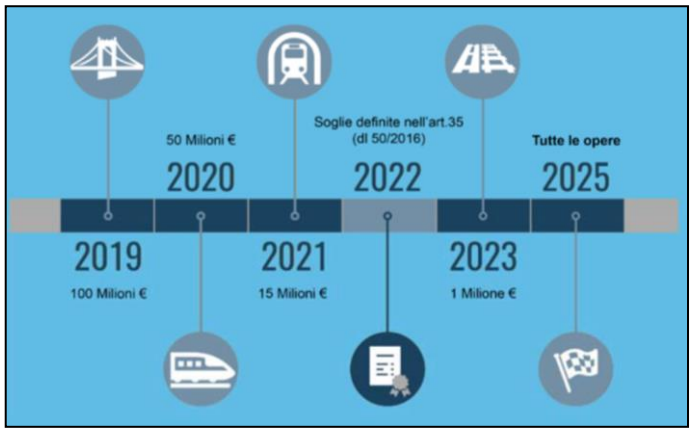

Fig. 5: Obbligatorietà del BIM in Italia secondo le imposizioni del D.M. 560/2017

Attraverso la norma UNI 11337 – 5, l'Ente Italiano di Normazione stabilisce la formazione di nuove figure professionali (come mostrato in Fig. 6) che abbiano l'incarico di gestire i flussi informativi e che siano connesse alla realizzazione di un processo digitale delle opere.

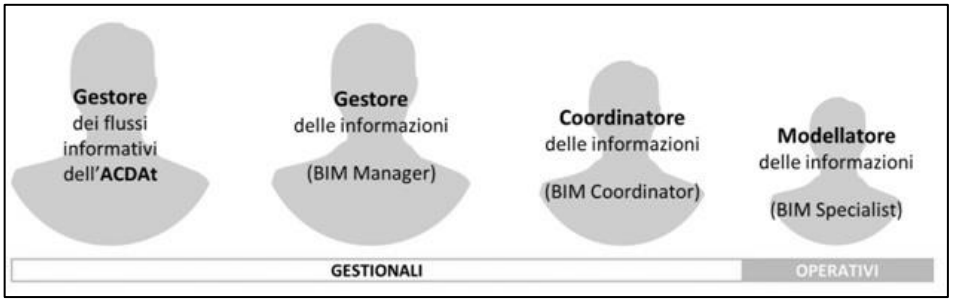

Fig. 6: Nuove figure professionali introdotte dalla Norma UNI 11337 – parte 5 [4]

A tali nuove figure professionali, cui è dedicata la norma UNI 11337 – parte 7 (13/12/2018), corrispondono le seguenti mansioni [4] di cui vengono descritte di seguito alcune peculiarità:

- Gestore dei flussi informativi dell'ACDAt[3] (meglio noto con il termine inglese di Common Data Environment): è una figura professionale che deve gestire l'Ambiente di Condivisione dei Dati, il suo utilizzo e le informazioni in esso contenute. Può collocarsi a "livello di committente" (ACDat della Stazione Appaltante o dell'organizzazione, cioè ACDat complessivo e, quindi, relativo a più interventi) oppure al livello della singola commessa, nel caso di ACDat singolo, per commessa. I suoi compiti sono [5]:

    - gestire l'ACDat;
    - relazionare i contenuti dei modelli con altri dati presenti in piattaforma;
    - controllare il processo interoperabile delle informazioni;
    - controllare la correttezza del flusso informativo e la tempestività;
    - applicare le tecniche di protezione dei dati;
    - utilizzare le tecniche di "*data analytics*";

[3] Nella sezione 1 della norma UNI 11337 viene spiegato che nel processo digitale delle costruzioni è previsto che i modelli informativi (e gli oggetti digitali che li compongono) nonché gli elaborati digitali riferiti ad una singola opera o complesso di opere, vengano raccolti in un ambiente di conservazione e condivisione dei dati che prende il nome di ACDat (Ambiente di Condivisione dei Dati).

- BIM Manager: figura responsabile dell'organizzazione, del coordinamento delle risorse e della gestione contrattualistica. È a conoscenza del livello raggiunto dai processi digitalizzati dell'organizzazione, tanto da avere la responsabilità di sovrintendere alla configurazione delle linee guida proprietarie e al loro aggiornamento tramite l'implementazione delle verifiche ispettive, ma può svolgere anche assistenza ai vertici aziendali nella determinazione delle politiche di investimento e di formazione, oltre che di reclutamento e di ricerca [6].
- BIM Coordinator: figura che controlla l'effettiva applicazione delle regole informative del processo. Il BIM Coordinator, oltre alle convenzionali attività di istruttoria, di regia e di controllo della modellazione informativa a livello di commessa, sia pure in stretta sinergia col BIM Manager, anche in termini relazionali, si preoccupa di assicurare la continuità tra ambienti di calcolo e ambienti di modellazione [6].
- BIM Specialist: rappresenta il vero e proprio modellatore del team; si occupa della realizzazione pratica dei modelli. Il *BIM Specialist* deve possedere non solo una conoscenza profonda dei software di modellazione (e di come vengono sviluppati) ma anche una adeguata padronanza della disciplina. Il suo ruolo è pertanto quello di progettista e modellatore [6].

1.3 Metodologia BIM: concetti chiave

Scopo di questa sezione è analizzare i concetti che, in termini operativi, distinguono metodologia BIM da quella tradizionale: l'interoperabilità tra software, i livelli di dettaglio (LOD) e l'ambiente di condivisione dei dati (CDE).

1.3.1 Interoperabilità

In un ambiente lavorativo multidisciplinare, caratterizzato cioè da professionisti appartenenti a diversi rami dell'Ingegneria, è necessario rendere gli elaborati accessibili e interpretabili da parte di tutti, affinché ogni componente del team di lavoro collabori in piena sintonia, organizzazione e cognizione sia delle variazioni apportate che di quelle in stato di modifica in fase progettuale.
Requisito fondamentale ed imprescindibile affinché tutto abbia buon esito è l'interoperabilità tra i software.
L'interoperabilità è la capacità di trasferire informazioni da un'applicazione all'altra senza perdita di dati, al fine di creare modelli federati 3D uguali per tutti i protagonisti del progetto con la possibilità di poterne reperire tutte le informazioni necessarie (viste, quantità, analisi, fasi, animazioni, render, simulazioni, ecc.).
Le quantità e le proprietà dei materiali devono essere estratte facilmente dal modello in qualsiasi momento, così come deve essere possibile isolare e definire determinati aspetti del progetto. Gli strumenti necessari per tale interoperabilità includono disegni, specifiche tecniche, requisiti dei materiali e altre specifiche per la qualità del risultato finale.
L'interoperabilità tra software è ad oggi garantita attraverso:

1) il diretto passaggio delle informazioni da un software all'altro, tramite software in grado di importare ed esportare file con diversi formati;
2) l'utilizzo di estensioni di file *non proprietari*, ovvero non appartenenti ad alcuna casa produttrice, ma in grado di trasferire informazioni da un software all'altro (formato IFC).

Il sistema IFC, acronimo di *Industry Foundation Classes*, è un sistema sviluppato da buildingSMART (Fig. 7), un'organizzazione internazionale il cui scopo è migliorare lo scambio di informazioni tra applicazioni software usate nell'industria delle costruzioni.

Fig. 7: Logo BuildingSMART, ideatrice dello standard IFC

L'aspetto certamente positivo di tale formato sta nel fatto che se da un lato è possibile utilizzare tutte le informazioni contenute nel progetto scambiando dati tra software e applicativi differenti, dall'altro consente ai progettisti di continuare a lavorare con gli strumenti di progettazione che gli sono più familiari.

Lo standard IFC può essere adoperato anche per sviluppare modelli BIM riproducendo gli elementi infrastrutturali mediante componenti di opere edili. Per esempio, le pile dei ponti possono essere rappresentate utilizzando IfcColumn, per le barriere stradali si può applicare invece IfcWall. L'estensione IFCAlignment è stata inserita nello standard IFC4x1, mentre in quello IFC5 saranno introdotte estensioni per strade, ponti e gallerie [7].

1.3.2 Livelli di dettaglio (LOD)

Il livello di dettaglio, dall'inglese *Level of Detail*, misura la quantità di informazioni, grafiche e non grafiche, contenute all'interno dei singoli componenti del modello.

In genere vengono stabiliti a monte della progettazione quando, in uno stadio preliminare del progetto, si decidono le parti d'opera su cui si vuole puntare maggiormente l'attenzione, o perché ritenute particolarmente importanti e quindi da definire con chiarezza sin da subito, o per altre circostanze contingenti a quelle del team di sviluppo.

La normativa italiana approfondisce questo tema nella UNI 11337 – parte 4 (Fig. 8), definendo 7 livelli di dettaglio che, a partire dalla lettera A (livello di dettaglio minimo) arrivano alla lettera G che indica un livello di dettaglio a realizzazione ultimata (*as built*). Lo standard americano indica i livelli di dettaglio attraverso una numerazione che va da 100 a 500, lasciando intuire che in futuro ci sarà un'implementazione anche di tale aspetto (LoD 600).

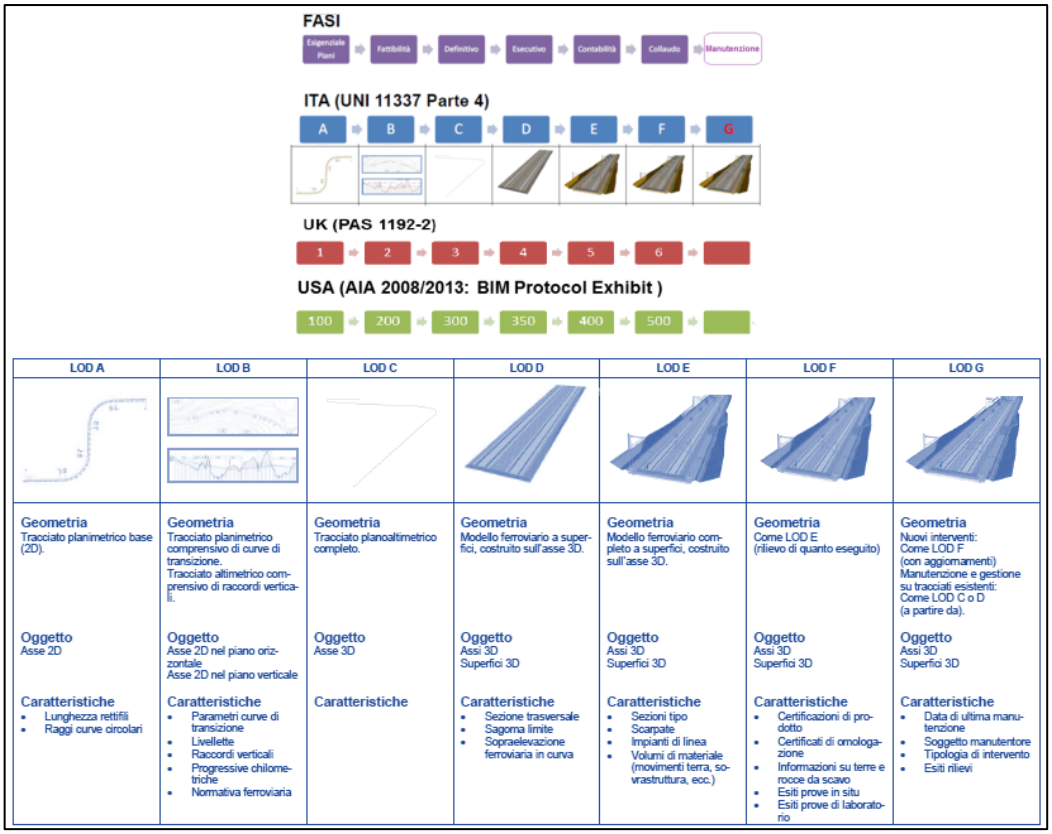

Fig. 8: Confronto normative sui *Livelli di dettaglio*.

1.3.3 Common Data Environment (CDE)

Il tema del CDE, ossia dell'ambiente di condivisione dei dati (ACDat) e dei flussi informativi, è un aspetto affrontato nella parte 5 della norma UNI 11337.
Si riportano di seguito le definizioni di CDE e di ACDat fornite rispettivamente dalle normative inglese e italiana, ossia la BS 8536 – 2 e la UNI 11337:

CDE:
«The single source of information for any given project, used to collect, manage and disseminate all relevant approved project information. Stored digitally, this is where information is shared collaboratively in a logical, accessible way to help all key parties gain access to information. This means that, firstly, information is readily accessible (using universal naming conventions) and is not duplicated, and secondly, information has both a defined purpose and owner.»

ACDat:
«L'ambiente di condivisione dei dati è un'infrastruttura digitale di raccolta e gestione organizzata delle informazioni, comprensiva della propria procedura di utilizzo, dove solo i soggetti accreditati possono condividere le informazioni prodotte secondo regole prestabilite.»
È sempre la normativa a stabilire la struttura dell'ACDat definendo quattro fasi successive, ossia di elaborazione, condivisione, pubblicazione e, infine, archiviazione, come mostrato in Fig. 9:

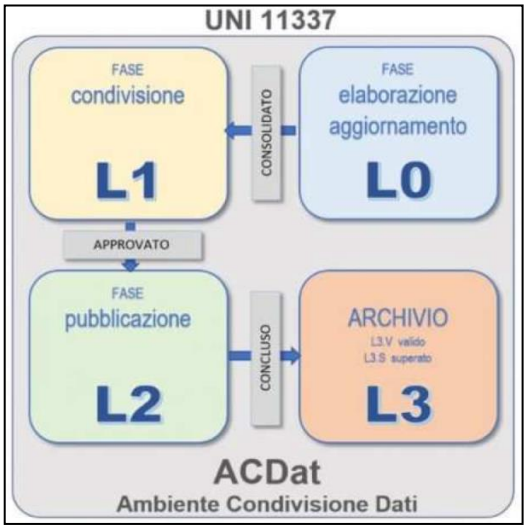

Fig. 9: Struttura schematica del *CDE* [8]

In merito all'organizzazione dell'ambiente di condivisione dei dati, si possono fare le seguenti osservazioni:

- L' area L0 rappresenta un luogo del CDE dove vengono raccolte le informazioni di progetto in elaborazione provenienti da ogni singolo team di lavoro (o soggetto del team). Questa sezione del CDE è definita *Work-in-progress* (Fig. 11) e i componenti del team di progettazione hanno la possibilità di inserire il proprio lavoro utilizzando i software aziendali;
- A seguito della revisione e approvazione di uno specifico elaborato da parte di un singolo team (es. team di strutture), il lavoro può essere condiviso con gli altri progettisti del gruppo di lavoro (es. team di infrastrutture) all'interno della *Shared Area* (L1), l'area di condivisione degli elaborati/modelli. In quest'area i modelli sono pronti ad essere coordinati con gli altri (*fit for coordination*) provenienti dalle altre discipline.

  In merito all'approvazione di un elaborato è possibile definire quanti e quali siano i soggetti responsabili dell'approvazione/revisione. In **Fig. 9** è possibile osservare uno "*One Step Approval"* generato con BIM 360, il software utilizzato per l'organizzazione del CDE per questa tesi: l'approvazione dei documenti è, in questo caso, subordinata alla verifica degli elaborati da parte di un solo componente del team preposto a tale scopo.

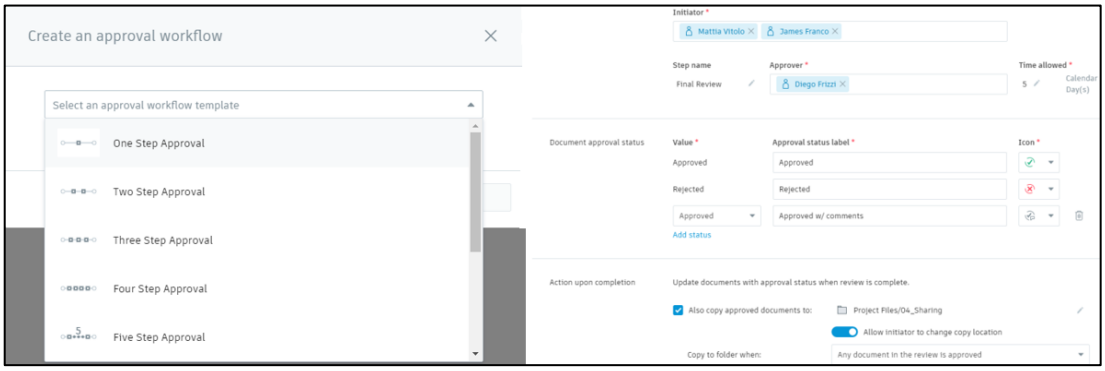

Fig. 10: Esempio di workflow generato con BIM 360: One step approval

  in questa fase si può inoltre decidere se le informazioni possono essere rese disponibili e consultabili dal cliente e dagli altri soggetti responsabili del progetto;
- Nell'area L2 avviene la <u>pubblicazione,</u> previa autorizzazione del cliente, della documentazione e dei modelli informativi, resi disponibili per le fasi successive alla progettazione;
- L'ultima fase, L3, è quella di <u>archiviazione</u> delle informazioni prodotte durante la commessa, tra cui gli elaborati e i modelli validati, approvati e non approvati.

In Fig. 11 viene mostrato uno schema del ACDat maggiormente illustrato in tutte le sue fasi:

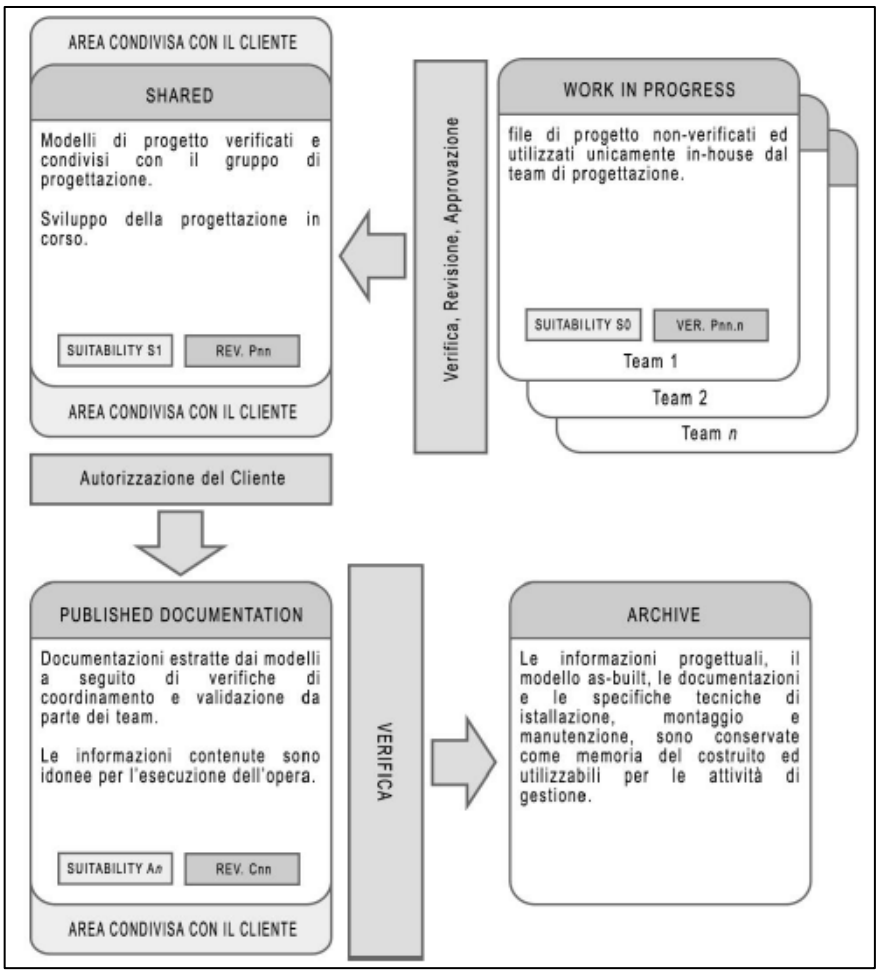

Fig. 11: Schema organizzativo dell'*ACDat*

Le caratteristiche che deve avere un ambiente di condivisione dati sono le seguenti:

- Accessibilità da parte di tutti i soggetti interessati al processo, sulla base di permessi garantiti, in funzione del ruolo ricoperto;
- Conservazione e possibilità di aggiornare nel tempo le informazioni contenute nel database;
- Tracciabilità delle revisioni effettuate sugli elaborati;
- Possibilità di scambiare dati tramite un'ampia disponibilità di formati;
- Riservatezza e sicurezza garantite.

1.4 Descrizione dei software utilizzati

Nel presente paragrafo vengono presentati i software utilizzati durante il percorso di Tesi.

La scelta dei software è stata fatta in base a quelli principalmente utilizzati dal gruppo TINEN (*Transport and Infrastructures Engineering*) di Saipem S.p.A per la progettazione infrastrutturale, di cui l'azienda ha fornito licenze e manuali d'uso.

Tali software appartengano a case produttrici differenti e ciò ha prodotto, come si vedrà di seguito, alcune difficoltà nell'interoperabilità, parte dei quali risolti, altri in via di risoluzione nell'imminente futuro.

Open Rail Designer (Bentley®)

OpenRail Designer è un software di progettazione ferroviaria Bentley System® (Fig. 12) con cui è stata modellata la geometria del tracciato a partire dall'andamento plano-altimetrico fino alla realizzazione delle sezioni tipo necessarie per la creazione del modello 3D. In particolare, il software permette di creare le sopraelevazioni in curva e di verificare il tracciato secondo normativa.

A tal proposito il software permette di inserire le normative all'interno di un database; seconda del luogo in cui dovrà sorgere l'opera da progettare si terrà conto delle normative da applicare.

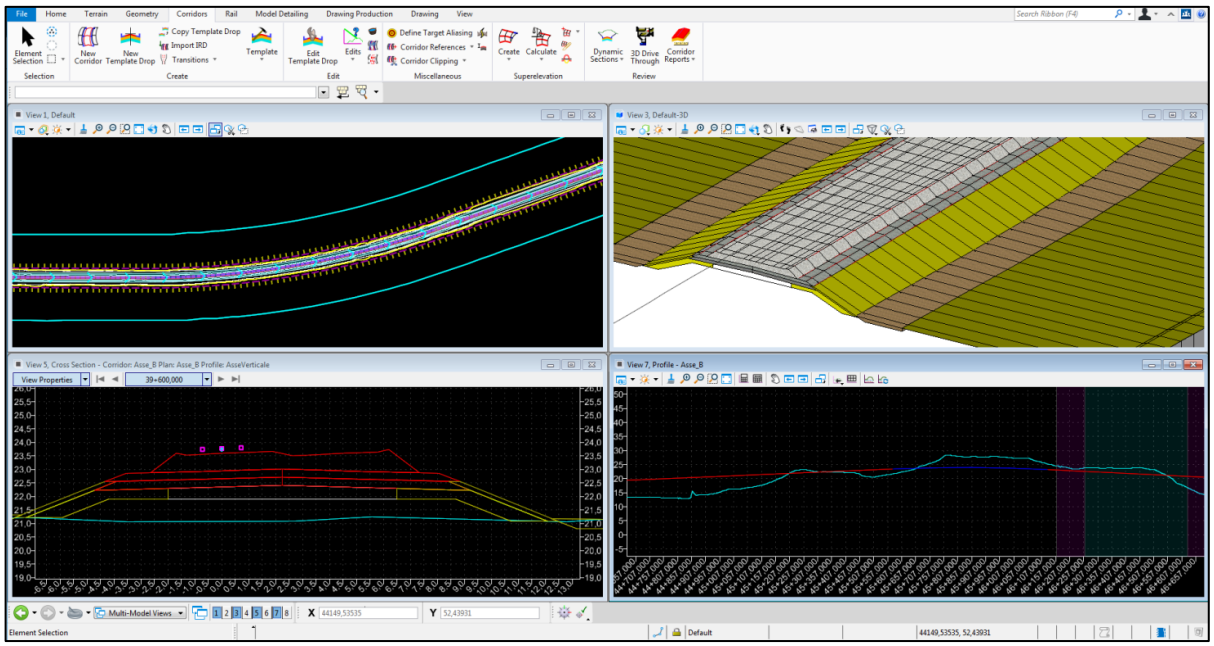

Fig. 12: Visualizzazione del modello. Interfaccia OpenRail Designer

AutoCAD2018 (Autodesk®)

I documenti realizzati all'interno di questo software vengono salvati in formato proprietario DWG (abbreviativo di "*Drawing*"); inoltre c'è la possibilità di esportare i modelli prodotti con formato DXF "Drawing eXchange Format" e negli ultimi anni Autodesk® ha sviluppato un protocollo per l'esportazione in formato ifc "Industry Foundation Classes", formato di interscambio per molti software *BIM-oriented*.

L'ambiente di disegno può essere georeferenziato con diversi sistemi di coordinate; questo è molto utile quando si lavora in Paesi che usano un proprio sistema di rifermento. Georeferenziare il progetto è di enorme importanza quando si trasferisce il modello da un software a un altro, così da collocare gli elementi nello spazio tridimensionale in modo corretto. Vengono mostrate in Fig. 13 la planimetria del sovrappasso ferroviario (OBR05) e della ferrovia, opportunamente georeferenziate.

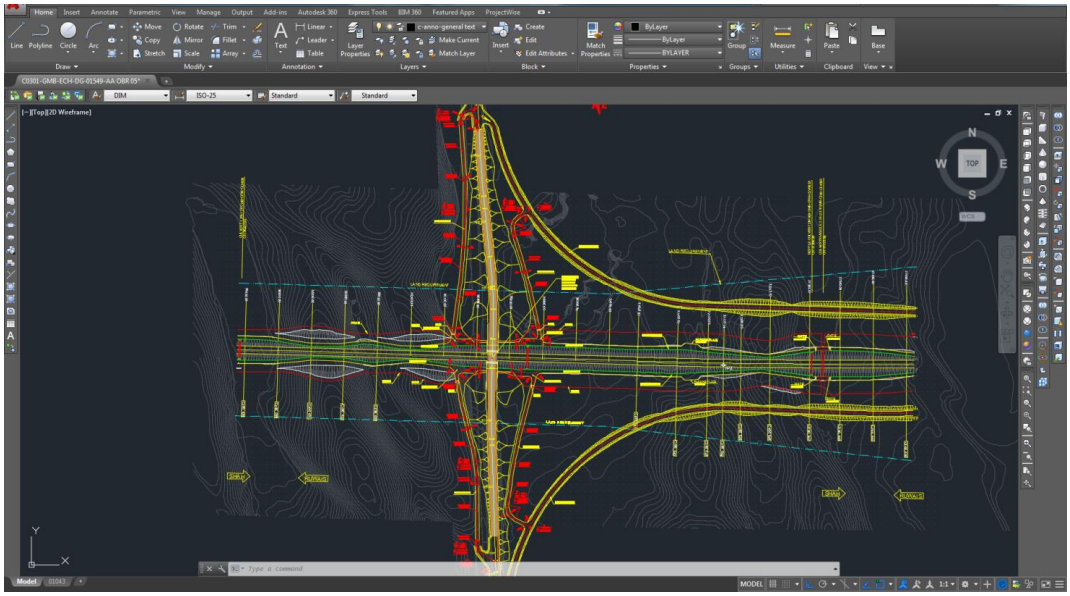

Fig. 13: Planimetria dell'OBR05 (Saipem S.p.A.)

Per quanto concerne la fase di stampa, il software permette di lavorare in uno spazio carta nel quale è possibile organizzare al meglio le tavole grafiche, modificando nello stesso foglio anche i parametri di scala e il tipo di vista sull'elemento da stampare. I computi e gli output di stampa possono essere esportati in formati leggeri come il pdf al fine di velocizzare la fase di stampa.

Nel lavoro di tesi questo software è stato utilizzato principalmente per riprodurre il profilo plano-altimetrico del caso studio come verrà dettagliatamente illustrato nei capitoli successivi.

Tekla Structure (Trimble®)

Tekla Structures è un software BIM e CAD utilizzato per creare modelli 3D accurati e contenenti tutte le informazioni progettuali necessarie alla realizzazione e al mantenimento di un'opera. Questo software è un prodotto della Tekla Corporation, società appartenente al gruppo Trimble Navigation, che si occupa della realizzazione di software per la progettazione nei settori delle infrastrutture, edilizia e dell'energia.

Tramite Tekla Structures si può modellare una struttura realizzata in diversi materiali (calcestruzzo, acciaio, vetro e legno) tenendo conto di tutto il processo di realizzazione dall'analisi di fattibilità all'esecuzione. In più è possibile creare disegni 2D e "*shop drawings*" in cui sono incluse tutte le informazioni sulla struttura comprese le modalità di fabbricazione e installazione degli elementi costruttivi.

I modelli realizzati con Tekla consentono di raggiungere il livello di sviluppo attualmente tra i più elevati nel mercato dei software BIM (LOD 500); questo permette di avere una elevata qualità e trasferibilità dei dati e di garantire l'affidabilità delle informazioni contenute nel modello. Il vantaggio di avere LOD elevati sta nel minimizzare le RFI (*request for information*) da parte dei committenti, fornitori o altri membri del team.

BIM 360 (Autodesk®)

Autodesk® ha sviluppato una piattaforma virtuale *in cloud* capace di gestire il CDE in maniera intuitiva. In questo ambiente è possibile gestire e coordinare tutte le fasi operative, dal progetto alla realizzazione dell'opera, insieme alle parti coinvolte (*Stakeholder*). L'accesso *in cloud* consente di avere la disponibilità di modelli sempre aggiornati permettendo una più efficiente collaborazione fra team. Quando un file di progetto viene creato o modificato, tutti i soggetti coinvolti vengono automaticamente informati così da attuare, se necessario, ulteriori correzioni o modifiche su altri aspetti di loro competenza.

Un'altra prerogativa del BIM 360 è quella di consentire, anche online, l'unione di più modelli; inoltre, la modifica di uno di essi viene aggiornata anche nel modello federato in modo tale che, attraverso la funzione *clash*, ci si può accorgere se quella modifica ha creato nuove interferenze con gli altri elementi dell'opera.

Navisworks (Autodesk®)

Navisworks® è un software di *project review* rilasciato da Autodesk®, l'azienda multinazionale americana che realizza software applicabili nell'industria delle infrastrutture. Navisworks® è un software ideato per migliorare il coordinamento dei progetti BIM, è in grado di combinare modelli 3D provenienti da diverse software house e revisionare il modello editando le misure, i dati di progetto e di costruzione.

Questo software offre degli strumenti avanzati per l'analisi dei tempi (4D) e dei costi (5D) di costruzione, la cui simulazione permette di controllare i risultati rilevando e gestendo eventuali interferenze di cantiere prim'ancora che l'opera venga realizzata. Grazie all'implementazione 4D e 5D si possono gestire i costi e le tempistiche in fase di cantierizzazione, così come è possibile creare animazioni simulando la costruzione dell'opera. La pianificazione può essere effettuata direttamente dai modelli di progetto o importando pianificazioni e voci di costo provenienti da altri file.

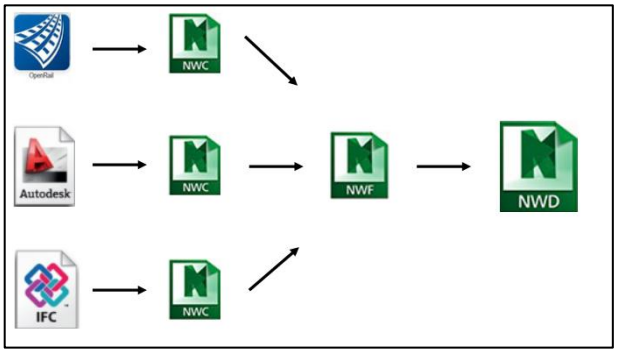

Fig. 14: Processo di federazione di un modello

Il modulo principale di Navisworks®, chiamato Roamer, è quello che consente all'utente di aprire i modelli da vari formati e combinarli in un unico modello 3D con cui l'utente può interagire in tempo reale (Fig. 14). A questo modello centrale (federato) sono associate una serie di funzionalità aggiuntive che permettono di effettuare numerose operazioni: *Clash Detective* per rilevare le interferenze e i conflitti all'interno della geometria; *Render*, con cui è possibile applicare le caratteristiche dei materiali e produrre immagini e animazioni realistiche; *Quantification*, funzionalità che consente di effettuare delle stime sui materiali, misurare aree e calcolare proprietà e volumi di classi di elementi dell'opera; *Time Liner* permette di associare dei tempi e delle date alla geometria (simulazione 4D); *Animator* fa sì che l'utente possa interagire con il modello animandolo mentre *Scripter* permette all'utente di definire una serie di azioni da applicare mediante codici.

La versione di Navisworks® utilizzata nel presente lavoro è Navisworks Manage che si utilizza per rilevare e gestire i conflitti fornendo strumenti avanzati per il coordinamento, per l'analisi 5D e la simulazione delle successive fasi di costruzione.

2. Caso studio

Il presente capitolo ha l'obiettivo di presentare la ferrovia oggetto di studio la cui contestualizzazione geografica, come verrà di seguito mostrato, è di notevole importanza soprattutto per le scelte progettuali che hanno influenzato la costruzione dell'opera. Alcune di queste, tra cui la scelta della sezione tipo, sono state di fatto condizionate anche dalle caratteristiche dei materiali presenti in quella specifica regione degli Emirati Arabi Uniti, che presenta conformazione territoriale e reti infrastrutturali molto diverse rispetto a quelle per noi abituali.

La seconda parte del capitolo è dedicata alla descrizione degli step principali effettuati per la rappresentazione virtuale della ferrovia, eseguita con OpenRail Designer®.

In particolare verranno mostrate le funzionalità messe a disposizione dal software e che hanno consentito la messa a punto del modello tridimensionale, partendo dall'importazione del terreno e degli assi planimetrici e altimetrici reperiti da file AutoCAD, fino ad arrivare alla costruzione dell'intero modello 3D.

Infine si parlerà della costruzione del modello unito composto da ferrovia, dal sovrappasso ferroviario (anch'esso costruito con OpenRail Designer) e dell'opera d'arte importata nel software tramite formato IFC, progettata con Tekla Structures.

Quest'ultimo aspetto, ossia la gestione e l'utilizzo di informazioni provenienti da un altro software, ha rappresentato un primo passo verso l'analisi sull'interoperabilità tra software, sia dal punto di vista delle informazioni conservate durante l'importazione, sia attraverso il coordinamento delle medesime informazioni geografiche e progettuali.

2.1 La ferrovia *Shah Habshan*

Il tracciato ferroviario oggetto di studio è il ramo centrale della ferrovia *Shah Habshan*, denominato *Al Gharbia Mainline* (GMB). La *Shah Habshan Railway* è situata negli Emirati Arabi Uniti e si pone tra le principali opere di collegamento per gli stati del Gulf Cooperation Council (GCC) di cui fanno parte il Kuwait, l'Arabia Saudita, il Regno del Bahrain, lo Stato del Qatar, il Sultanato di Oman e, per l'appunto, gli Emirati Arabi Uniti; essendo inoltre la ferrovia *Shah Habshan* il primo di tre progetti volti a collegare questi stati nonché la prima ferrovia realizzata negli UAE, ad essa è associato anche il nome di *Stage 1*. In Fig. 15 è possibile osservare i progetti ferroviari realizzati (e da realizzarsi), mentre in rosso il ramo ferroviario della *Shah Habshan Railway* (Stage 1).

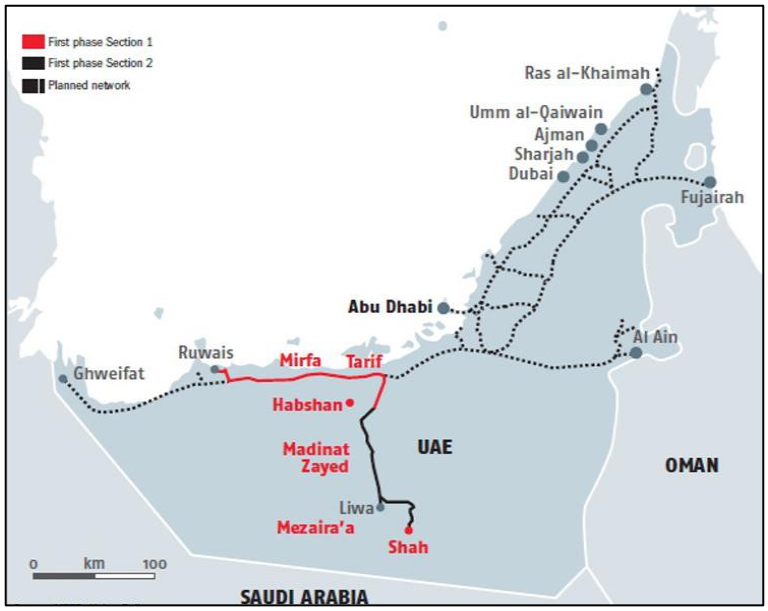

Fig. 15: UAE Railway network map (Saipem S.p.A.)

Lo Stage 1, di lunghezza complessiva pari a 265 km, ha come obiettivo principale quello di consentire un servizio ferroviario dedicato al trasporto di zolfo granulare dagli impianti di estrazione situati a Shah (estremo sud del tratto rosso) fino al porto di Ruwais (estremo ovest); esso si compone di tre rami di seguito descritti.

Ruwais Branch (RWS): Il ramo di Ruwais ha lunghezza pari a 10 km; ivi si trova un terminal di deposito e stoccaggio della massa sulfurea in grado di servire Ruwais e di essere trasportato altrove. La ferrovia parte da Ruwais e arriva all'interconnessione di Ruwais (*Ruwais junction*) dove si unisce con il tratto della *Al Gharbia Mainline* in direzione est (Fig. 16).

Fig. 16: Stage 1: Tratto RWS (Saipem S.p.A.)

Al Gharbia Mainline (GMB): questo settore di circa 110 km (Fig. 17) ricade interamente all'interno della zona costiera attraversando l'area protetta della foresta di Baynuonah e viaggiando parallelamente all'autostrada E11. Il tratto GMB prosegue in direzione Mirfa, dove sono presenti un deposito (Mirfa *Depot*) ed un centro di controllo. Si è voluto sin dalle prime fasi progettuali che questo tratto di linea ferroviaria fosse a doppio binario e che garantisse un uso promiscuo passeggeri/merci, aspetto in grado di apportare un beneficio non solo commerciale ma anche sociale per le popolazioni presenti sul territorio. Anche la velocità massima di percorrenza con cui è stato progettato questo tratto è maggiore rispetto agli altri due tratti ferroviari: la velocità massima di percorrenza sul tratto GMB è infatti di 200 km/h.

Fig. 17: Stage 1: Tratto GMB (Saipem S.p.A.)

Shah Branch (SHA): il ramo ferroviario Shah è di lunghezza pari a 145 km. A partire dal tratto GMB la ferrovia svolta in direzione sud in prossimità di Tarif (interconnessione di Liwa, Fig. 18), verso il giacimento di gas di Habshan, dove si trova un terminal di caricamento dello zolfo. Proseguendo verso sud la ferrovia si addentra nel deserto giungendo a Madinat Zayed.

Fig. 18: Stage 1: Tratto SHA (Saipem S.p.A.)

La ferrovia è stata progettata principalmente per trasportare zolfo granulare, stimando un ciclo di vita di 30 anni per l'attività di estrazione del gas. Una volta dismessi i siti di estrazione, essa potrà continuare ad essere utilizzata per il trasporto passeggeri e merci. La linea è stata inoltre progettata per il transito di treni a locomozione diesel e non sono stati pertanto installati impianti di captazione di corrente elettrica.

Da un punto di vista delle prestazioni, l'intera linea consente di trasportate 10000 tonnellate di zolfo dall'impianto di estrazione di Shah verso Ruwais in treni appositamente dedicati, a cui si aggiungerebbero altre 10000 tonnellate dall'impianto situato in Habshan. Inoltre da Ruwais alla stazione di Habshan sarebbero garantiti 4 treni al giorno (2 in andata e 2 al ritorno), mentre tra le stazioni di Habshan a Shah verrebbero garantiti 2 treni al giorno (1 in andata, 1 al ritorno) [9].

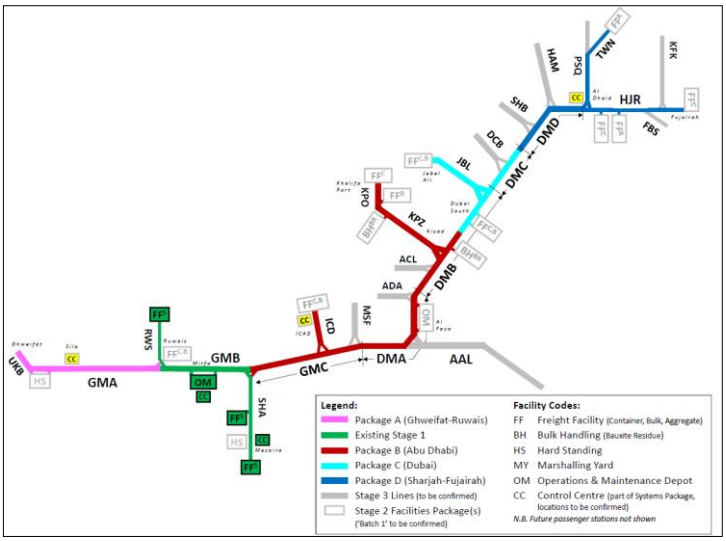

Fig. 19: Schema delle ferrovie realizzate e da realizzarsi nel *Gulf Cooperation Council* (Saipem S.p.A.)

2.2 Focus sul tratto GMB

2.2.1 La geologia del territorio: Sabkha Areas

La geologia superficiale degli Emirati Arabi Uniti e del Golfo D'Arabia è stata sostanzialmente influenzata dal deposito di sedimenti marini conseguente ai numerosi cambiamenti del livello del mare avvenuti dall'età Permiana fino alle ere geologiche relativamente recenti. Ad eccezione delle regioni montane situate a nordest nei pressi del Sultanato di Oman, gli UAE sono principalmente pianeggianti e l'azione del vento, la risalita capillare dell'acqua e la sua conseguente evaporazione hanno portato alla formazione di depositi molto estesi di ***sabkha*** in determinate aree, principalmente nell'area costiera, dove è situato il tratto GMB della *Al Gharbia Mainline*.

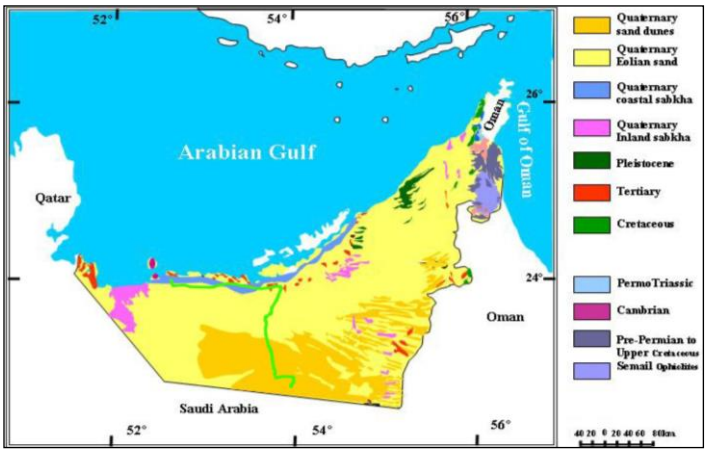

Fig. 20: Geologia degli Emirati Arabi Uniti con indicazione della ferrovia (in verde) [10]

Le sabkha sono pertanto delle zone paludose e salate, tipiche di climi aridi, costituite da depositi superficiali di calcarenite, arenaria carbonatica, sabbia e sabbia cementificata che, disponendosi sotto forma di strati alternati vanno a formare una crosta superficiale.

Il termine più sintetico che viene attribuito a tale terreno è quello di crosta salina.

Il territorio sul quale è stato costruito gran parte dello Stage 1 ed in particolare il tratto GMB, è costituito dalle seguenti caratteristiche:

1) Trasporto, da parte del vento, di sabbia di duna, fine e monogranulare;
2) Evaporazione dell'acqua di pioggia, fenomeno non molto frequente in questa zona, che tuttavia comporta una cementazione della sabbia da parte dei sali solubili come solfati e carbonati, a cui consegue, dunque, la formazione di dure croste sub-superficiali;
3) Deposito di terreni limosi (quindi a grana fine) in zone costiere o depressioni interne, parzialmente cementate da cloruri e solfati (sabkha);
4) Presenza di acqua altamente salina a basse profondità, molto corrosiva nei confronti delle opere in calcestruzzo armato interrate.

2.2.2 Scelte progettuali dettate da considerazioni di contesto

Il tracciato è posto centralmente ad un corridoio di ampiezza variabile tra i 100 e 200 metri; la notevole ampiezza del corridoio è causata dalla presenza di dune artificiali volte a mitigare il fenomeno del trasporto di sabbia da parte del vento; tali opere sono note con il nome di *sand mitigation*.

La ferrovia è generalmente costituita da rilevati piuttosto bassi di altezza compresa tra i 2 e i 3 metri rispetto al suolo e taglia, inoltre, alte dune di sabbia nei pressi di Liwa e Shah, utilizzando basse aree interdunali in modo da ridurre, ove possibile, la quantità di movimentazioni di scavo.

La costruzione dei rilevati è stata effettuata utilizzando la sabbia reperibile localmente per il corpo del rilevato (*core embankment*), mentre esternamente si è utilizzato un materiale importato dalle cave della zona, noto con il nome di *gatch*, costituito da frammenti di roccia calcarea immersi in una matrice di limo argilloso e sabbioso, selezionato e lavorato in modo da rispettare i criteri per la costruzione ferroviaria.

Il vantaggio nell'uso del *gatch* risiede nella sua elevata lavorabilità in termini di compattazione e nelle sue prestazioni meccaniche; tali caratteristiche sono di gran lunga superiori rispetto a quelle della sabbia locale, per lo più fine e monogranulare. Le migliori caratteristiche meccaniche di questo materiale ha fatto sì che per alcuni tratti di ferrovia venisse utilizzato il *gatch* al posto della sabbia, come è avvenuto per il CF06.

I movimenti terra differiscono a seconda delle diverse aree su cui il tracciato si localizza; le due tipologie di movimento terra che sono state intraprese sono:

- Nelle aree *sabkha* la costruzione dei rilevati ha comportato pochi lavori di scavo, finalizzati alla sostituzione di materiale di scarsa portanza (scotico) con materiale migliore successivamente compattato;
- Nelle aree in cui sono presenti delle dune mobili, è stata predisposta l'asportazione di sabbia dalle dune mobili più basse. Pertanto le lavorazioni principali sono lo scavo, la livellazione del terreno e la successiva compattazione.

2.2.3 Sede ferroviaria: Sezione tipo

La linea ferroviaria è costituita da un armamento standard con traverse annegate nel ballast e costituita da lunghe rotaie saldate, con organi di attacco direttamente agganciati nelle traverse di cemento.

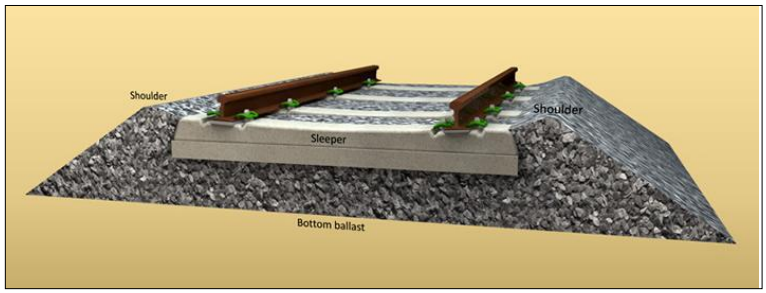

Fig. 21: Sezione tipo dell'armamento ferroviario. Dal basso: strato inferiore della massicciata (*bottom ballast*); traverse in c.a.p. (*sleepers*); rotaie (*rails*); spalle della massicciata (*shoulders)*. Fonte: Saipem S.p.a.

La sezione tipo in rilevato si compone, partendo dal basso, dei seguenti strati:

- Uno strato di preparazione costituito da materiale di riempimento opportunamente selezionato (*gatch*) e di spessore non eccedente i 40 cm, sostitutivo dello scotico previamente asportato;
- Il corpo del rilevato (*core embankment*) costituito da strati di sabbia (o *gatch*) spessi 50 cm;
- Involucro (detto *Bank grade*) in *gatch*, avente la funzione di confinare lateralmente il rilevato, proteggendolo dall'erosione;
- Ricoprimento protettivo (*protective cover)*, anch'esso formato da *gatch*, rappresenta un ulteriore strato protettivo di spessore pari 15 cm, posto esternamente all'involucro;
- Sottofondo (s*ubgrade*), anch'esso formato da materiale gatch, è lo strato sommitale del rilevato, dotato di resistenza e durabilità tali da distribuire i carichi provenienti dalla sotto-massicciata (*subballast*);
- Sotto-massicciata (s*ubballast*), costituito da materiale riciclato o da materiali granulari locali (sabbia o mix di sabbia e *gatch*) stabilizzati a cemento. Ha la funzione di distribuire sul rilevato i carichi provenienti dall'armamento ferroviario. In particolare, il materiale riciclato è rappresentato da inerti in calcestruzzo frantumati ed opportunamente vagliati, ottenuto da impianti locali che riciclano materiale edilizio proveniente dalla demolizione di edifici;
- Ballast, costituito da inerti di diametro compreso tra 22,4 mm e 63 mm. È un materiale di elevate caratteristiche meccaniche, in grado di resistere e dissipare gli sforzi trasmessi dal passaggio dei treni;

- Traverse *(sleepers)* (Fig. 22), costruite in calcestruzzo prefabbricato e aventi dimensioni standardizzate.

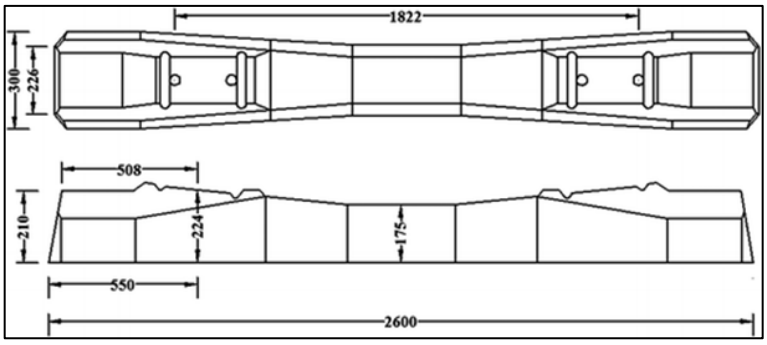

Fig. 22: Dimensioni traversine in cemento armato precompresso

In Fig. 23 viene riportata la sezione tipo in rilevato della ferrovia in questione:

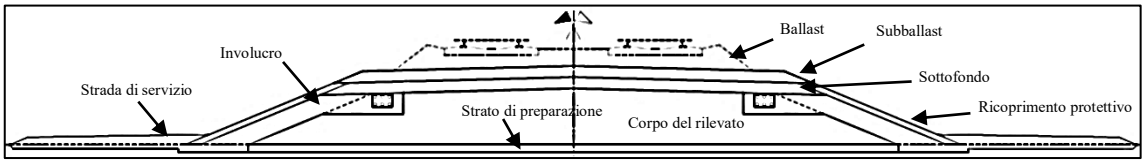

Fig. 23: Sezione tipo, tratto in rilevato (Saipem S.p.A.)

3. Modellazione con OpenRail Designer (Bentley®)

In questo capitolo vengono descritti i procedimenti che hanno condotto alla creazione del modello 3D della ferrovia e del sovrappasso ferroviario, entrambi modellati con OpenRail Designer.

Partendo dalla ferrovia, importata da AutoCAD, è stato creato il solido ferroviario (Fig. 24) a seguito della definizione della sezione tipo e della sua modellazione parametrica.

OpenRail Designer crea il modello tridimensionale attraverso l'estrusione della sezione tipo lungo gli assi planimetrico e altimetrico del tracciato, rispettando l'andamento del terreno attraverso apposite "condizioni finali" (*end conditions*), ovvero componenti che servono al software per collegare la sezione tipo con il terreno circostante.

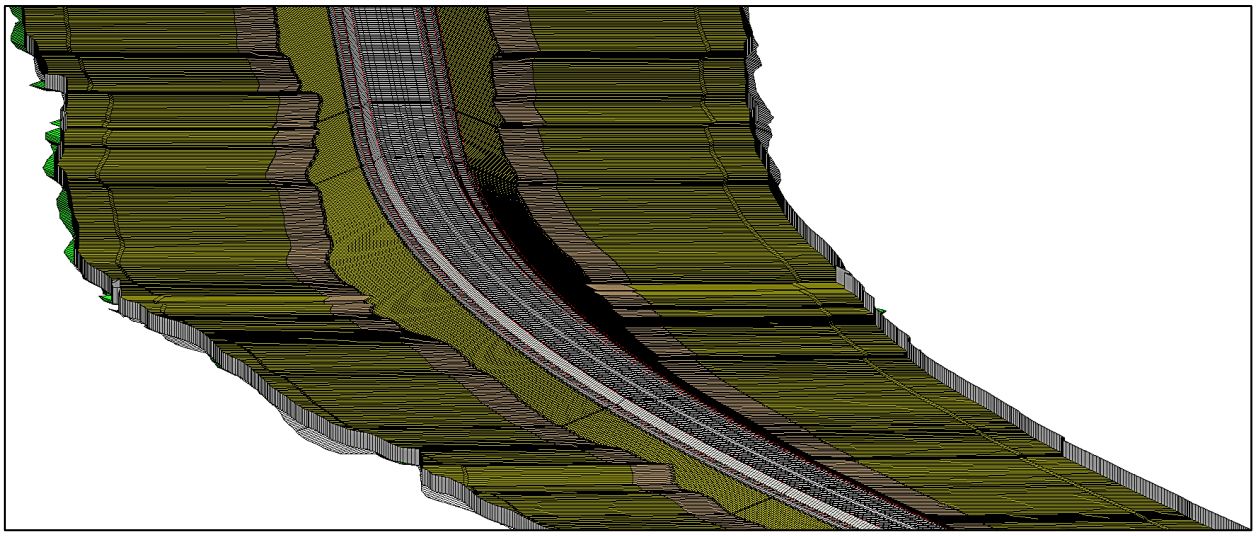

Fig. 24: Modello 3D della ferrovia

La creazione della *template section* in OpenRail Designer è l'aspetto progettuale più complesso. In primo luogo perché alcuni componenti della sezione trasversale devono avere caratteristiche geometriche variabili a seconda dell'andamento del terreno. In secondo luogo per i risultati che derivano da una corretta e dettagliata definizione della sezione tipo: di notevole importanza è infatti la possibilità di estrapolare da questo software *report* indicativi delle quantità dei componenti (definizione dei m^3 di massicciata, sotto-massicciata, terreno, etc.). Quanto maggiore è il livello di dettaglio e l'accuratezza della sezione tipo, tanto più realistiche e affidabili saranno le stime sulle quantità scaturite dal *report*, fondamentali in fase preliminare al fine di comprendere le quantità di materiale richieste per la costruzione dell'opera.

3.1 Modellazione del terreno

Il territorio orografico è uno spazio molto complesso da rappresentare graficamente; le misurazioni per ottenere delle mappe territoriali vengono infatti effettuate attraverso diverse tecniche di rilievo.

Nel corso degli ultimi anni le tecniche di rappresentazione topografica hanno avuto numerosi aggiornamenti, passando dal classico rilievo topografico all'aerofotogrammetria. Oggi la tecnica all'avanguardia per la restituzione dei punti quotati consiste nell'uso del Lidar (*Light Detection and Ranging*). Il Lidar è un laser scanner che emette onde elettromagnetiche che urtano sull'oggetto e ritornano al dispositivo, restituendo una nuvola di punti.

Le mappe sono di primaria importanza in fase di progettazione, infatti esse vanno a dettare le condizioni e i vincoli territoriali dove sorgerà l'opera. Attraverso la cartografia è possibile stabilire tutte le caratteristiche geometriche del tracciato (tra cui la collocazione, il tracciamento planimetrico, il profilo altimetrico, etc.) e delle opere d'arte a corredo, come ad esempio il profilo idraulico dei fossi di guardia. Per tali motivi è necessario ottenere un modello territoriale quanto più fedele possibile alla realtà.

In ambito infrastrutturale la tecnica più utilizzata è quella della modellazione attraverso punti quotati ottenuti con aerofotogrammetria; sebbene la tecnica con il laser scanner fornisca una elaborazione territoriale più precisa, questa non viene solitamente utilizzata per eccessivi oneri computazionali. Nell'elaborato il terreno è stato è stato riprodotto da un DTM (*Digital Terrain Model*) a partire da ortofoto.

Le ortofoto sono delle immagini *raster* (in formato *.tif*) che associano ad ogni pixel della fotografia una quota geo-referenziata. Le ortofoto, a loro volta, possono essere trasformate in una maglia reticolare triangolare TIN (*Triangulated Irregular Network*, Fig. 25), ossia una rete formata da punti significativi che rappresentano la reale quota del terreno; tali punti sono collegati fra loro attraverso linee vettoriali in grado di formare delle superfici piane che approssimano il terreno.

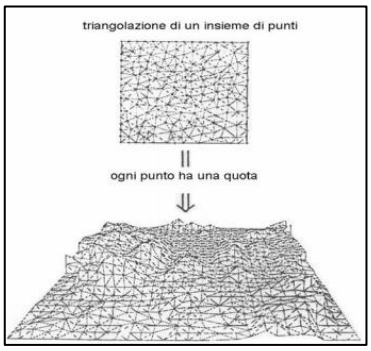

Fig. 25: Triangulated Irregular Network (TIN) [11]

Di seguito sarà invece affrontato il modo con cui ottenere il DTM utilizzando software AutoCAD e OpenRail Designer.

Il primo step per ottenere il DTM è quello di importare le ortofoto all'interno del software AutoCAD; successivamente i pixel (e le informazioni in essi contenute, ovvero le quote) vengono elaborati e trasformati in linee e punti geo-referenziati di quota nota[4]. Il passo successivo consiste nell'importare il file in formato *.dwg* all'interno di OpenRail Designer e attraverso alcune manipolazioni si otterrà un modello tridimensionale del suolo (Fig. 26).

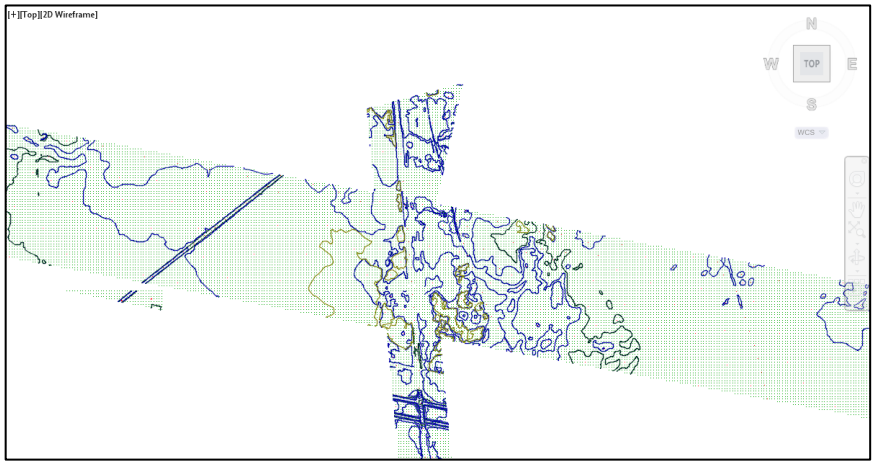

Fig. 26: Linee e punti geo-referenziati nei pressi del sovrappasso ferroviario (OBR05)

In OpenRail Designer la creazione del terreno viene eseguita attraverso i seguenti *step*:

1. Viene creato un nuovo file 3D (*Seed3D*), necessario per poter creare un modello tridimensionale del terreno. Il file verrà associato con il disegno quotato in .dwg attraverso un riferimento esterno e allo stesso tempo saranno impostati tutti i parametri di scala con le relative unità di misura.
2. Si impostano i filtri grafici (Fig. 27) da usare per la creazione del terreno:

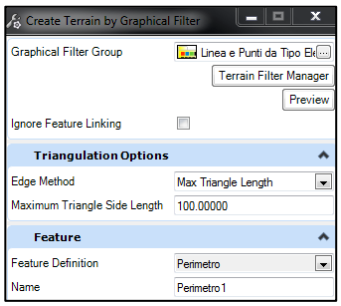

Fig. 27: Schermata di impostazione dei filtri grafici

[4] Il primo step è stato realizzato da Saipem S.p.a.

Si impongono le opzioni di triangolazione (*Max Triangle lenght*) definendo un valore massimo di lunghezza che consenta di rappresentare fedelmente il terreno senza "appesantirne" la visualizzazione (Fig. 28).

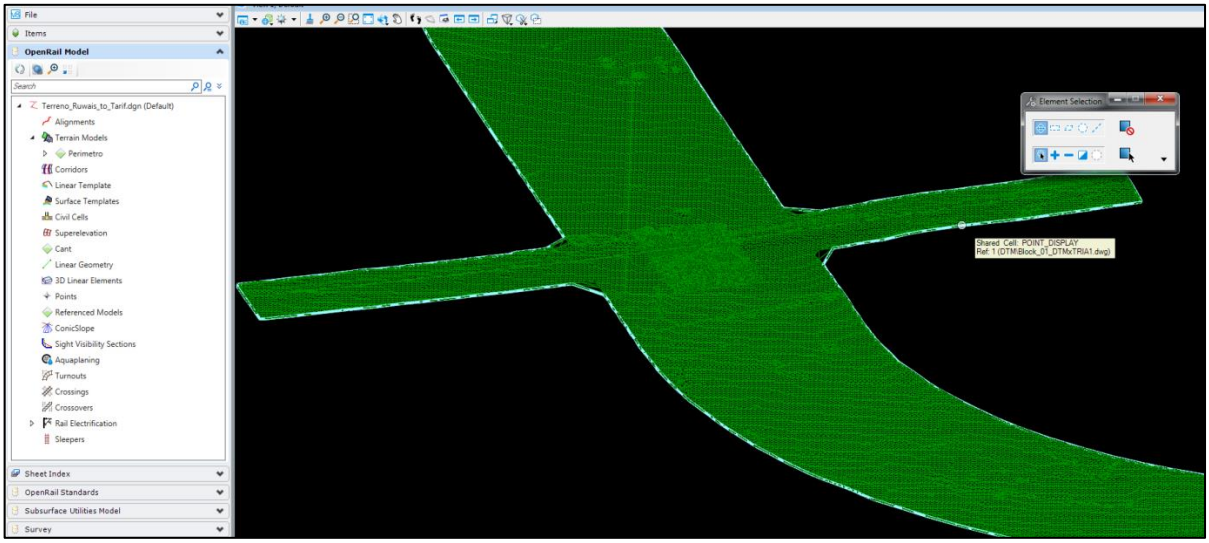

Fig. 28: Modello 3D del terreno nei pressi dell'OBR05

Qualora si volesse visualizzare soltanto il contorno del terreno, in modo da rendere più leggera la visualizzazione (consentendo inoltre di poter lavorare all'interno del contorno) si può selezionare il pannello delle proprietà del terreno e disattivare la visualizzazione della triangolazione.

Fig. 29: Modello 3D dell'intero tratto GMB rappresentato dalla linea di contorno

3.2 Modellazione della Mainline (CF06)

3.2.1 Creazione del tracciato planimetrico in ORD

Trattandosi della riproduzione di un tracciato ferroviario esistente, le caratteristiche geometriche sono state riprodotte come da progetto.

La fase di importazione del tracciato planimetrico è successiva alla completa pulizia del file AutoCAD da tutte le informazioni ritenute non necessarie allo scopo, come ad esempio le informazioni da inserire a corredo della planimetria (tabelle, progressive chilometriche, etc.); questo viene effettuato spegnendo i *layer* non necessari e creando un nuovo file con le uniche informazioni necessarie:

- Rettifili;
- Curve di transizione;
- Archi di cerchio;
- Vertici delle poligonali.

Una volta ripulito il file si procede con l'importazione in ORD attraverso l'apposito comando di richiamo.

Le entità importate dal file *.dwg* sono entità geometriche semplici e sconnesse tra loro, ossia linee, archi di cerchio e curve di transizione.

Per la creazione del tracciato planimetrico si ricostruisce la poligonale d'asse andando a collegare i vertici delle poligonali presenti nel disegno avvalendosi della presenza degli stessi vertici dapprima lasciati durante la pulizia del file Autocad. Questi elementi semplificano il ricalco dell'asse con i comandi di OpenRail Designer.

In seguito si costruiscono gli archi di cerchio e le curve di transizione attraverso un apposito comando dedicato, con il quale è possibile definire sia il valore dei raggi che dei fattori di scala (Fig. 30):

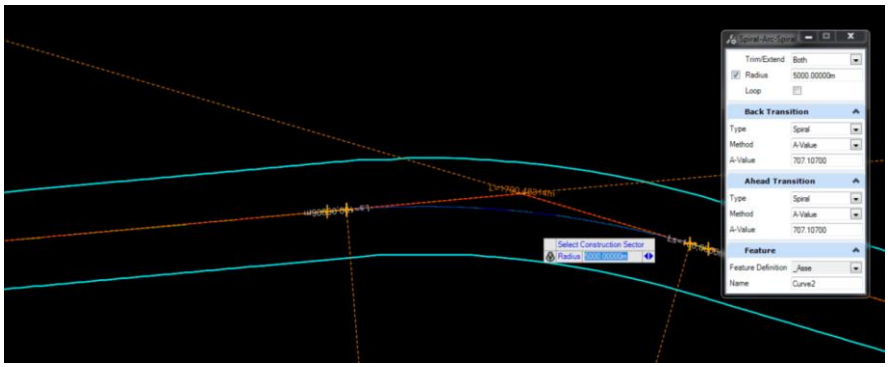

Fig. 30: Linee di costruzione con il comando *Spiral-Arc-Spiral*

Tutti i componenti del tracciato vanno uniti in un unico **asse** andando ad attribuire proprietà (*feature definition*) a ciascun elemento. Infine rettifili e curve vengono uniti tramite il comando *Complex by* eliminando così le linee di costruzione disegnate in precedenza.
Il tracciato oggetto di studio parte dalla progressiva 1+007,000; è necessario quindi specificare al software il punto di inizio del tracciato da prendere in considerazione che altrimenti verrebbe automaticamente impostato alla progressiva 0+000,000.

3.2.2 Creazione del profilo altimetrico in ORD

Anche in questo caso è necessario ripulire il file *.dwg* dalle informazioni non necessarie, ad esempio le quote relative ai sottostrati della ferrovia (strato di formazione della ferrovia), tombini, sovrappassi e fincature. È inoltre necessario far partire il tracciato dall'ascissa da cui effettivamente inizia il tratto GMB (chainage 1+007+000).
Analogamente a quanto fatto in precedenza si procede con lo spegnimento dei *layer* di interesse e la cancellazione delle informazioni superflue; le uniche informazioni di interesse sono:

- Il profilo del terreno;
- Il profilo verticale del tracciato;
- I valori di inizio e fine dei raccordi parabolici utilizzati, utili per la ricalcatura del profilo in OpenRail Designer;
- Le annotazioni altimetriche del terreno e del tracciato, non essendo il profilo verticale georeferenziato.

Eliminati tutti i layer superflui, si riaccendono quelli a cui si è interessati e si procede con la creazione dei blocchi: essendo infatti i profili del terreno e del tracciato costituiti da una successione di segmenti spezzati, è necessario creare dei blocchi in AutoCAD in modo da poter scalare il disegno e ricalcare le livellette in OpenRail Designer.
Effettuate queste operazioni preliminari, la procedura di importazione è identica a quella seguita per il tracciato planimetrico.

Nell'importare il terreno in OpenRail Designer si osserva però una differenza di triangolazione rispetto ad AutoCAD (Fig. 31). La differenza in realtà è minima e concentrata in punti isolati. Essa probabilmente dipende da come il software di Bentley approssima le distanze della triangolazione (in azzurro: modello del terreno in ORD; in rosso: modello del terreno da file *.dwg*)

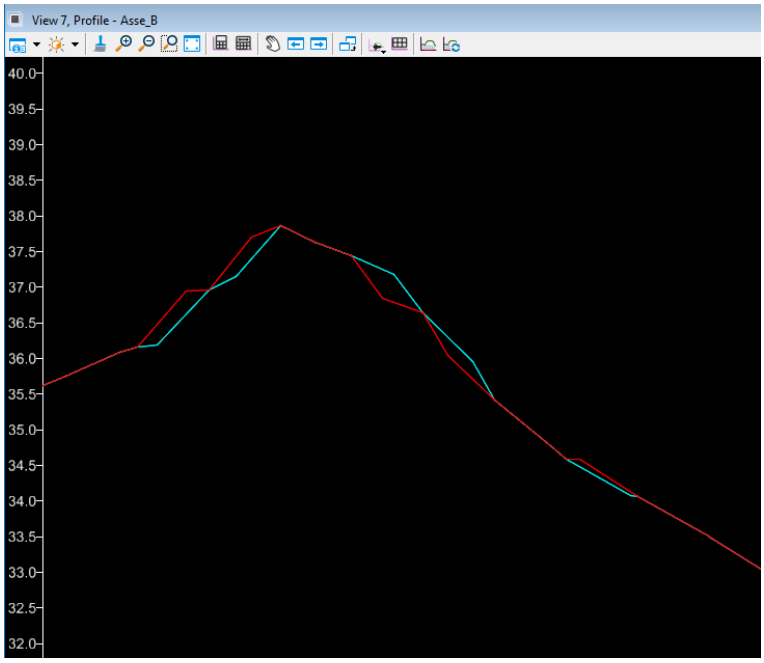

Fig. 31: Differenza di triangolazione tra OpenRail Designer ed AutoCAD

Anche qui si è avuto modo di ricalcare il profilo longitudinale (Fig. 32) attraverso gli appositi comandi di OpenRail Designer, simili a quelli già utilizzati in precedenza.

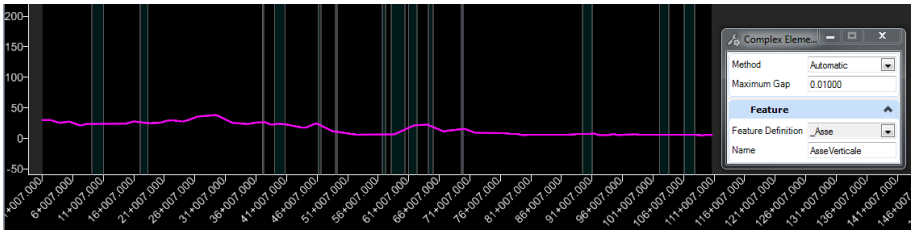

Fig. 32: Profilo longitudinale ottenuto unendo linee e raccordi parabolici

3.2.3 Creazione della sezione tipo con OpenRail Designer

La creazione di una sezione tipo (*template section*) avviene attraverso una modellazione parametrica in cui ciascun componente, ad esempio il ballast, ha proprie caratteristiche geometriche (nel rispetto della sezione trasversale) ed è vincolato agli altri componenti della sezione mediante vincoli e relazioni geometriche, in modo da generare un solido tridimensionale ottenuto per estrusione.

I vincoli da dare ciascun componente sono associabili sia ai suoi punti di estremità, sia ai componenti stessi (questi ultimi utili a governarne la visualizzazione e/o la dipendenza rispetto ad altri oggetti). La modellazione delle *sezioni tipo* è un aspetto molto complesso e lungo da trattare e una completa spiegazione trascenderebbe dagli obbiettivi che il presente elaborato si impone; si ritiene pertanto opportuno focalizzare l'attenzione sulle caratteristiche della sezione tipo (vincoli e comandi imposti) per ciò che riguarda gli scopi del presente studio.

Il primo aspetto su cui si basa la creazione della sezione tipo è costituita dalla definizione della geometria dei componenti che restano fissi durante tutto lo sviluppo della sezione (componenti evidenziati in rosso in Fig. 33):

- Rotaie;
- Massicciata (di spessore variabile, 30 cm misurati al di sotto della traversa);
- Sottomassicciata (30 cm);
- Sottofondo in gatch (subgrade, 30 cm).

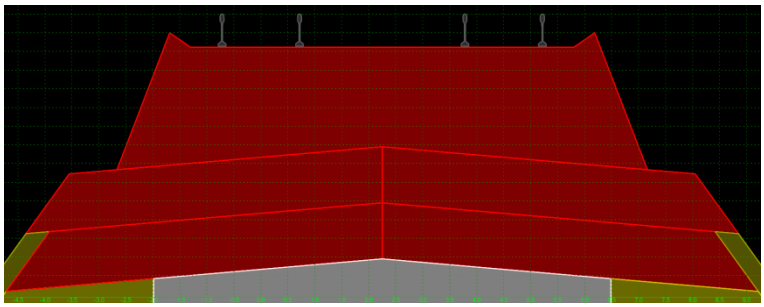

Fig. 33: *Template section* in ORD: focus sovrastruttura

A titolo esemplificativo, in Fig. 34 viene riportata una tabella riferita ai vincoli di un singolo punto, in particolare per l'estremo inferiore destro del ballast (chiamato Ballast_BotDx), al quale si sono imposti vincoli sulla pendenza rispetto all'estremo superiore destro del ballast (Ballast_TopDx) e rispetto all'asse centrale del subballast (Asse_subballast), rispettivamente aventi inclinazione 75% (4:3) e 2,5 % (1:4).

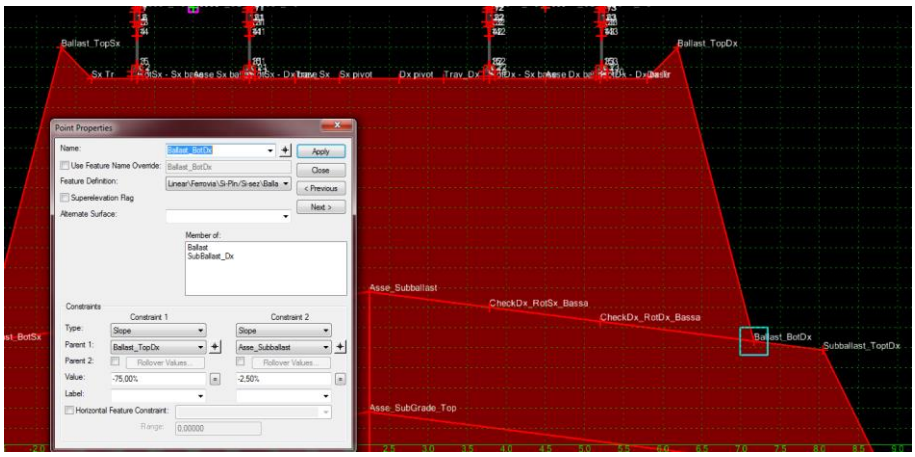

Fig. 34: Impostazione dei vincoli (*Point Properties*) : pendenze trasversali

È inoltre possibile associare una *feature definition* ad ogni punto nonché ad ogni componente, così da poter conferire proprietà a ciascuno di essi, tra cui la possibilità di impostarne la visualizzazione in pianta, profilo o sezione in base alle esigenze.
In seguito si è effettuata la modellazione della parte sottostante, andando a definire gli altri strati costituenti la sezione, ossia:

- Strato protettivo (*Protective cover*, 15 cm);
- Involucro (*Bank grade*, 50 cm);
- Strada di servizio (*Service roads,* pavimentazione stradale in gatch, di spessore 30 cm), con pendenza dell'1,5% in modo da permettere il deflusso delle acque meteoriche;
- Spazio di circa 25 metri tra il rilevato ferroviario e la recinzione esterna (chiamata *free zone*);
- Recinzione esterna.

I componenti inferiori alla sovrastruttura sono stati realizzati con appositi comandi volti a regolare la visualizzazione e la dimensione al variare del terreno. In dettaglio identifichiamo: strato protettivo, sottofondo e strade di servizio laterali, alle quali sono state collegate le figure geometriche più esterne, ossia la zona libera e la recinzione.

Per quanto concerne la strada di servizio si è imposto che nei tratti in cui la ferrovia viaggia in rilevato, essa segua l'andamento del terreno insieme allo strato protettivo e al sottofondo; viceversa, nei tratti in trincea deve essere garantita una dimensione minima per tutti e tre i componenti.

Pertanto occorre fornire la sezioni tipo di diverse ramificazioni (Fig. 35), ciascuna delle quali rappresentativa delle stesse informazioni; in seguito bisogna associare loro dei comandi in modo da imporre la corretta visualizzazione di tutti i componenti a seconda che ci si trovi in rilevato oppure in trincea:

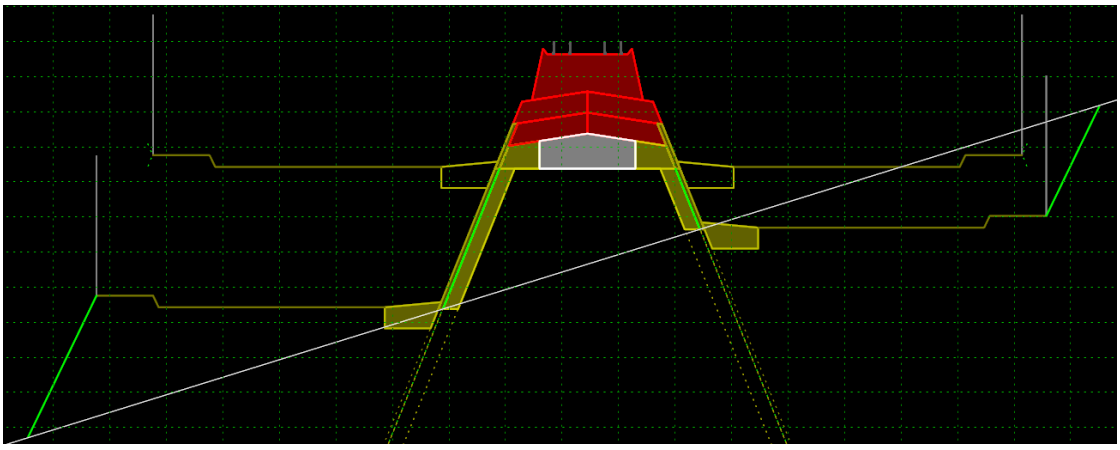

Fig. 35: Comandi di visualizzazione in ORD: spegnimento dei componenti

Come si può osservare dalla Fig. 35, i componenti "pieni" sono quelli che verranno effettivamente visualizzati una volta lanciato il modello tridimensionale; di contro le figure vuote (e le altre esterne, ad esse collegate) verranno "spente". Ciò è corretto, in quanto si è imposta l'"accensione" delle figure vuote solo in caso di sezione in trincea.

Sempre dalla figura sopra riportata è possibile apprendere la rilevanza delle "condizioni finali" (*end conditions*): esse sono delle rette e rappresentano il vero e proprio collegamento tra la sezione tipo e il terreno sottostante. Quando viene generato il modello, infatti, le *end conditions* vanno ad intercettare il terreno sulla base di condizioni imposte ai punti di estremità; queste possono essere stabilite sia in base a lunghezze definite dall'utente che in base alla direzione imposte a tali linee.

Imponendo una condizione finale “infinita” (comando “*End Condition is infinite*”, Fig. 36), il componente andrà ad intercettare il punto del terreno più vicino, senza limiti di estensione, governando in tal modo anche la dimensione dei componenti ad essa associati.

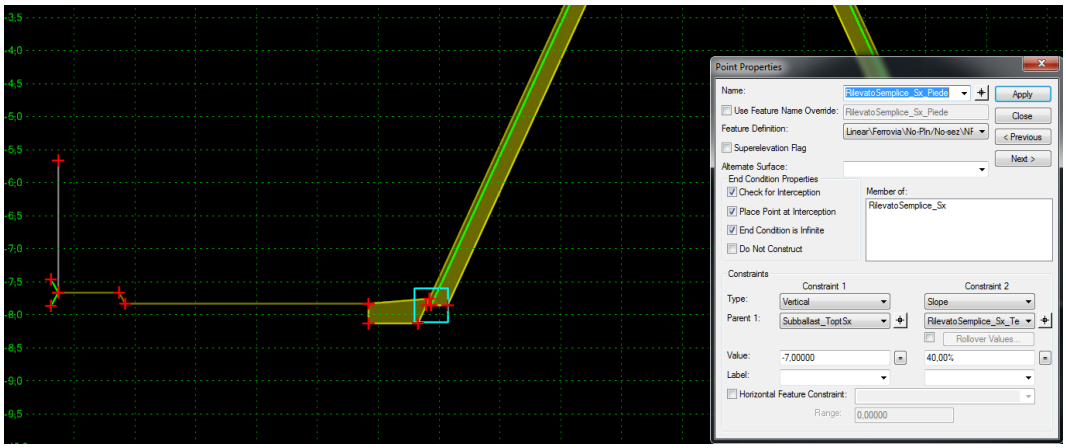

Fig. 36: Esempio applicativo di una *End Condition*

Nel caso in esame sono state definite condizioni finali sia sul rilevato ferroviario che sul terreno esterno alle recinzioni.

Le prime sono inclinate del 40%, coerentemente con la pendenza del rilevato, 2:5. Ad esse sono collegate involucro e strato protettivo esterno; questo collegamento è possibile stabilendo i *Parent Component*, dove per *parent* si intende il componente gerarchicamente superiore: la visualizzazione di tutti gli altri elementi ad esso collegati è pertanto subordinata a quella dell’elemento principale.

Le *End Conditions* sul rilevato esterno vengono invece imposte al fine di individuare i punti di chiusura dei rilevati e delle trincee, generando così un modello in cui vengono compiutamente definite le quantità di terreno, sia di scavo (*Cut volumes*) che di riporto (*Fill volumes*), importanti valori forniti dai report estraibili da OpenRail Designer.

I comandi di visualizzazione da imporre ai componenti si basano sull’utilizzo del comando *Espressioni condizionali*, in grado di definire le impostazioni di visualizzazione dei vari componenti. Le regole di visualizzazione sono state imposte alle strade di servizio (superiori), ai livelli minimi del ricoprimento protettivo e all’involucro del rilevato, qualora si attivi la sezione in scavo (Fig. 37).

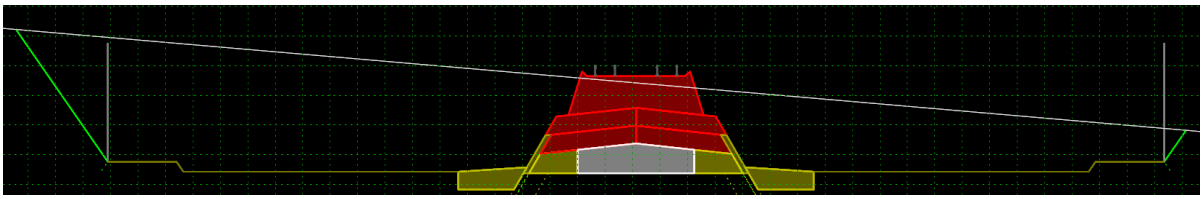

Fig. 37: Sezione in scavo: focus sulla visualizzazione dei componenti

Menzione a parte è da dedicare ad alla costruzione del *minimum core embankment*, cioè di uno spessore minimo di rilevato (50 cm) da garantire nei tratti in trincea, rappresentato in grigio in Fig. 37.

Nella **Fig. 38** è riportato uno stralcio di ferrovia estrapolato dal modello tridimensionale.

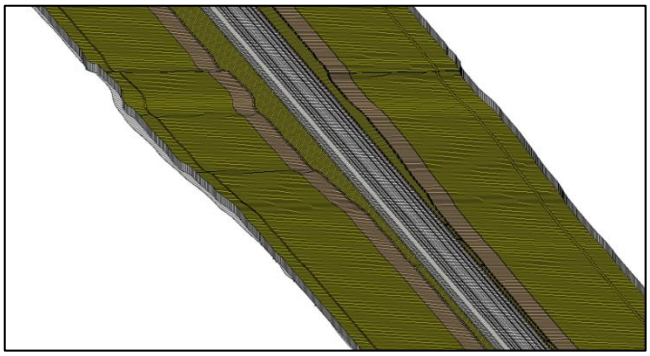

Fig. 38: Modello 3D della ferrovia

La sezione tipo della linea principale va tuttavia adattata alle opere d'arte che incontra lungo il suo sviluppo. Le principali opere che si riscontrano sono costituite dai sovrappassi ferroviari (*overbridges*, OBR), per i quali si deve effettuare un adattamento della sezione tipo, al fine di definirne il realistico andamento (Fig. 39).

Al fine di effettuare questi adattamenti è stata calcolata l'estensione della sezione al di sotto dell'OBR procedendo così con le modifiche da apportare.

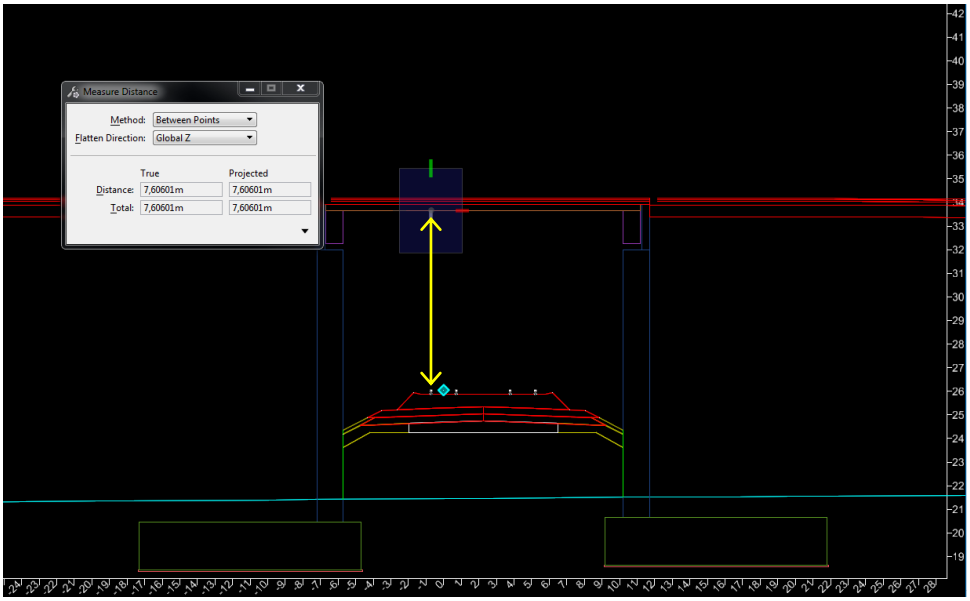

Fig. 39: Adeguamento della *template section* al di sotto del sovrappasso ferroviario (OBR05)

Per effettuare questa modifica è stato necessario importare l'opera d'arte, nel caso in esame OBR05, dal software in cui è stato creato, ovvero Tekla Structures (Trimble®).

Questo aspetto costituisce già di per sé una prima analisi di interoperabilità tra software: utilizzando gli appositi comandi dedicati dai menù di OpenRail Designer è stato direttamente importato il file in formato IFC dell'opera d'arte in questione.
Tuttavia alcune operazioni preliminari volte a favorire questa interoperabilità sono state necessarie.
Un ruolo fondamentale è stato infatti svolto da AutoCAD che ha costituito il software di scambio delle informazioni tra OpenRail Designer e Tekla. Per il coordinamento delle informazioni si è reso necessario fornire, al modellatore dell'OBR, due informazioni:

1. Il modello 3D della ferrovia, opportunamente geo-referenziato;
2. La distanza tra il piano del ferro e l'asse altimetrico della strada, posta in corrispondenza del sovrappasso ferroviario (Fig. 39).

Una volta fornite queste due informazioni, il modellatore dell'OBR ha potuto opportunamente geo-referenziare l'opera d'arte all'interno di Tekla in modo da poter creare un file IFC con i corretti riferimenti rispetto all'asse della ferrovia e all'asse del sovrappasso ferroviario (Fig. 40).
Le armature che costituiscono l'opera d'arte non sono informazioni contenute all'interno del file di scambio IFC, essendo del tutto irrilevanti in questa fase, dove invece il coordinamento delle informazioni tra infrastruttura e sovrappasso risulta essere fondamentale.

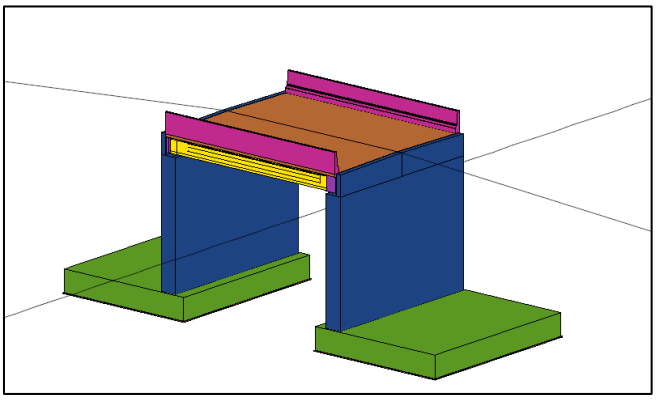

Fig. 40: Opera d'arte geo-referenziata rispetto ai due assi plano-altimetrici

3.3 Modellazione del sovrappasso ferroviario (OBR05)

In questo paragrafo verranno descritti i procedimenti che hanno condotto alla modellazione del *sovrappasso*. La modellazione dell'asse plano-altimetrico del sovrappasso segue le stesse dinamiche affrontate per la ferrovia; l'unica differenza è che non è stato possibile reperire il profilo altimetrico e per tale motivo è stato riprogettato.

3.3.1 Creazione del profilo plano-altimetrico del sovrappasso ferroviario

I dati di partenza si sono ricavati attraverso l'importazione di un modello dell'opera d'arte in formato .ifc; con tale modello si sono potuti valutare gli ingombri e le sagome limite e da queste misure è stato possibile tracciare la livelletta con la giusta pendenza.
Il profilo altimetrico è stato progettato con due raccordi convessi di tipo parabolico di secondo grado come prescritto dalle norme tecniche stradali utilizzate (DM. N.6792/2001).
Il parametro della parabola usato in ORD è stato ricavato con la seguente espressione:

$$R_v = \frac{100 \cdot L}{\Delta i} = \frac{D^2}{2 \cdot (h_1 + h_2 + 2 \cdot \sqrt{h_1 \cdot h_2})} \cong 1315\ m$$

Per determinare la distanza di arresto si usano gli abachi contenuti nella norma (Fig. 41) considerando una velocità limite in rampa pari a 50 km/h e una pendenza del -5.53%, si ottiene così una distanza di arresto pari a 70 m. Il raggio ottenuto è pari a 1315 m; tale valore rappresenta il limite inferiore di raggio verticale. Nel raccordo si è invece utilizzato un valore pari a 3000 m per rendere più graduale lo sviluppo.

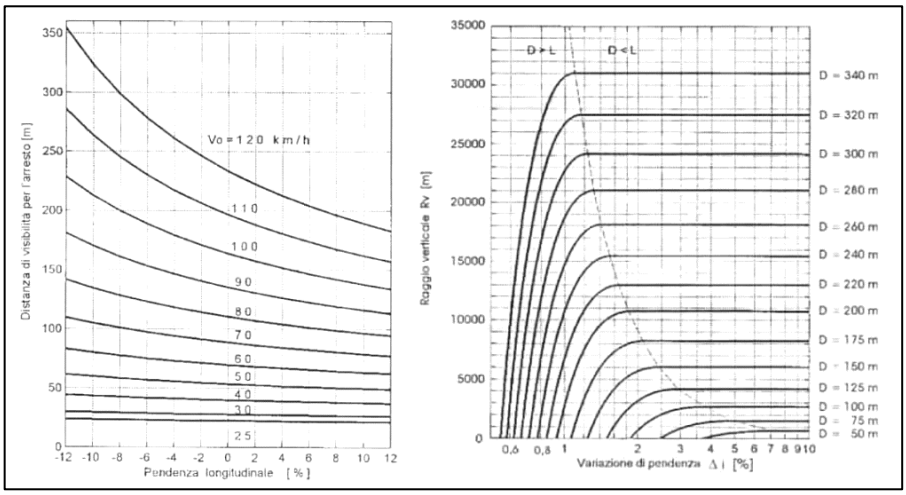

Fig. 41: Abachi di progetto (DM. N.6792/2001)

In Fig. 42 viene mostrata la livelletta con i raccordi convessi ed i relativi parametri geometrici.

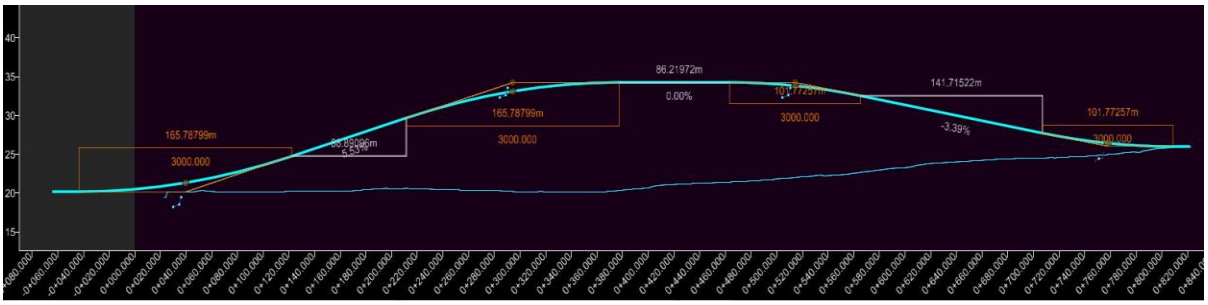

Fig. 42: Profilo Altimetrico OBR05

3.3.2 Creazione delle sezioni tipo del sovrappasso ferroviario

Per realizzare il modello del sovrappasso è necessario sviluppare diverse sezioni tipo che vengono estruse lungo l'asse plano-altimetrico. Per eseguire la modellazione in maniera corretta è necessario differenziare tre sezioni a seconda della loro collocazione: si passa da rampa in rilevato semplice a quella rappresentativa del tracciato sull'opera d'arte, passando per la rampa con pannelli in terra armata, intermedia alle precedenti.

Sezione in rilevato semplice

Gli spessori e le geometrie degli strati che compongono la sezione in *rilevato semplice* sono stati reperiti da disegni AutoCAD di Saipem S.p.A.

Le misure sono state riportate in OpenRail Designer inserendo le regole specifiche per far adattare l'ultimo strato all'andamento del terreno.

Gli strati che compongono il corpo stradale vengono segnalati a partire dallo strato più superficiale (Fig. 43):

1. Usura: È lo strato più superficiale del pacchetto legato in conglomerato bituminoso lo spessore è di 5 cm;
2. *Binder*: Funge da collegamento fra Base e Usura è un misto bituminoso con spessore di 8 cm.
3. *Base*: Fondazione del pacchetto in conglomerato bituminoso lo spessore è di 15 cm;
4. Limite della strada (*Road verge*): Zona adiacente gli strati in bitume di spessore pari a 28 cm e larghezza fino a completamento della piattaforma;
5. Strato granulare: È l'ultimo strato della sovrastruttura; il materiale di cui è costituito tale strato è il misto granulare con uno spessore di 50 cm;
6. Corpo del rilevato stradale (*Core Embankment*): Strato di spessore variabile che si adatta alle caratteristiche del suolo.

Mentre gli elementi necessari per la sicurezza stradale sono:

1. Guard Rail: in acciaio e di altezza 95 cm;
2. Newjersey: In conglomerato cementizio armato e con misure sezionali standard.

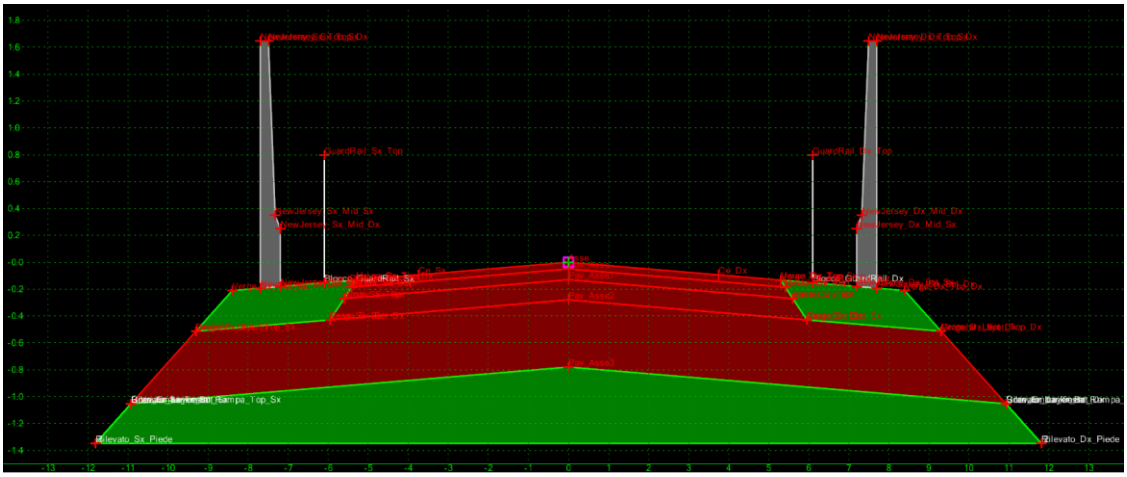

Fig. 43: Sezione Tipo in rilevato Semplice in Open Rail Designer

Sezione con pannelli in terra armata

La base di partenza è simile a quella in rilevato semplice, la differenza sta nei componenti verticali situati ai bordi di ciascuno strato (Fig. 44). Essi rappresentano i pannelli che confinano le terre armate, modellati con lo scopo di legarsi al terreno facendone variare la lunghezza in direzione verticale. La terra armata è usata nei pressi dell'intersezione ferrovia-strada in modo da evitare che le scarpate dei due solidi infrastrutturali si intersechino. La chiusura tra rilevato con scarpata semplice e rilevato in terra armata è stata riprodotta attraverso un rilevato tronco-conico in sabbia.

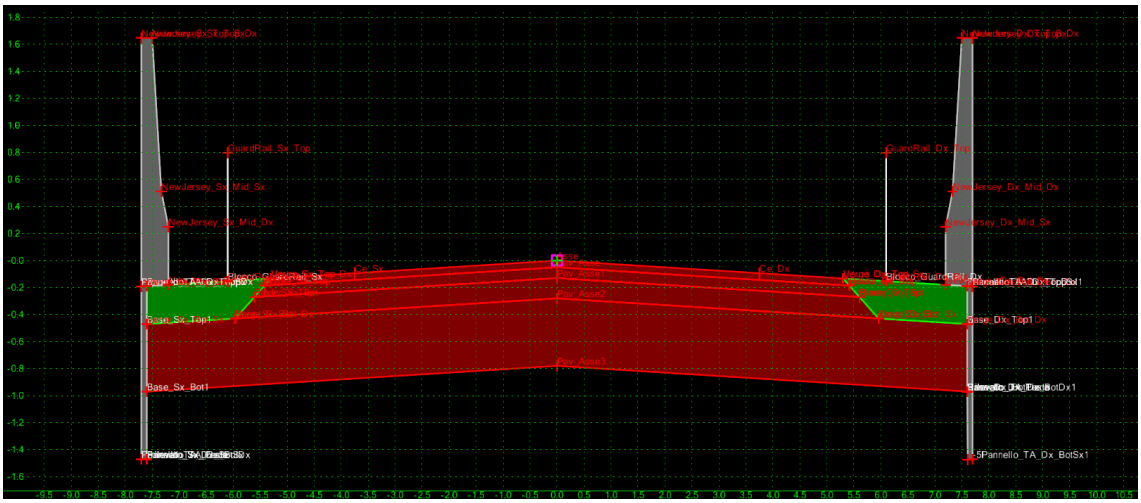

Fig. 44: Sezione Tipo in con pannelli per la terra armata.

Sezione nel sovrappasso:

Quando la sezione stradale è in corrispondenza dell'opera d'arte deve legarsi alla soletta in calcestruzzo dell'opera d'arte. Pertanto la sezione è costituita dal pacchetto legato in conglomerato bituminoso, dal *road verge* in misto granulare e dal guard-rail (Fig. 45).

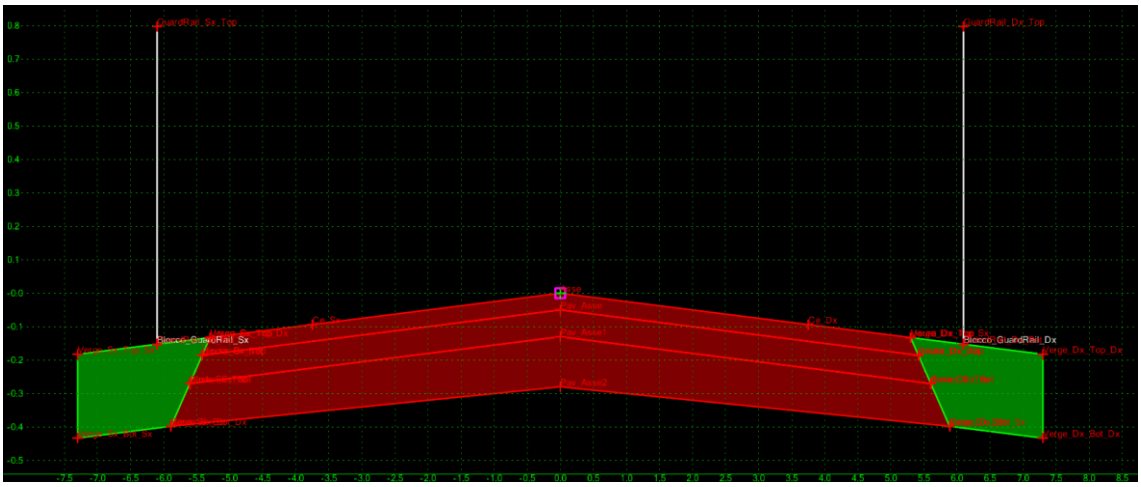

Fig. 45: Sezione tipo nel sovrappasso.

3.3.3 Creazione modello 3D del sovrappasso ferroviario (OBR05)

Il modello è stato realizzato con le classiche tecniche di OpenRail Designer, le rampe e i muri di terra armata sono stati modellati mediante la relativa creazione di un *corridoio* e impostando il *Template Drop* con le corrette progressive di progetto. Oltre la modellazione delle rampe è stato importato un file con formato .ifc contenente l'opera d'arte realizzata in Tekla Structures®.

OpenRail Designer dà la possibilità di adoperare il *Multi-Model Views* per una visualizzazione dinamica; questo comando permette di aprire più schermate di visualizzazione che consentono di analizzare un componente e contemporaneamente osservarlo in tutte le direzioni; questo aspetto è molto importante al fine di capire se la modellazione è corretta. Analizzando infatti il comportamento delle sezioni lungo il tracciato ci si può accorgere di eventuali errori.

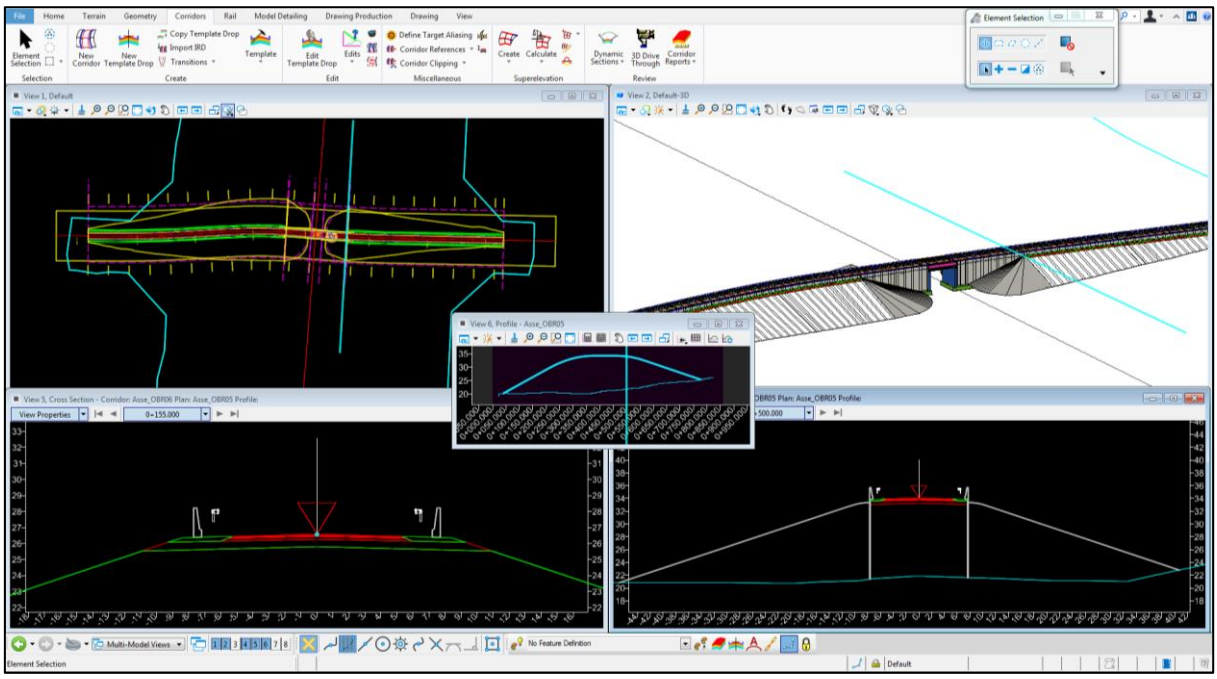

Fig. 46: Modello dell'overbridge OBR05

In Fig. 46 si nota che nel quadrante in basso a destra è mostrata la sezione stradale alla progressiva 0+500.000 luogo in cui è presente la soluzione con terra armata e cono di chiusura. In basso a sinistra è invece rappresentata la sezione in rilevato semplice.

Nelle tre schermate in alto, da sinistra verso destra, sono presenti rispettivamente corridoio del tracciato stradale, livelletta e modello tridimensionale dell'intero sovrappasso.

3.4 Federazione dei modelli con Navisworks

La federazione dei modelli è un processo di unione virtuale dei progetti, provenienti da vari software, in un unico ambiente. In ambito infrastrutturale esistono molte discipline che si devono affiancare nella costruzione di un'opera: strutturali, idrauliche e costruzioni sono solo alcune di queste.

Da ciò ne scaturisce la presenza di un numero di team di lavoro più o meno ampio, a loro volta operanti prima sui singoli modelli dedicati al proprio settore di competenza e, successivamente, messi in relazione con gli altri, così da condividere i propri elaborati e integrarli in un unico ambiente.

Una volta uniti, i modelli possono presentare delle interferenze e sovrapposizioni; questo tipo di analisi è stata affrontata da Autodesk fornendo Navisworks Manage del comando *Clash Detective*, col quale è possibile risolvere queste difficoltà. Come in seguito si avrà modo di comprendere, anche BIM 360 ha la possibilità, attraverso la l'ambiente *in cloud*, di federare più modelli e di identificarne le interferenze reciproche, ma nel presente elaborato di Tesi tale piattaforma verrà analizzata in termini di *Document Management* con lo scopo di esaminare la struttura da assegnare al *Common Data Environment*, indispensabile nella pratica professionale.

In passato non era presente una piattaforma unica dove poter analizzare i singoli modelli e la maggior parte delle comparazioni dei progetti era eseguita attraverso delle riunioni dove i vari team esplicavano il loro lavoro. Oggigiorno la direzione che si sta percorrendo è quella di condividere il lavoro all'interno di una piattaforma web privata in cui il *Tecnical Manager* ha pieno accesso a tutti i modelli e attraverso un *visualizzatore* può unirli ed editarli per rilevare eventuali interferenze o incongruenze, correggere gli errori e restituire report alle persone presenti nell'iter progettuale.

3.4.1 Importazione del modello Al Gharbia Mainline (GMB)

La linea principale è stata modellata con l'utilizzo di OpenRail Designer, con il quale è stato possibile salvare il file in formato proprietario *.dgn*.
Navisworks riesce a leggere questo formato, tuttavia è necessario creare un ulteriore file *.dgn* che contenga esclusivamente il modello 3D; l'architettura di Navisworks è infatti di tipo tridimensionale parametrica con organizzazione ad albero funzionale e, pertanto, necessita in input di un modello tridimensionale.
Una volta importato il file, questo è stato analizzato indagando sull'eventuale perdita dei dati; proprio in questa fase si è compresa la non perfetta interoperabilità tra le due software house.
La perdita di informazioni è stato approfondito insieme al team di Saipem S.p.A. contattando alcuni specialisti nel settore; di seguito verranno esposti nel dettaglio i riscontri sulla perdita e mantenimento dei dati nel passaggio da un software all'altro:

- la geometria tridimensionale dei componenti è stata mantenuta intatta rispettando fedelmente il progetto di partenza. Vengono inoltre mantenuti i *levels* di OpenRail Designer (analoghi dei *layer* di AutoCAD) con i rispettivi colori;
- non si ha la possibilità di *editing* dell'oggetto: tutte le informazioni di tipo geometrico (altezze, aree, volumi) vengono di fatto perdute all'interno del modello di Navisworks;
- un'altra perdita importante è relativa alle *feature* stabilite su OpenRail Designer. Nella modellazione si sono infatti imposte alcune caratteristiche al componente, ad esempio il nome, il materiale, il fornitore etc.; tali informazioni non vengono riportate nel visualizzatore probabilmente a causa della diversa architettura dei software.

A causa della perdita di informazioni è stato effettuato un secondo tentativo di importazione. OpenRail Designer dà infatti la possibilità di trasformare il modello tridimensionale il formato *.dgn* nel formato .dwg. Impostando tutti i *settaggi* necessari alla trasformazione si è in seguito proceduto all'import del file in Navisworks così da avere una compatibilità totale dei formati, provenienti dalla stessa software house(Autodesk). Attraverso l'analisi del modello con il nuovo formato si è visto che l'interoperabilità non è stata garantita a pieno in quanto si sono perse le informazioni sui *layer* creati in ORD.
Un'altra procedura implementata per risolvere gli aspetti legati all'interoperabilità è stata quella di trasformare il modello in formato non proprietario ".ifc".
Questa fase ha creato una serie di complicazioni: OpenRail Designer® esporta infatti in formato .ifc4, quest'ultimo purtroppo non mantiene le proprietà in Navisworks. Per tale motivo si è deciso

di trasformare il modello *.dgn* nella versione 2x3 del formato.*ifc* mediante l'uso di un altro software Bentley, ossia OpernBuildings Designer.

Anche con questa versione del formato *.ifc* il risultato ottenuto è stato insoddisfacente: il modello generato, nonostante la corretta lettura da parte di Navisworks, non contiene le informazioni dell'opera, sia in termini di nomi associati ai componenti, sia per quanto concerne le informazioni di natura geometrica.

Si è deciso pertanto di mantenere il formato tridimensionale originario (ossia il *.dwg* modificato, come detto in precedenza) e di importalo direttamente in Navisworks. La visualizzazione del modello viene mostrata nell'immagine seguente:

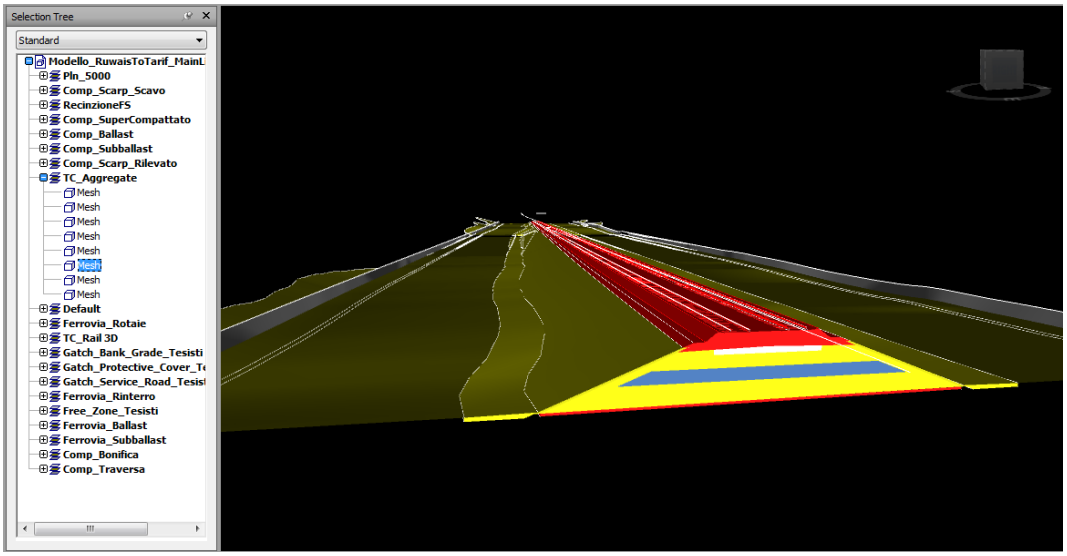

Fig. 47: Modello della main line visualizzato in Navisworks

3.4.2 Importazione dell'OverBridge

Il secondo modello che viene importato nel visualizzatore è quello relativo all'OBR05, anch'esso creato con OpenRail Designer; da ciò ne consegue che sono presenti le stesse tematiche descritte poc'anzi. Infine l'opera d'arte del sovrappasso viene federata in Navisworks utilizzando direttamente l'estensione ".ifc" perché si è appurata la piena compatibilità dei modelli provenienti da Tekla Structure.

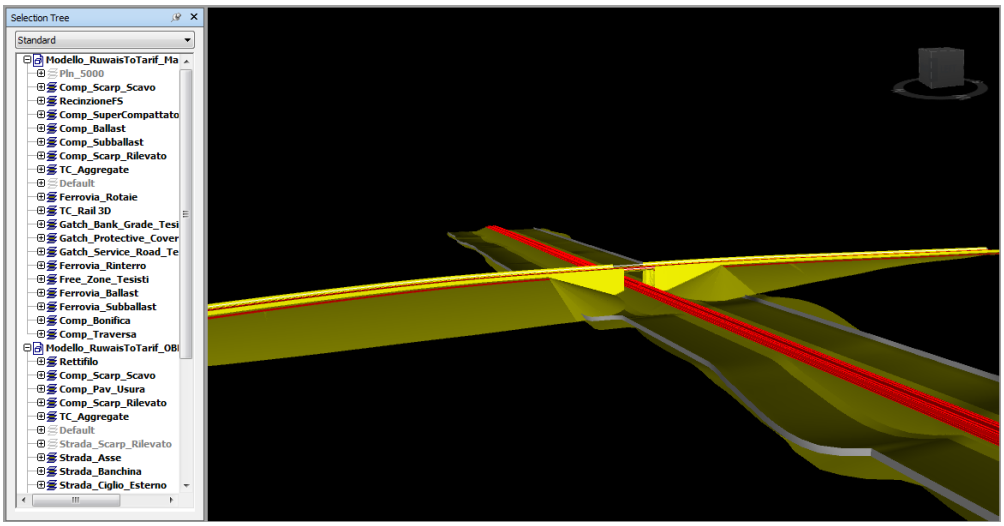

Fig. 48: Modello federato Main Line e OverBridge

3.4.3 Unione dei modelli: Clash Detective

Il comando in questione prende il nome di *Clash Detective* ed ha la funzione di confrontare la geometria dei modelli selezionati ricercando eventuali sovrapposizioni. Queste interferenze vengono riportate in un report e analizzate dall'utilizzatore che decide se esse rappresentano un'incongruenza o derivano da piccole sovrapposizioni di carattere computazionale e, di conseguenza, trascurabili.

Lanciando il test vengono riscontrate numerose interferenze, la più importante è quella relativa all'intersezione fra il cono di chiusura del rilevato stradale e la barriera di delimitazione dell'area del corpo ferroviario. L'interferenza nasce ovviamente dalla sovrapposizione di due modelli progettati separatamente e che vanno nella realtà opportunamente adeguati l'uno rispetto all'altro.

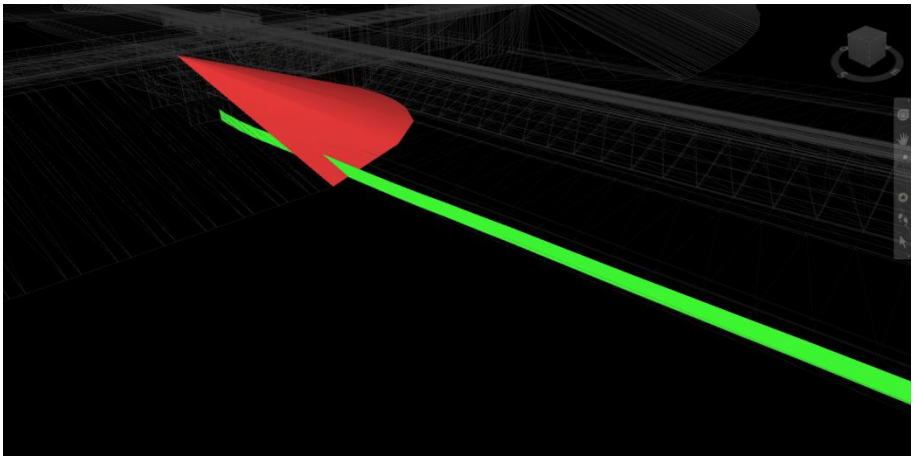

Fig. 49: Esempio di *Clash detection* tra rilevato tronco-conico e recinzione ferrovia

In questo caso l'operazione da fare consiste nel ritornare in OpenRail Designer e modificare l'andamento della recinzione ferroviaria, ritagliando la parte che entra in conflitto con la geometria del rilevato.

Questo semplice esempio porta alla luce il beneficio che si trae dall'uso del *clash detective*. I modelli infatti provenienti da progetti diversi possono avere delle incongruenze non spesso riscontrabili in fase progettuale; sfruttando la potenzialità di questo comando è quindi possibile risolvere queste incoerenze a monte, così da evitare incomprensioni nelle fasi successive del progetto.

4. Analisi *as design*: calcolo tempi (4D) e costi (5D)

4.1 Il CESMM 4: obiettivo e metodologia

Il CESMM, acronimo di *Civil Engineering Standard Measurement Method*, è utilizzato per la formulazione del Bill of Quantities (BoQ, ossia un computo delle quantità e dei costi) in tutti i lavori relativi esclusivamente al settore dell'Ingegneria Civile. Il CESMM nasce come standard britannico, avvalendosi di una propria commissione di professionisti e di un proprio metodo per la misura delle quantità e delle lavorazioni, e negli anni è diventato un punto di riferimento globale ampiamente utilizzato.
Il CESMM 4 ha tre prerogative:

- ha lo scopo di essere utilizzato solo nei lavori di Ingegneria Civile o lavorazioni di altra natura che possano essere comunque afferenti o interferenti con essa;
- è un documento di tipo *contract neutral*, ossia utilizzabile per qualsiasi condizione contrattuale, inclusi il NEC (New Engineering Contract), il FIDIC (Fédération Internationale des Ingénieurs-Conseils) e l'ICC (Infrastructure Conditions of Contract)[5]; a tal fine è comunque necessario che il responsabile della compilazione del BoQ specifichi, in un opportuna sezione di questo documento (detto *Preamble*), quali siano i ruoli delle varie figure in gioco, sia in termini di committenza dei lavori che come società appaltatrici, in quanto variano le responsabilità e i ruoli delle singole figure professionali;
- il documento è definito *National Standard neutral*, cioè tutti i riferimenti alle normative inglesi sono stati rimossi dal CESMM 4, rendendolo quindi applicabile in tutte le nazioni e per tutte le tipologie di opere ad eccezione di due: la costruzione stradale e la miscela del calcestruzzo.

Il CESMM4 perviene a questi obiettivi grazie all'uso della classificazione delle lavorazioni (*Work Classification*). Quest'ultima definisce:

- l'informazione da dare alle parti d'opera, classificate attraverso "elenco di voci";
- le unità di misura con cui le quantità di ciascun articolo vengono espresse;
- come una lavorazione viene misurata, al fine di poterne calcolare le quantità.

[5] Fonte: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/CESMM4

Applicazione della Work Classification

La Work Classification divide le lavorazioni comunemente incontrate nell'ambito dell'ingegneria civile in 26 classi, elencate in Fig. 50:

Section 8
Work classification

Class A: General items, 14
Class B: Ground investigation, 18
Class C: Geotechnical and other specialist processes, 26
Class D: Demolition and site clearance, 30
Class E: Earthworks, 32
Class F: In situ concrete, 38
Class G: Concrete ancillaries, 42
Class H: Precast concrete, 46
Class I: Pipework – pipes, 48
Class J: Pipework – fittings and valves, 50
Class K: Pipework – manholes and pipework ancillaries, 52
Class L: Pipework – supports and protection, ancillaries to laying and excavation, 56
Class M: Structural metalwork, 60
Class N: Miscellaneous metalwork, 62
Class O: Timber, 64
Class P: Piles, 66
Class Q: Piling ancillaries, 70
Class R: Roads and pavings, 74
Class S: Rail track, 78
Class T: Tunnels, 84
Class U: Brickwork, blockwork and masonry, 90
Class V: Painting, 94
Class W: Waterproofing, 96
Class X: Miscellaneous work, 98
Class Y: Sewer and water main renovation and ancillary works, 100
Class Z: Simple building works incidental to civil engineering works, 104

Fig. 50: Suddivisione in classi del CESMM 4

Ciascuna classe comprende fino a 3 divisioni, ognuna delle quali costituita da livelli successivi di dettaglio. Ogni divisione comprende fino a 8 voci descrittive.

Ne consegue che all'interno di un BoQ è presente una lista di articoli costituita da una lettera e tre numeri, dove la lettera sta ad identificare la tipologia di lavoro (CLASSE) mentre i numeri servono a descrivere il singolo elemento e le sue caratteristiche (geometriche, compositive, etc.), rendendo pertanto univoca la descrizione del componente.

Per fisare meglio le idee viene riportato un breve esempio; si analizza la CLASSE H che indica il *calcestruzzo prefabbricato* (Fig. 51), essa contiene 3 divisioni:

1. La prima sottoclasse, indicata da un numero, riguarda la tipologia di elemento, ossia trave, pilastro, piastra, ecc;
2. La seconda riguarda la dimensione con cui l'elemento viene misurato; travi e pilastri si misurano attraverso la loro lunghezza, mentre le piastre vengono identificate dalla loro area; altre entità strutturali in calcestruzzo prefabbricato vengono invece classificate con la loro sezione trasversale;
3. La terza sottoclasse riguarda invece la massa di ciascun elemento

CLASS H: PRECAST CONCRETE — **CLASS H**

Includes: Manufacture, erection, joining and fixing of precast concrete units
Excludes: Post-tensioned prestressing (included in class G)
Precast concrete pipework (included in classes I and J)
Precast concrete manholes, catchpits and gullies (included in class K)
Precast concrete piles (included in classes P and Q)
Precast concrete paving, kerbs and traffic sign supports (included in class R)
Precast concrete tunnel linings (included in class T)
Precast concrete blockwork (included in class U)
Precast concrete fencing (included in class X)

FIRST DIVISION	SECOND DIVISION	THIRD DIVISION	MEASUREMENT RULES	DEFINITION RULES	COVERAGE RULES	ADDITIONAL DESCRIPTION RULES
1 Beams nr **2** Prestressed pre-tensioned beams nr **3** Prestressed post-tensioned beams nr **4** Columns nr	**1** Length: not exceeding 5 m **2** 5–7 m **3** 7–10 m **4** 10–15 m **5** 15–20 m **6** 20–30 m **7** exceeding 30 m	**1** Mass: not exceeding 250 kg **2** 250–500 kg **3** 500 kg–1 t **4** 1–2 t **5** 2–5 t **6** 5–10 t **7** 10–20 t **8** stated exceeding 20 t		**D1** The mass used for classification in the third division shall be the mass of each unit. **D2** Concrete components which are cast other than in their final position shall generally be classed as *precast concrete* units. **D3** Where site precasting of units is adopted for reasons other than to obtain multiple use of formwork and the nature of the work is characteristic of in situ concrete, but involves the movement of the cast units into their final positions, the units shall be classed as *in situ concrete* and items given in class A for the Temporary Works associated with the movement of the units.	**C1** Items for precast concrete shall be deemed to include reinforcement, formwork, joints and finishes.	**A1** The position in the Works and specification of the concrete to be used in each type of precast unit shall be stated in item descriptions. **A2** Item descriptions shall state the mark or type number of each precast concrete unit. Units with different dimensions shall be given different mark or type numbers. **A3** Particulars of tendons and prestressing shall be stated in item descriptions for prestressed pre-tensioned units. **A4** The cross-section type and principal dimensions shall be stated in item descriptions for *beams, columns, segmental units, units for subways, culverts, ducts, copings, sills and weir blocks*. **A5** The average thickness shall be stated in item descriptions for *slabs*. **A6** The mass per metre shall be stated in item descriptions for *units for subways, culverts, ducts, copings, sills and weir blocks*.
5 Slabs nr	**1** Area: not exceeding 1 m^2 **2** 1–4 m^2 **3** 4–15 m^2 **4** 15–50 m^2 **5** exceeding 50 m^2					
6 Segmental units nr						
7 Units for subways, culverts and ducts m			**M1** The length measured for *units for subways, culverts and ducts and for copings, sills and weir blocks* shall be the total length of identical units.			
8 Copings, sills and weir blocks m	**1** Cross-sectional area: not exceeding 0.1 m^2 **2** 0.1–0.5 m^2 **3** 0.5–1 m^2 **4** exceeding 1 m^2					

Fig. 51 Classe H, calcestruzzo prefabbricato. Scheda fornita dal CESMM 4

Come si può osservare dalla **Fig. 51**, oltre alla descrizione di base di ciascun elemento, vengono riportate quattro colonne, utili alla completa descrizione della voce da riportare:

1) regole di misurazione (*Measurement rules*), ovvero una descrizione aggiuntiva sul metodo con cui le quantità vanno computate e misurate;
2) regole di definizione (*Definition rules*): servono a definire i limiti applicativi delle voci nonché le estensioni operative in esse incluse. Ad esempio la Pulizia generale del sito (Fig. 52), *General site clearance*, comprende la demolizione e la rimozione di tutti gli oggetti e di altre ostruzioni che si intende espressamente rimuovere dal sito (ad esempio rifiuti, erbacce, etc.) ad eccezione di tutte le altre ostruzioni per cui sia richiesta una voce a parte.
3) regole annesse alla descrizione (*Coverage rules*): dichiarano quali sono le operazioni che un articolo ricopre al suo interno pur non essendo nel codice esplicitamente definito. Ad

esempio, definiscono che nella pulizia del sito sia compresa, se prevista da contratto, anche la rimozione di tutte le radici e piante di qualunque diametro;

4) *additional description rules*: regole di descrizione addizionale.

CLASS D: DEMOLITION AND SITE CLEARANCE

Includes: Demolition and removal of natural and artificial articles, objects and obstructions which are above the Original Surface
Excludes: Removal of articles, objects, obstructions and materials (other than tree roots) at or below the Original Surface (included in classes C, E, I, J, K, L, R, T, X and Y)

FIRST DIVISION	SECOND DIVISION	THIRD DIVISION	MEASUREMENT RULES	DEFINITION RULES
1 Site clearance	**1** General clearance ha **2** Invasive plant species m^2			**D1** *General clearance* shall include the demolition and removal of all articles, objects and obstructions which are expressly required to be cleared, except those for which separate items are given as set out in this class. **D2** *Invasive plant species* shall include any plant whose control is governed by legislation and which is treated by herbicidal or chemical process.

Fig. 52: Site Clearance. Focus sulle Definition rules

Codifica delle voci

Per maggiore semplicità ogni articolo della *Work Classification* viene caratterizzato da un codice alfanumerico costituito da 1 lettera (classe) e 3 numeri (rispettivamente prima, seconda e terza divisione). Riprendendo il caso del calcestruzzo prefabbricato visto in precedenza (Fig. 51), il codice H 136 indica:

- Classe H: calcestruzzo prefabbricato;
- 1: travi;
- 3: lunghezza compresa tra i 7-10 m;
- 6: peso compreso tra 5 – 10 t

Il simbolo “ * ” indica tutti i numeri compresi nella medesima divisione, ad esempio:
H 1 3 * vuol dire che sono compresi tutti i codici da H 1 3 1 fino ad H 1 3 8 (compresi)

4.1.1 Utilizzo del CESMM 4 per la costruzione di un database

Per il presente elaborato di Tesi, la codifica del CESMM 4 è stata utilizzata al fine di creare un database che potesse adattarsi alla Al Gharbia Mainline.

Il tratto in cui si è svolta l'analisi riguarda una porzione della line indicata con il codice CF06 (Cut&Fill), per esso si sono individuate Work Breakdown Structure, "WBS: Embankment" e "WBS: OverBridge".

Prima di andare a descrivere in dettaglio ogni singola parte d'opera della WBS è necessario fare un piccolo excursus sul significato delle Work Breakdown Structure.

Descrizione WBS

Il Project Management Institute nella terza edizione della "Guida al Project Management Body of Knowledge" pone la seguente definizione[6]:

"Work Breakdown Structure (WBS) - Struttura di scomposizione del lavoro"

‹‹*Scomposizione gerarchica* orientata verso i *deliverable* (cioè i prodotti finiti e da consegnare) di un lavoro che deve essere eseguito dal gruppo di Progetto per realizzare gli obiettivi del Progetto e creare i *deliverable* richiesti. Organizza e definisce l'ambito complessivo del Progetto. Ogni livello discendente rappresenta una definizione sempre più dettagliata del lavoro del Progetto. La WBS viene scomposta in Work Package. L'orientamento verso i deliverable fa in modo che siano inclusi sia i deliverable interni che quelli esterni.››

Le WBS rappresentano uno dei più importanti strumenti a disposizione per la gestione e la pianificazione dei progetti: essi sono una scomposizione strutturata del lavoro in ogni sua minima parte, infatti lo scopo è quello di arrivare a un risultato senza aver dimenticato nulla lungo il cammino.

A volte l'enorme complessità dei progetti infrastrutturali pone la necessità di spacchettare in "parti di progetto" con complessità decrescenti e dettaglio sempre maggiore, in modo da avere una visione generale del progetto e al contempo un'analisi dettagliata di tutti i singoli risultati da ottenere.

Non potendo analizzare tutte le parti d'opera del progetto, l'analisi in questo studio si è limitata fino al terzo livello del *work package*.

Nel caso studio la strutturazione delle WBS è stata costruita adattandola alle fase di cantierizzazione e in modo da poter essere associate a una codifica del CESMM4, in questo modo è stato possibile creare un collegamento tra WBS, analisi dei tempi di cantiere (4D) e valutazioni dei prezzi (5D).

[6] Definizione ottenuta dall'articolo [19] che deriva dal PMBOK-2004

Schema di partenza: descrizione delle fasi di lavoro e codifica

Sulla base dei documenti a disposizione per il progetto GMB, conclusosi nel 2015, si è realizzata una sequenza delle fasi di lavoro ricreando tutte le lavorazioni realizzate per i tratti di rilevato ferroviario presenti in tale opera.

È doveroso asserire che le fasi di lavoro per la costruzione di un rilevato ferroviario sono, in numero e complessità, maggiori rispetto a quelle ipotizzate in fase di studio; tuttavia si è ritenuto partire da una struttura meno complessa ma ad ogni modo efficace e coerente con lo scopo prefissato, ossia utilizzare un elenco di voci, noto come *item list* che consenta di creare le basi per un computo dei tempi e costi. Ogni opera è stata definita attraverso una struttura a tre livelli:

- Una definizione della WBS relativa al rilevato (EMB) e al sovrappasso ferroviario(OBR);
- Un secondo livello, mostra la codifica effettuata attraverso due numeri (EMB**06.02)**, il primo indica il tratto di appartenenza (CF**06**) mentre il secondo individua la lavorazione (**02**.Site clearance; **03**.Core embankment laying etc.)
- Il terzo livello identifica la singola parte d'opera da compiere per ogni lavorazione, codificata con il codice reperito dal manuale CESMM 4, accompagnata da una sintetica descrizione (EMB06.02.**D110:Pulizia generale del sito**)

Nei paragrafi successivi verranno descritte tutte le fasi d'opera e verrà mostrato lo schema a blocchi con l'associazione WBS-Codice CESMM4.

4.1.2 WBS: Embankment CF06 (EMB06)

In questa WBS sono riportate tutte le fasi e le tecnologie utilizzate per la costruzione del rilevato ferroviario. L'embankment è strutturato a strati di spessore e materiale variabile, in ogni livello è adottata una tecnologia di lavorazione ben specifica al fine di ottenere le caratteristiche fisico-meccaniche prestabilite in fase progettuale. Ogni singolo strato svolge un compito ben preciso, come il ballast, che possiede capacità portanti e nel contempo assorbe le vibrazioni prodotte dal convoglio in movimento. In dettaglio vengono descritte tette le lavorazioni e le prove di collaudo effettuate sul singolo strato.

Indagini del sito (Site survey)

Tale voce comprende parte delle operazioni che vengono effettuate in fase preliminare per conoscere le caratteristiche del terreno presente in sito. Tra quelle possibili sono state individuate:

1. Il campionamento del suolo tramite carotaggio;
2. La prova penetrometrica statica (CPT);
3. Prove di laboratorio in grado caratterizzare il terreno (classificazione del terreno in base alla granulometria, contenuto d'acqua ottimale, etc.).

Pulizia del sito (Site clearance)

Questa procedura indica le operazioni da effettuare per la pulizia dell'area di cantiere, le più importanti sono:

1. La pulizia generale del sito per rimuovere sterpaglie, erbacce ed altri rifiuti presenti in loco;
2. Asportazione di piante invasive presenti nell'area, compresi alberi e arbusti che interferiscano con l'area di cantiere;
3. Sbancamento di opere stradali interferenti con il tracciato;
4. La risoluzione delle interferenze con le condotte interrate ed aeree.

Preparazione del corpo rilevato (Core embankment)

Le lavorazioni eseguite in questa fase vengono realizzate prima dell'effettiva formazione del rilevato, in quanto il terreno presente in situ nel tratto GMB è spesso di caratteristiche meccaniche non idonee per la diretta costruzione di un'opera ferroviaria.

Nel progetto della *Al Gharbia Mainline* la fase di stabilizzazione del terreno al di sotto del rilevato è stata portata a termine attraverso la rimozione di uno strato di sabbia, variabile a seconda delle caratteristiche del terreno, e sostituito con *gatch* granulato compattato.

Il materiale importato va a formare il cassonetto avente uno spessore massimo di 40 e circondato da geotessuto che funge da filtro. Tale strato è stato realizzato quando il terreno originario è risultato incompatibile con i requisiti minimi progettuali.

All'interno della voce relativa alla preparazione del corpo del rilevato si è ritenuto opportuno inglobare anche la costruzione delle strade di accesso, in quanto all'interno di un cantiere è necessario garantire una viabilità ottimale ai macchinari, il materiale utilizzato è sempre il *gatch* compattato. Terminata la lavorazione, vengono effettuati i test per verificare il rispetto dei requisiti imposti in fase progettuale, i test sono:

- test di densità nucleare o il metodo del cono di sabbia (uno ogni 100 m), volti a misurare la densità a secco del terreno;
- la prova di carico su piastra (Plate Loading Test, PLT) al fine di misurare il modulo di deformazione del terreno; questo test è stato effettuato ogni 200 m;
- la prova CBR (California Bearing Ratio), misura la portanza del terreno, eseguito ogni 500m.
- controllo topografico al termine delle operazioni, per la verifica degli spessori stabiliti.

Posa in opera del rilevato (Core embankment laying)

La fase d'opera inizia con il trasporto e la creazione di cumuli di terreno a bordo cantiere per la formazione del rilevato. In seguito, si procede con la formazione di strati che, nel caso del tratto di ferrovia GMB, sono dello spessore di 50 cm. La lavorazione è conclusa con la compattazione degli strati e l'esecuzione dei test. Nel caso della posa in opera del rilevato i test effettuati sono stati la prova di densità in sito e la prova di carico su piastra.

Posa in opera del bank grade

L'involucro del rilevato è formato da uno strato di *gatch* spesso 50 cm realizzato ai bordi del rilevato, in modo da garantirne una maggiore stabilità e durabilità. Tale elemento funzionale, infatti, confina lateralmente la sabbia del corpo del rilevato a partire dalle fasi di costruzione, permettendone una compattazione ottimale, e come involucro esterno la protegge dall'erosione da vento e pioggia.

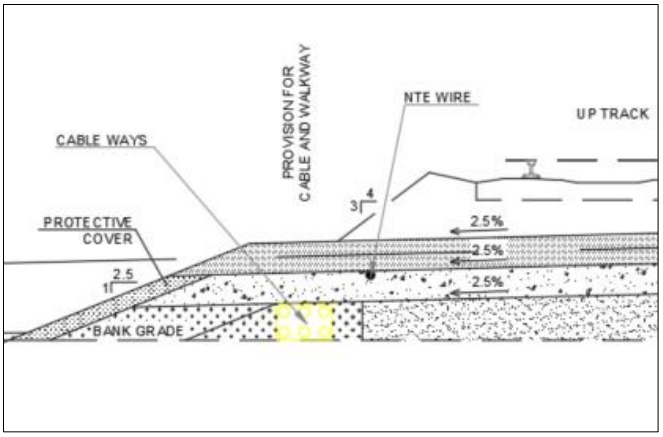

Fig. 53 Particolare costruttivo della sezione: strati costitutivi del rilevato

Strato di ricoprimento del rilevato (Protective cover)

Dopo la posa e la compattazione degli strati di rilevato, un'ulteriore fase è dedicata alla messa in opera dello strato protettivo, ossia un ulteriore strato di copertura volto a proteggere la scarpata del rilevato.

Preparazione dello strato di sottofondo (Subgrade)

La formazione dello strato di sottofondo, di altezza pari a 30 cm, è stata eseguita con materiale gatch, questa volta però maggiormente compattato rispetto agli strati precedenti in modo da ottenere caratteristiche meccaniche superiori. Le prove eseguite per convalidare la compattazione sono state:

- test di densità nucleare o il metodo del cono di sabbia (uno ogni 200 m), volto a misurare la densità a secco del terreno;
- la prova di carico su piastra (*Plate Loading Test*, PLT) al fine di misurare il modulo di deformazione del terreno; questo test è stato effettuato ogni 1000 m;
- la prova CBR (*California Bearing Ratio*), misura la portanza del terreno, eseguito ogni 1000 m.

Le prove seguono degli schemi precisi, in modo che sul tracciato venga eseguito il maggior numero di prove possibile, anziché concentrarsi su punti isolati ove effettuare tutti i test. Nella Fig. 54 vengono evidenziate le collocazioni delle prove per gli strati di sottofondo e sotto-massicciata:

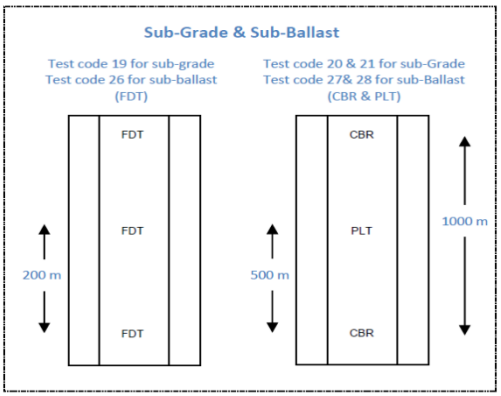

Fig. 54 Schema di prove in situ per il tracciato GMB relative al *subgrade* e *subballast*

Posa in opera della sottomassicciata (Subballast)

La prima lavorazione che interessa questa fase d'opera è il controllo topografico, eseguito al termine della compattazione del *subgrade*, atta a verificare la quota di progetto. Terminata questa operazione, si procede alla creazione dei cumuli di materiale a bordo cantiere per la successiva messa in opera. In questo progetto il subballast è stato costruito con un misto di sabbia stabilizzata a cemento oppure materiale riciclato proveniente da demolizione di edifici in calcestruzzo, la scelta è fatta in funzione della disponibilità della materiale in loco; si sono usati questi materiali per garantire i requisiti minimi imposti dalle specifiche tecniche. La sottomassicciata presenta uno spessore di 30 cm ottenuto attraverso livellazione e compattazione, infine si eseguono le prove in sito che, come già osservato per le fasi di lavoro precedenti, sono:

- test di densità nucleare o il metodo del cono di sabbia (uno ogni 200 m), volto a misurare la densità a secco del terreno;
- la prova di carico su piastra (*Plate Loading Test*, PLT) al fine di misurare il modulo di deformazione del terreno; questo test è stato effettuato ogni 1000 m;
- la prova CBR (*California Bearing Ratio*), misura la portanza del terreno, eseguito ogni 1000 m.

Posa in opera del ballast

La posa in opera del ballast, effettuato per mezzo di una tramoggia contenente materiale inerte grossolano di diametro compreso tra 22,4 e 63 mm e di caratteristiche prestazionali note, è anch'essa da effettuarsi a seguito di un altro controllo topografico per la verifica degli spessori di rilevato sottostanti. In questo caso però la posa del ballast non avviene in un'unica tranche, come visto per le fasi d'opera precedenti, ma viene effettuata per uno spessore in genere di 30 cm (*bottom ballast*); eseguita questa operazione si esegue infatti la posa delle rotaie e traverse, previa livellazione eseguita tramite un grader e compattazione. Dopo aver eseguito la posa dei binari viene effettuata un'ulteriore lavorazione, ossia quella del rincalzo di ballast, effettuata per garantire che le traverse siano annegate nel ballast. Questa lavorazione è stata inglobata all'interno della posa dei binari e delle traverse, poiché comunque successiva alla formazione dello strato di ballast (*top of ballast*).

Posa in opera delle rotaie e traverse

Quest'ultima lavorazione prevede l'utilizzo di un treno di posa per l'installazione contemporanea delle traverse e dei binari, con la successiva installazione degli organi di ancoraggio. Come detto in precedenza l'ultima operazione è quella di utilizzare una rincalzatrice per formare uno strato di 20 cm di massicciata, questo avviene inducendo delle vibrazioni in modo da ridurre i vuoti e rendendo la massicciata più compatta. Si prevede inoltre per questa fase d'opera il taglio dei binari.

Nella Fig. 55 è proposto lo schema *a tre livelli* costruito per la formazione del rilevato:

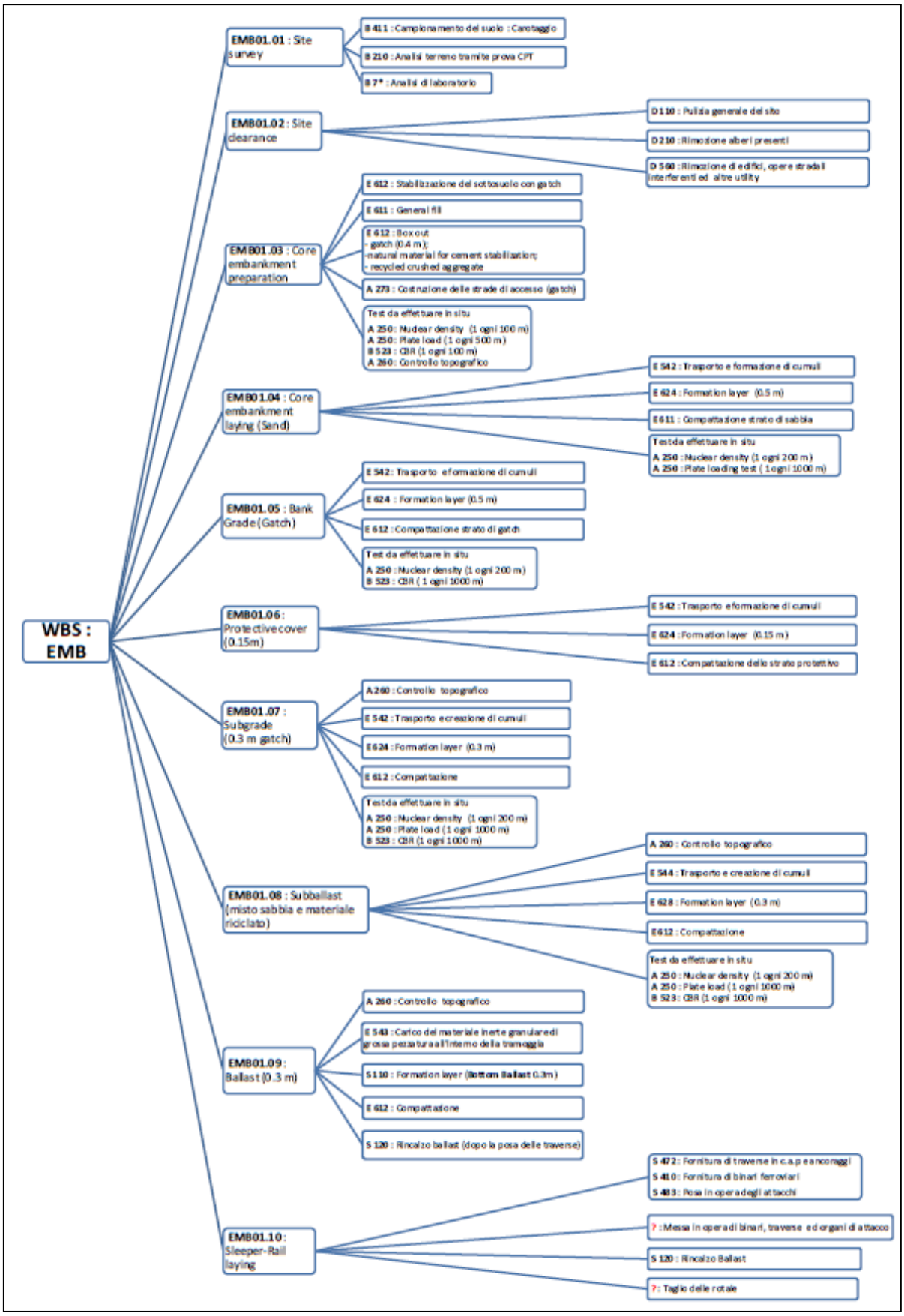

Fig. 55: WBS Rilevato: schema descrittivo a livelli e codifica CESMM 4

4.1.3 WBS: Opera d'arte dell'Overbridge (OBR05)

L'opera d'arte è quel manufatto, solitamente composto da elementi in calcestruzzo armato gettato in opera, che permette di poter creare un attraversamento stradale, ferroviario o pedonale. Per motivi di traffico e di sicurezza si è preferito adottare l'incrocio, tra ferrovia e strada, su più livelli in modo tale da non creare delle interferenze in fase di esercizio.
Per realizzare l'opera si devono rispettare dei franchi di sicurezza imposte dalle norme inoltre vi sono delle ulteriori prescrizioni nella fase di *indagine* che saranno descritte successivamente.
Le fasi che portano alla realizzazione del manufatto sono le seguenti:

Indagini del sito (Site survey)

Cosi come per l'*embankment* è necessaria un'indagine, atta a constatare le caratteristiche fisiche, meccaniche e idrauliche del suolo dove sorgerà l'opera. A differenza del caso precedente i sondaggi del suolo vengono eseguiti in modo circoscritto, su un volume detto "volume significativo", ossia quella porzione di terreno che è influenzato dall'opera (**Fig. 56: Volume di terreno influenzato dall'opera[9]** in **Fig. 56**), in particolare verranno eseguiti le seguenti analisi:

- Campionamento del suolo tramite carotaggio. Questo sondaggio è eseguito in ogni spigolo della fondazione più un sondaggio al centro, in tal modo si otterrà una distribuzione ottimale delle caratteristiche fisiche del sottosuolo.
- Analisi delle caratteristiche meccaniche attraverso prova CPT eseguita negli stessi punti di cui sopra.
- Prove di laboratorio per caratterizzare il terreno (fuso granulometrico, prova Proctor, etc.).

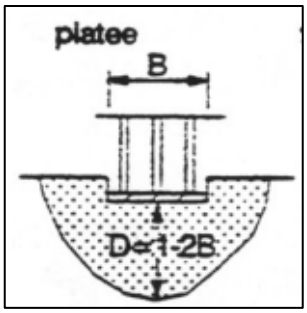

Fig. 56: Volume di terreno influenzato dall'opera[9]

Pulizia del sito (Site clearance)

Questa procedura è analoga alla pulizia nell'*embankment*, la differenza sta nella dimensione dell'area da trattare, infatti parte di questa viene già lavorata attraverso la pulizia dell'embankment. I costi di tale fase saranno inglobati nella WBS precedente ipotizzando che l'intera pulizia dell'area, dove sorgerà l'opera d'arte, sia già bonificata.

Scavo di sbancamento (Stripping)

Lo scavo di sbancamento viene eseguito per portare il livello del terreno alla quota di base, ossia la quota di progetto dalla quale verranno avviate tutte le fasi costruttive. In genere, per opere di dimensioni notevoli, lo scavo è molto profondo ed è per tale motivo che vengono costruite delle rampe di accesso che permettono ai mezzi di cantiere di accedere alla quota di appoggio.

Creato lo scavo si procede alla compattazione della base, questa fase in realtà non è una vera e propria compattazione ma serve per livellare e stabilizzare il terreno sottostante, questa lavorazione può essere eseguita attraverso passaggio dei cingoli dello scavatore stesso, se l'aerea è molto vasta si procede con la compattazione attraverso il rullo compattatore.

Formazione dello strato di posa (Magrone)

Una volta eseguito lo sbancamento è necessario realizzare un sottofondo pulito per poter eseguire le successive lavorazioni nel migliore dei modi, tale operazione consiste nel gettare uno strato di calcestruzzo povero di cemento, circa 150 kg al m^3, in tutta l'area di lavoro. Questo metodo presenta vari vantaggi, il primo è quello di avere un piano perfettamente liscio dove gli operai possono lavorare in maniera efficiente e sicura, un altro è di carattere tecnico, infatti su questo piano livellato verranno appoggiate, con eventuali distanziali, le armature metalliche della fondazione. La funzione del magrone sarà quella di isolare le armature dall'umidità del terreno prevenendone l'ossidazione. Lo spessore normalmente usato per questo strato è di circa 10 cm con interposta una rete metallica se i carichi soprastanti sono di notevole entità.

Realizzazione della fondazione a platea di spessore costante

Questo tipo di fondazione viene categorizzata come fondazione superficiale ed è quella che si adatta meglio a impedire i cedimenti differenziali, l'area di azione della fondazione è di 15.8 m x 12.6 m la quale consente di sfruttare in maniera migliore la capacità portante delle terre sottostanti. Per la realizzazione della fondazione si procede inizialmente stoccando tutte le armature metalliche in un'apposita zona, questa deve essere ben protetta da eventuali piogge e ristagni di acque, successivamente le armature verranno sagomate e montate in opera come da progetto. La fase successiva consiste nell'installazione dei casseri perimetrali, questi saranno ben ancorati al magrone in modo da sostenere le pressioni laterali dovute al getto in calcestruzzo, infatti l'altezza di 2 m della fondazione produce elevate spinte orizzontali. Prima di eseguire il getto in conglomerato cementizio si deve verifica, attraverso ispezione, che tutte le geometrie siano state rispettate. La quantità di calcestruzzo da gettare in opera è elevata, circa 400 m^3, per questo motivo bisognerà studiare bene le tempistiche del getto in caso che il materiale trasportato dallo stabilimento non stia in loco. In alternativa si può creare uno stabilimento provvisorio a

bordo cantiere cosi da facilitare l'emissione dell'enorme quantità di materiale. Il calcestruzzo verrà vibrato per eliminare l'aria contenuta all'interno della massa.
Seguirà una fase di maturazione del conglomerato nella quale si svilupperanno le capacità portanti minime per poter effettuare la rimozione dei casseri, solitamente non meno di 7gg, in tali giorni verranno monitorate le condizioni ambientali e in caso di giornate avverse si interviene correggendo quanto più possibile temperatura e umidità.
Infine, la superfice superiore della fondazione verrà usato come nuovo piano di posa per poter costruire l'armatura metallica dei muri di spalla.

Costruzione dei muri di spalla o fusto

Il fusto, insieme alla fondazione forma un muro a mensola (Fig. 57), la funzione principale dell'elemento è quella di trasferire i carichi provenienti dalle strutture superiori (travi, soletta, opera stradale ecc.) alla fondazione e successivamente al suolo. Per realizzare il muro di spalla, vista la notevole altezza di 11.55 m, è necessario anteporre un ponteggio a impalcato, in tal modo sarà possibile istallare le armature metalliche. L'armatura alla base è ancorata all'elemento sottostante attraverso dei ferri di ripresa, quest'ultimi sono opportunamente annegati nel calcestruzzo della fondazione. Completata la fase di costruzione della gabbia metallica si procede alla casseratura dell'intero manufatto, in un secondo tempo verrà effettuato il getto della miscela legante con vibro-finitura finale, seguirà una fase di maturazione e relativa rimozione dei casseri.

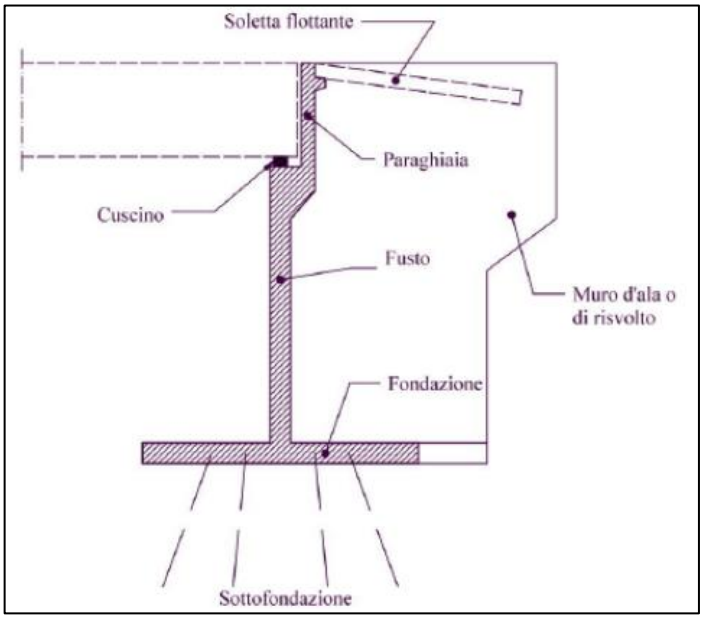

Fig. 57: Schema tipo dell'elemento strutturale [12]

Posa travature pretese

Le travi ad "I" pretese vengono costruite in fabbrica, le dimensioni della sezione sono di 65 cm x 138 cm con larghezza dell'anima pari a 20 cm e spessore delle ali pari a 20 cm mentre la lunghezza delle travi è uguale a 17.3 m. Questi elementi vengono trasportati in cantiere per mezzo di auto-articolati e successivamente istallati con l'utilizzo di gru. Le travi sono poggiate su degli *shock adsorber* in grado di mitigare gli eventuali movimenti scaturiti da un sisma.

Esecuzione del traverso per blindaggio delle travi

Il traverso è quell'elemento strutturale che serve per rendere iperstatico il sistema di travi, infatti esso è un elemento che mette in connessione trasversalmente le travi, così che viene creato un apparato monolitico e si previene la perdita di stabilita per semplice sfilamento. Quest'elemento deve essere gettato in opera dopo che si è completa la fase di posa di tutte le travi, vengono posizionati i casseri, formata la gabbia di collegamento e successivamente effettuato il getto, a completa maturazione si eliminano i casseri.

Completamento della spalla (paraghiaia)

Per facilitare le lavorazioni precedenti, sia sulle travi che sul traverso, viene lasciata una porzione della spalla incompleta, in seguito il muro verrà completato con un elemento che prende il nome di paraghiaia (Fig. 58), che costituisce il proseguo del muro di spalla. Il paraghiaia non ha solo lo scopo di contenere le terre ma ha anche una funzione portante, i carichi viaggiano attraverso l'elemento per scaricarsi al suolo.

Cosi come gli altri elementi strutturali in calcestruzzo questo è formato da una armatura metallica, sufficientemente ancorata. Il getto e le fasi successive si ripetono in maniera identica alle strutture trattate precedentemente.

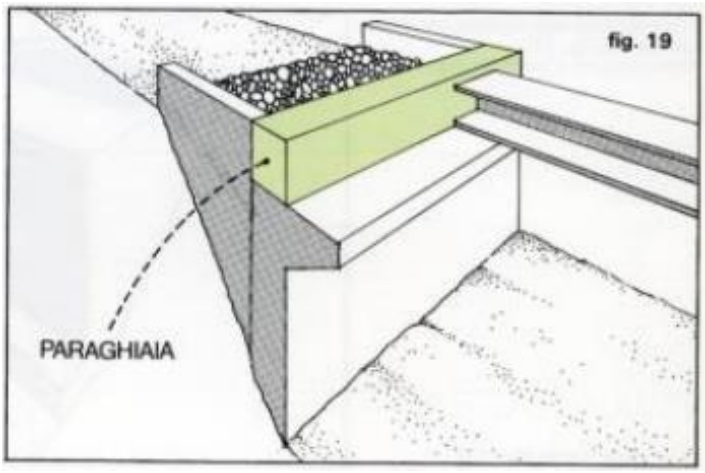

Fig. 58: completamento del fusto mediante paraghiaia [12]

Composizione della soletta

La soletta è la parte terminale dell'opera d'arte, la soluzione costruttiva applicata nel caso in esame prevede l'uso delle lastre predalle. Proggettualmente si è preferito l'uso delle predalle in modo da eliminare la fase di casseratura, infatti tali elementi possono essere visti come dei casseri a perdere. Le predalle vengono completate con specifica armatura e successivamente avviene un getto di completamento fino ad ottenere uno spessore di 23 cm.

Terminata la costruzione della soletta si provedde a smantellare tutti i casseri, inoltre viene smontato anche il ponteggio a impalcato.

Nella Fig. 59 è proposto lo schema *a tre livelli* costruito per la formazione dell'opera d'arte dell'OverBridge:

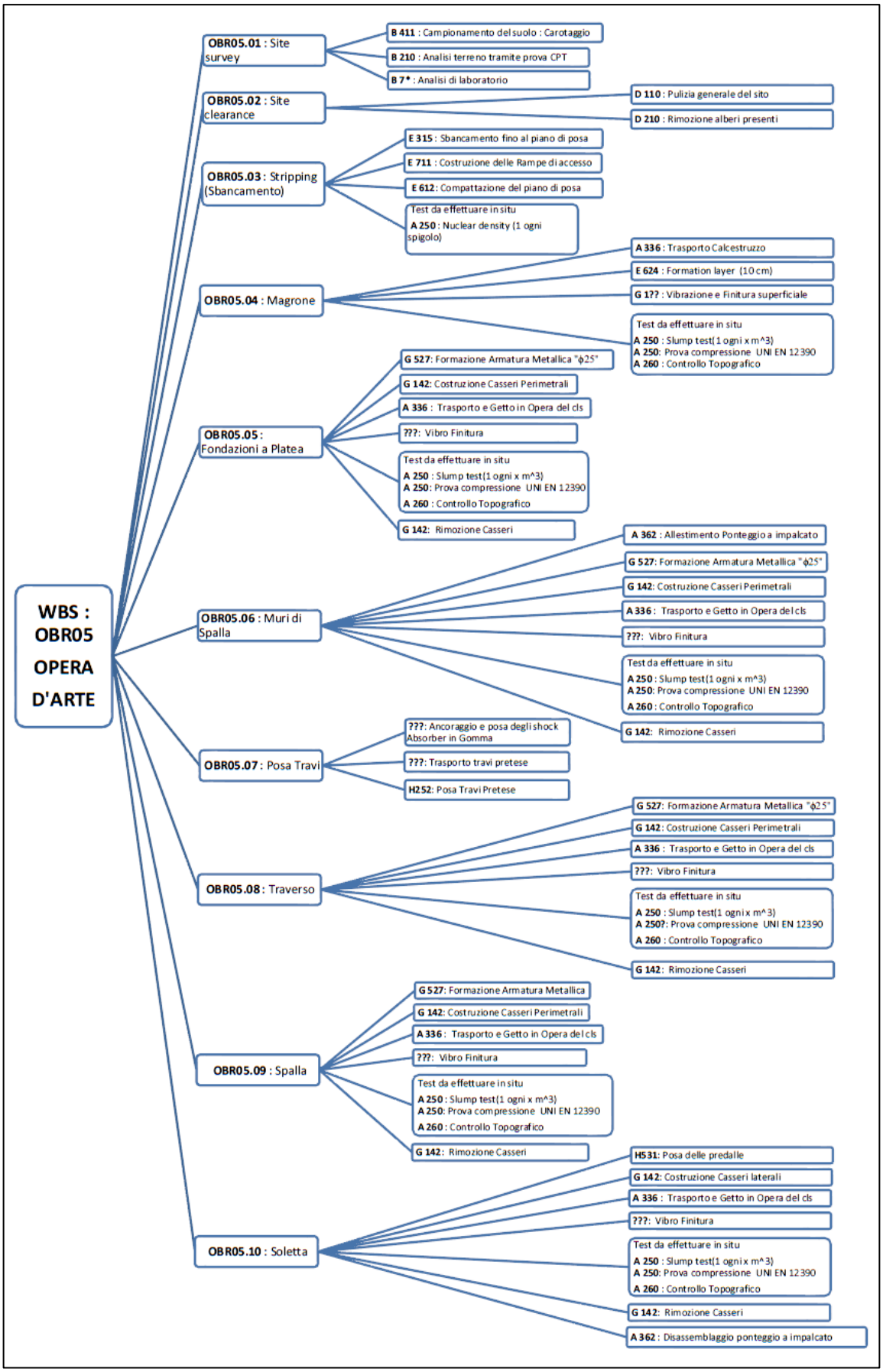

Fig. 59: WBS OBR05 Opera d'arte: schema descrittivo a livelli e codifica CESMM 4

4.1.4 WBS: Rampe dell'Overbridge (OBR05)

Le rampe hanno la funzione di completare l'incrocio a livello sfalsato, infatti per poter superare la ferrovia si è creata un'opera d'arte che ha la funzione di bypassare la linea, le rampe fungono da completamento al manufatto. Esse portano la quota di progetto, dal piano campagna all'opera d'arte, in maniera graduale.

Fig. 60: Immagine rampa OBR05 (Google Heart)

Le operazioni che bisogna eseguire per la realizzazione delle rampe sono le seguenti:

Indagini del sito & Pulizia del sito

Le operazioni di indagine e pulizia del sito vengono effettuate in contemporanea con l'opera d'arte, questo avviene perché la lunghezza delle rampe è limitata (circa 700 m), per motivi di tempo e costo conviene effettuare queste lavorazioni nel momento in cui si eseguono per l'opera d'arte.

Preparazione del corpo rilevato & Posa in opera del rilevato

Queste due fasi sono le medesime descritte al paragrafo precedente "WBS: Embankment (EMB)" per cui si rimanda il lettore a tali sezioni.

Costruzione delle terre armate

Le terre armate (Fig. 61) sono una soluzione strutturale alternativa alle scarpate del rilevato. Quando il rilevato diventa molto alto la scarpata avrà uno sviluppo notevole, per ovviare a ciò viene creato un muro che nel caso in esame è stato realizzato in terra armata. In genere i muri in terra armata vengono costruiti a partire da dei panelli prefabbricati, questi vengono montati in sequenza fino al raggiungimento dell'altezza voluta, in dettaglio vengono riportate le tecnologie e le fasi di costruzione.

1. Per appoggiare il pannello prefabbricato al suolo è necessario formare un piano di posa livellato e stabile, per tale motivo si crea un **cordolo** in calcestruzzo magro che funge da fondazione del paramento.
2. In ogni pannello sono presenti due bandelle metalliche e sono il cuore strutturale del sistema, infatti esse reagiscono ad attrito e permettono al muro di rimanere in equilibrio e di contenere le terre di riempimento.
3. Collocata una fila di pannelli, da entrambi i lati della rampa, si procede al **riempimento** di terre selezionate. È' importante la scelta del materiale di rinterro in quanto l'azione che viene scambiata con la bandella deve essere definita completamente.
4. Le terre devono essere efficientemente **compattate**. Se il materiale presenta un contenuto d'acqua diverso da quello ottimale determinato con prova Proctor, questo deve essere modificato inumidendo ulteriormente il terreno o lasciandolo asciugare, a seconda che il valore si rispettivamente superiore od inferiore all'ottimo di Proctor. Tecnicamente si creano strati di 50 cm sui quali vengono fatti passare dei rulli vibranti, il numero di passaggi è stabilito da progetto o campo prova.
5. Il processo di montaggio dei pannelli, riempimento e compattazione viene ripetuto fino ad arrivare alla quota finale prestabilita.

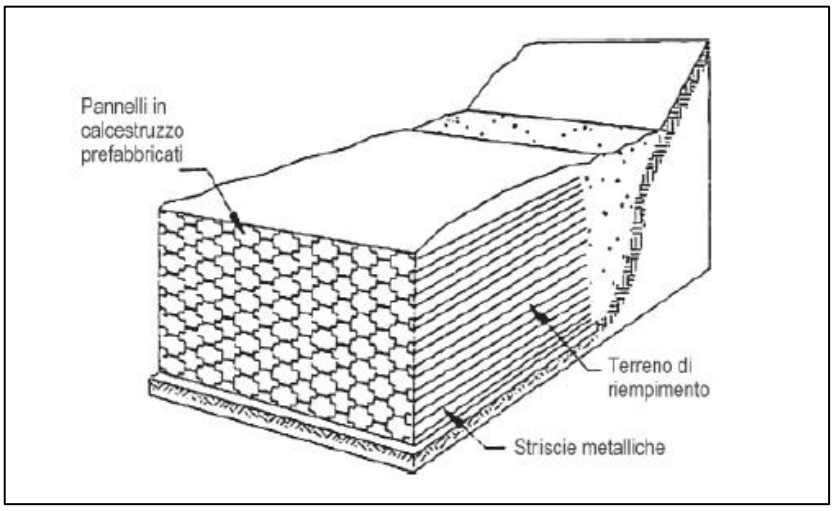

Fig. 61: Rappresentazione grafica di una terra armata [13]

Creazione della fondazione in misto granulare (Granular laying)

La fondazione in misto granulare rappresenta il primo strato appartenete alla sovrastruttura flessibile del corpo stradale, questo strato è costruito sopra il corpo del rilevato. La funzione cardine della fondazione è quella di ridistribuire i carichi sugli elementi sottostanti. Le sabbie che compongono la fondazione devono presentare ottime caratteristiche fisico-chimiche, se così non fosse si ricorre all'uso di un legante idraulico per migliorarne il comportamento. Inoltre il

materiale utilizzato deve essere abbastanza permeabile per evitare il ristagno di acqua. La messa in opera di questo strato avviene con le stesse procedure menzionate per il corpo del rilevato.

Formazione dello strato di base in conglomerato bituminoso

Questo strato fa parte del pacchetto strutturale in conglomerato bituminoso, esso rappresenta il primo strato legato a contatto con il terreno di fondazione. Il Bitume, contenuto nel conglomerato, fornisce caratteristiche visco elastiche all'elemento che variano in funzione della temperatura, questo fa sì che il materiale si possa dilatare o accorciare senza subire lesioni significative. La funzione strutturale di questo strato porta ad avere strati di spessore significativo intorno ai 15 cm, lo strato viene formato attraverso una vibro finitrice (Fig. 62), previo trasporto e carico in tramoggia della massa, infine si provvede al costipamento attraverso rullo vibrante e al controllo topografico.

Fig. 62: Vibrofinitrice CAT AP655F [14]

Formazione dello strato di collegamento (Binder) in conglomerato bituminoso

La funzione di questo elemento e di mero collegamento fra lo strato di usura e lo strato di base, tale componente ha la capacità di trasmettere le azioni verticali allo strato sottostante senza che subisca significative deformazioni permanenti. Solitamente il mix design è formato da sabbia, graniglie frantumate e filler con aggiunta del legante bituminosa. Inoltre per creare un collegamento migliore fra la base e il binder viene colata sulla superficie una miscela di bitume detta "mano d'attacco". La stesura segue le stesse procedure adottate per lo strato di base.

Formazione dello strato di usura in conglomerato bituminoso

La funzione di questo elemento e di mero collegamento fra lo strato di usura e lo strato di base, tale componente ha la capacità di trasmettere le azioni verticali allo strato sottostante senza che subisca significative deformazioni permanenti. Solitamente il mix design è formato da sabbia, graniglie frantumate e filler con aggiunta del legante bituminosa. Inoltre per creare un

collegamento migliore fra la base e il binder viene colata sulla superficie una miscela di bitume detta “mano d’attacco”. La stesura segue le stesse procedure adottate per lo strato di base.

Costruzione della zona adiacente al pacchetto bituminoso (Verge)

Il verge (Fig. 63) è la zona adiacente al pacchetto strutturare in conglomerato bituminoso, esso è un franco di sicurezza dove vengono installate le unita accessorie che completano la piattaforma stradale. Il materiale costituente questo strato è in terra selezionata e opportunamente costipata, prima di effettuare le lavorazioni verranno ancorate al suolo le piastre di supporto del guardrail. L’operazione di costipamento viene eseguita manualmente con piastre vibrante vista l’esigua larghezza del componente.

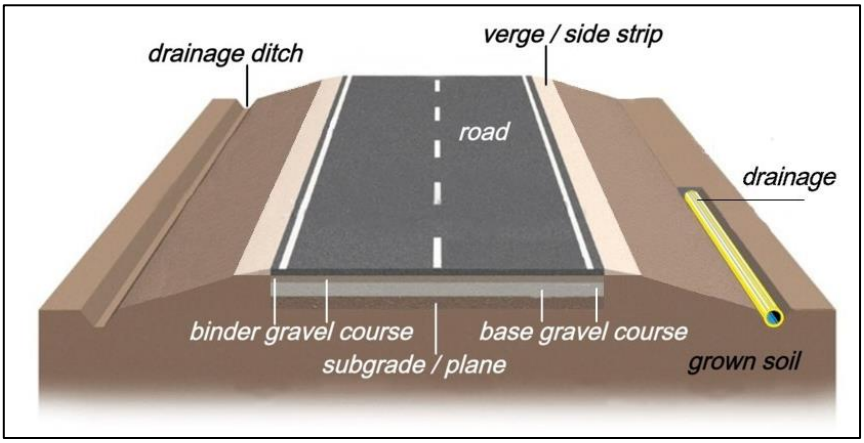

Fig. 63: Rappresentazione grafica della composizione della strada sul sovrappasso [15]

Posa guardrail e newjersey

Il guardrail viene fissato al supporto attraverso imbullonatura, mentre il newjersey e appoggiato direttamente al suolo. Si è scelto di attuare un sistema di sicurezza misto in quanto l’altezza del rilevato raggiunge quote elevate. Con il sistema doppio il funzionamento di trattenuta di eventuali impatti è più efficiente, il guardrail viene deformato con l’urto e assorbe l’energia cinetica del veicolo mentre il newjersey ha il compito di arrestare completamente il mezzo. Le fasi di realizzazione prevedono il trasporto in cantiere degli elementi con successiva posa e ancoraggio.

Nella Fig. 64 è proposto lo schema *a tre livelli* costruito per la formazione delle rampe dell’OverBridge:

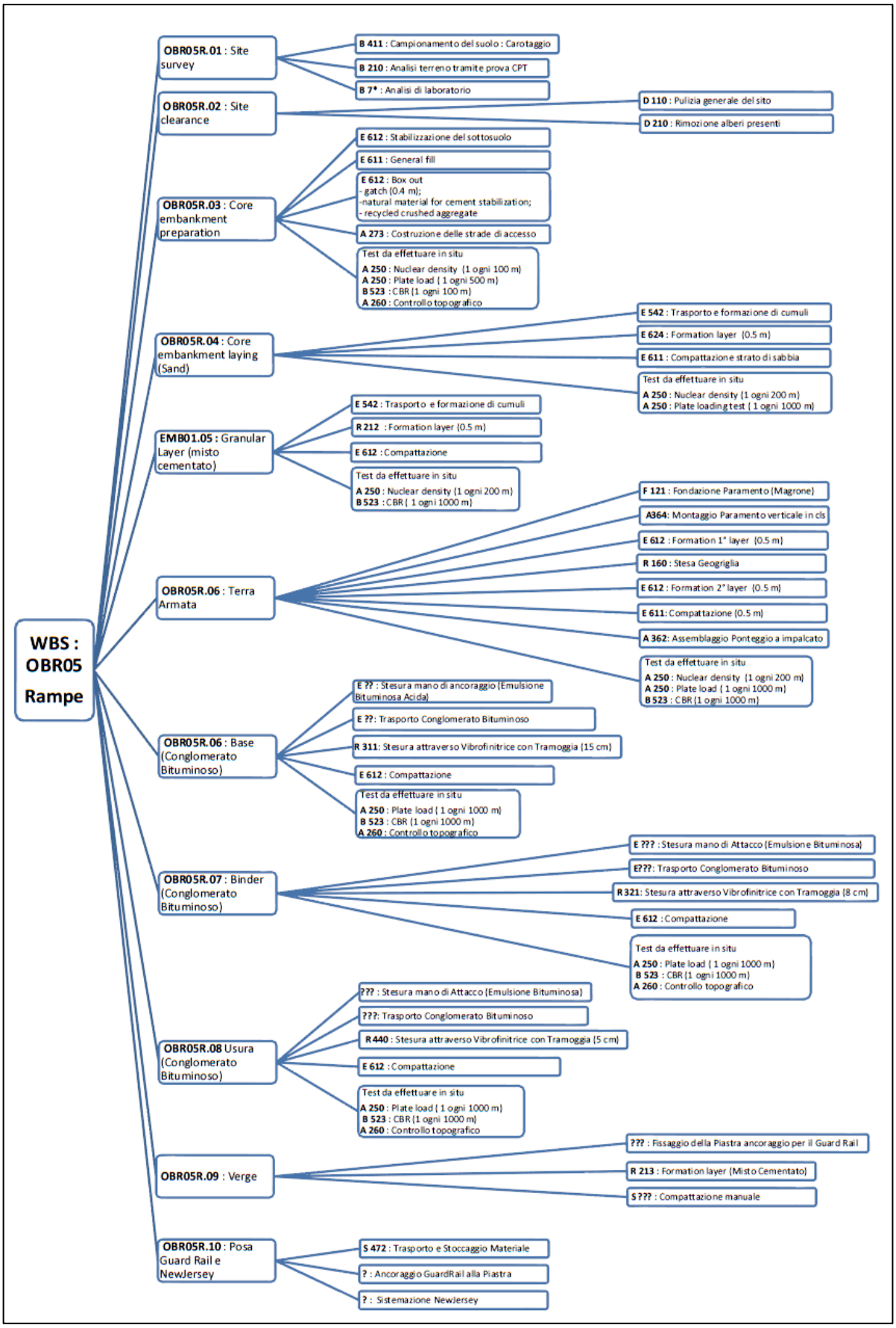

Fig. 64: WBS OBR05 Rampe: schema descrittivo a livelli e codifica CESMM 4

4.2 Produzione oraria

In questo paragrafo si effettua uno studio per individuare le tempistiche necessarie alla realizzazione di ogni singolo elemento della linea ferroviaria. L'analisi è stata effettuata per un tratto della GMB di lunghezza pari a 15,407 km denominato CF06. I tempi sono calcolati sulla base della produzione oraria ossia la capacità di portare a termine, in un determinato tempo, un definito quantitativo di lavoro.

La composizione della squadra di mezzi è stata formulata sulla base di valutazioni teoriche. Per ciascun componente della ferrovia è stata definita la squadra "tipo" indicata in **Tabella 1**.

Tabella 1: Mezzi utilizzati per la formazione del rilevato e sovrastruttura ferroviaria.

Mezzi	Box Out	Cut Volume	Fill Volume	Subgrade	Subballast	Ballast	Posa Binari
Dozer D8T	x	x	-	-	-	-	-
Pala caricatrice 950M	x	-	x	x	x	x	-
Dumper 740 EJ/Truck	x	-	x	x	x	x	-
Grader 14M3	x	-	x	x	x	x	-
Rullo CAT CS56	x	x	x	x	x	x	-
Escavatore Komatsu	*	*	*	*	*	-	-
Rincalzatrice Ballast (Matisa)	-	-	-	-	-	-	x
Treno di posa binari La Meccanica CGF	-	-	-	-	-	-	x

Il simbolo "*" è rieferito all'escavatore, utilizzato sia come ulteriore componente della flotta, sia nel caso di notevoli altezze del rilevato, dove si rende necessario per la costruzione delle rampe di accesso.

La potenzialità produttiva di una macchina viene esplicata attraverso dei parametri intrinsechi, come il rendimento, il tempo medio di ciclo e la quantità media di materiale movimentato in ogni ciclo. In dettaglio vengono indicate le formulazioni per il calcolo della produzione oraria di ogni mezzo che compone una squadra.

4.2.1 Produzione oraria Pala 950M

La pala caricatrice CAT® 950M è utilizzata principalmente per caricare il materiale di cava all'interno dei Dumper/Truck; la trazione è su gomma per permettere una maggiore agilità e produttività, la capacità nominale della benna è pari a 9,2 m^3 con carico e scarico frontale. La produzione viene calcolata sulla base della seguenti equazioni:

$$P_{o,pala} = \frac{1}{\overline{t_c}} \cdot Q_e \cdot \eta$$

$$Q_e = Q \cdot fill\ factor$$

$$\eta = \eta_H \cdot \eta_{CL} \cdot \eta_C$$

$$\overline{t_c} = t_{cb} + t_f + t_t$$

Il carico effettivo della benna è valutato in funzione del fattore di riempimento (bucket fill factor) che dipende dalla la tipologia del terreno; nello specifico, trattandosi di materiale sabbioso granulare si è deciso di utilizzare un fill factor pari a 0,9. Il rendimento della macchina durante il suo utilizzo è stimato considerando il *rendimento orario* funzione dell'organizzazione di cantiere (η_H =83%), il *rendimento climatico* che dipende dal clima locale e il *rendimento specifico di cantiere* η_C collegato alla struttura organizzativa della squadra.

L'analisi temporale è espressa attraverso il tempo ciclo, somma del *tempo ciclo base* (carico, scarico e relative manovre), e due termini correttivi per lo spostamento del carico fuori dallo spazio minimo.

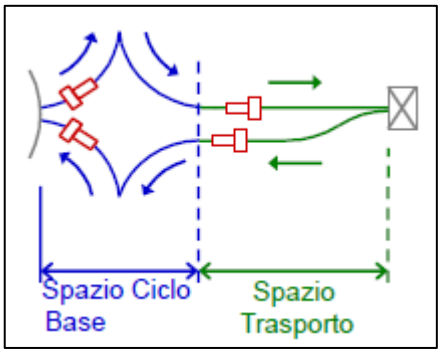

Fig. 65: Manovre di lavoro Pala Caricatrice CAT 950M [16]

La produzione oraria del dumper è necessaria al fine di ottenere il numero di veicoli che massimizza il rendimento della pala caricatrice, in modo tale che questa lavori sempre. L'equazione alla base del calcolo è la seguente:

$$P_{o,dumper} = \frac{1}{\bar{t_c}} \cdot Q_e \cdot \eta$$

$$Q_e = Q \cdot fill\ factor$$

La capacità effettiva viene ricavata sulla base del carico nominale (23 m^3) applicando un fattore di riempimento del 90%, mentre il rendimento è supposto pari al 71%. Il tempo ciclo del dumper è dato dalla somma tra *tempo fisso* (carico, scarico e relative manovre), questo è correlato al mezzo che effettua il riempimento (Pala caricatrice), e *tempo variabile,* esso è il tempo necessario per lo spostamento del mezzo dalla zona di carico alla zona di scarico e dipende dalla velocità e dal tracciato da percorrere.

$$\bar{t_c} = t_{fisso} + t_{variabile}$$

$$t_{carico,dumper} = \frac{Q_{e,dumper}}{Q_{e,pala}} \cdot \bar{t}_{c,pala}$$

$$t_{variabile} = \sum \frac{Distanza\ del\ perorso_i}{Velocità\ media\ del\ Dumper_i}$$

$$N_{dumper} = \frac{P_{o,pala}}{P_{o,dumper}}$$

Ottenuta lo produttività del dumper si può ricavare il numero di mezzi che massimizzano la produzione oraria della pala caricatrice.

4.2.2 Produzione oraria del Rullo CAT CS56

La funzione del rullo compattatore è quella di incrementare la densità del terreno (incremento di resistenza) avvicinando le particelle di materiale. L'energia necessaria per attuare il processo è esplicata con un'azione statica (dovuta al peso) e un'azione dinamica (dovuta al tamburo rotante) che varia in funzione dello spessore e del materiale utilizzato. La relazione che individua la produzione oraria è la seguente:

$$P_{rullo} = \frac{L \cdot V \cdot H}{P} \cdot \eta$$

Dove:

- L rappresenta la larghezza di compattazione del rullo pari a 2,14 m;
- V è la velocità di compattazione pari a 5,8 km/h;
- H indica lo spessore dello strato compattato;
- η è il rendimento, assunto pari a 0,75;
- P descrive il numero di passate necessarie per compattare lo strato.

4.2.3 Produzione oraria del Dozer D8T

Il dozer viene utilizzato principalmente per la pulizia dell'area di cantiere (Clearing & Grubbing) inoltre può essere impiegato per le fasi di scavo e trasporto del terreno per brevi distanze (Max. 100m). Per questa tipologia di mezzi la produzione oraria può essere calcolata per via analitica o utilizzando le curve di produzione fornite da "HandBook" della azienda produttrice.

La Fig. 66 mostra la curva di produzione di differenti mezzi in funzione della distanza di scavo, il valore di produzione oraria ricavato deve essere corretto attraverso dei fattori ricavati all'interno del manuale.

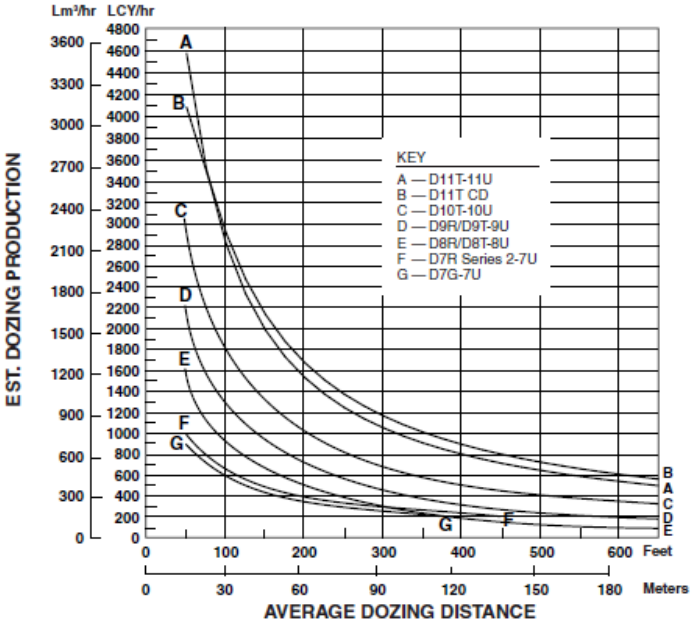

Fig. 66: Produzione oraria da Handbook Performance Caterpillar [17]

Il metodo analitico si bassa su equazioni fornite dal SAE (Society Automotive Engineering). La produzione oraria è ricavata a partire da:

$$P_{o,dozer} = \frac{1}{\overline{t_c}} \cdot Q_e \cdot \eta$$

$$Q_e = Q \cdot fill\ factor$$

$$\overline{t_c} = \frac{L_S}{V_1} + \frac{L_T}{V_2} + \frac{L_S + L_T}{V_3} + T_0 + T_m + 2T_P$$

$$L_T = \frac{larghezza\ corridoio - L_S}{2} + distanza\ di\ deposito$$

I parametri relativi ai mezzi sono ricavati dal manuale della Caterpillar [14]:

- L_S è la lunghezza del tratto che si percorre in posizione di taglio, pari al doppio della larghezza della lama, che per tale modello è pari a 7.88 m;
- L_T è la lunghezza media del tratto di trasporto del terreno:

La larghezza del corridoio è lo spazio tra le due recinzioni che delimitano l'area di cantiere mentre la distanza di deposito è quella lunghezza ulteriore da compiere per stoccare il materiale trasportato.

- V_1 è la velocità operativa durante lo scavo (per il modello in esame è pari a 3,4 km/h);
- V_2 è la velocità operativa durante il trasporto (nel caso specifico, pari a 6,1 km/h);
- V_3 è la velocità operativa di ritorno a vuoto (in questo caso, pari a 8 km/h);
- T_0 è il tempo necessario per abbassare la lama (1-2 s);
- T_m è il tempo per i cambi di velocità (4-5 s);
- T_p è il tempo per il cambio di direzione (circa 1 s per ciascun cambio).

4.2.4 Produzione oraria del Grader 14M3

Il grader (motolivellatrice) è un macchinario versatile in quanto permette di eseguire diverse lavorazioni come la finitura delle scarpate e livellazione di superfici. Il mezzo ha un telaio snodabile che permette di avere un'ottima manovrabilità e per tale motivo presenta una produzione oraria elevata.

La produttività viene espressa con formulazioni diverse in funzione del tipo di lavoro da eseguire, nel caso studio il mezzo è stato utilizzato per lo spandimento e la livellazione degli strati che portano alla seguente relazione:

$$P_{o,grader} = \frac{A \cdot V}{n} \cdot \eta$$

Nella formulazione "A" rappresenta l'area della sezione trasversale di lavoro, "V" è la velocità operativa, "n" indica il numero di passate e η è l'efficienza del macchinario.

4.2.1 Produzione oraria Escavatore Komatsu PC400LC-6

Lo scavatore viene usato in tutte le lavorazioni dove sono presenti scavi profondi e zone difficili da raggiungere. Un esempio di utilizzo è lo scavo sbancamento per la fondazione dell'opera d'arte dell'OBR05, oppure lo scavo e formazione delle rampe di accesso al rilevato. Inoltre il mezzo si presta a molte piccole lavorazioni quindi sarà quasi sempre presente in ogni componente da realizzare.

La produzione oraria viene calcolata sul tempo impiegato per il movimento del braccio per caricare e scaricare il materiale più la rotazione a benna carica e scarica. L'articolazione del braccio dipende da diversi fattori come la distanza dal *dumper*, altezza di scavo e altro; in questa analisi si è valutato un tempo medio pari a 20 secondi [18]. La produzione oraria viene espressa con la formula:

$$P_{o,dozer} = \frac{1}{\overline{t_c}} \cdot Q_e \cdot \eta$$

$$Q_e = Q \cdot fill\ factor$$

$$\overline{t_c} = t_{cb} + t_f$$

4.3 Analisi 5D: costi riferiti alle voci earthworks e trackworks

Per l'analisi sui costi di realizzazione dell'opera sono stati utilizzati i prezzi unitari riferiti alle materie prime e alla manodopera forniti da Saipem S.p.A.

La stima economica tiene conto delle lavorazioni necessarie per la costruzione del rilevato ferroviario (***earthworks***) e della sovrastruttura ferroviaria (***trackworks***) relative al CF06.

Un aspetto che ha contribuito alla loro formulazione è la strutturazione del cantiere e delle distanze dei punti di reperimento dei materiali necessari per la costruzione dell'opera; in particolare:

- Il *gatch*, utilizzato per la costruzione del rilevato, è stato importato da cave distanti 15 km dal cantiere;
- Il ballast presenta un costo notevolmente maggiorato che tiene conto del trasporto da cave distanti ben 400 km;
- Il costo della manodopera, relativamente alla costruzione di specifici componenti del rilevato e della sovrastruttura ferroviaria, risulta maggiore rispetto al costo del materiale. Ciò è riscontrabile sia per le lavorazioni in cui è necessario l'impiego di operai specializzati (ad es. la posa dei binari), che per la costruzione di componenti che necessitano un numero di ore di lavoro superiore (es. strato protettivo e recinzioni esterne).

4.3.1 Earthworks

In tale voce rientrano i componenti costituivi della parte sottostante la sovrastruttura ferroviaria:

- Cassonetto *(Box out)*, ossia un materiale che va a rimpiazzare lo strato di scotico presente in sito. Tale strato ha uno spessore di 40 cm al di sotto del rilevato ferroviario;
- Volume di scavo *(Cut Volume)*: all'interno di questa voce rientrano le operazioni di scavo e sbancamento;
- Volume di riempimento *(Fill Volume)*: in questa voce rientra la costruzione di tutti i componenti che fanno parte del rilevato ferroviario;
- Strade di servizio, ossia strade che sono state realizzate in primo luogo come strade di cantiere, in modo da permettere il transito delle macchine per la movimentazione del terreno; in seguito tali strade sono state utilizzate come strade di servizio, utilizzabili al fine di consentire il transito dei mezzi incaricati nelle operazioni di manutenzione della linea.
- Rilevato minimo in trincea *(Minimum core embankment)*, da sommare al fill, in quanto è un componente creato in ORD per modellare la sezione in trincea, dove bisogna garantire un rilevato minimo di altezza 50 cm;
- Strato contentivo interno, ossia l'involucro esterno del rilevato, in *gatch*;
- Strato protettivo esterno, esso è un ulteriore strato di *gatch* sovrapposto al precedente.
- Sottofondo, costituito da un grado di compattazione maggiore rispetto agli strati sottostanti;
- Sottomassicciata, anche questo strato rientra all'interno dei lavori in terra, in quanto costituito da materiale inerte riciclato, costituito perlopiù da calcestruzzo, opportunamente frantumato e selezionato prima dell'effettiva messa in opera.

In **Tabella 2** vengono mostrate le voci relative al costo dei componenti del rilevato:

Tabella 2: Costi unitari materiale/lavoro riferiti agli *Earthworks*

Componente	Costo unitario materiale (USD)	Costo unitario lavoro (USD)
Box out:	7	7
Scavo e sbancamento:	0	3
Costruzione del rilevato:	7	7
Strade di servizio:	7	7
Rilevato minimo (in trincea, da ORD):	7	7
Involucro esterno (*bank grade*):	7	9
Strato protettivo:	6	4
Sottofondo (*subgrade*):	8	8
Subballast:	12	8

4.3.2 Trackworks

In questa voce rientrano tutti i costi delle materie prime e del lavoro sostenuti per la realizzazione della sovrastruttura ferroviaria (Tabella 3):

Tabella 3: Costi materiale/lavoro riferiti ai *Trackworks*

Componente	Costo unitario materiale (USD)	Costo unitario lavoro (USD)
Ballast:	25	10
Posa dei binari:	108	160
Traverse:	60	15

Menzione a parte viene invece eseguita per la stima dei costi relativi alle recinzioni installate (Tabella 4), volte a garantire l'inaccessibilità alla linea ferroviaria da parte di persone non autorizzate.

Tabella 4: Costo materiale/lavoro riferito alle recinzioni esterne (*fences*)

Componente	Costo unitario materiale (USD)	Costo unitario lavoro (USD)
Recinzioni:	30	35

Analizzando la Tabella 3 e la Tabella 4 si osserva come la posa dei binari e l'installazione delle recinzioni siano lavorazioni in cui il costo del lavoro incide maggiormente rispetto a quello del materiale; nella costruzione del rilevato (**Tabella 2**), invece, il maggior costo del lavoro viene attribuito ad alcuni componenti da realizzare con maggiore accuratezza, ad esempio a causa di un grado di compattazione superiore rispetto ad altri e quindi di un numero di ore lavorative maggiore.

5. Simulazione 4D e 5D in Navisworks

Come già si è avuto modo di trattare in precedenza, anche la simulazione delle fasi di lavoro è un aspetto ampiamente sviluppato da Navisworks: tra le peculiarità del software sono da annoverare la possibilità di simulare tramite video le fasi di costruzione dell'opera, visualizzare le percentuali di completamento per ciascun componente, visualizzare l'ammontare del budget con l'avanzare delle fasi di realizzazione dell'opera. Queste sono infatti le principali funzionalità del software utilizzate in questa disamina. Le fasi di lavoro possono essere importate tramite file esternamente redatti, provenienti principalmente da Excel e Microsoft Project, quest'ultimo in grado di redigere cronoprogrammi leggibili in Navisworks per la simulazione della successione delle fasi di lavoro.
Nel presente studio è stato utilizzato Microsoft Excel mediante un foglio di lavoro appositamente strutturato, al cui interno sono state definite le operazioni di cantiere coerenti con le caratteristiche del modello federato 3D.

5.1 Simulazione della costruzione dell'opera

La simulazione delle tempistiche è stata effettuata sia per la ferrovia che per il sovrappasso ferroviario. Per la prima, oggetto di studio e quindi su cui si concentra maggiormente l'attenzione, è stato riportato un tratto di linea sufficientemente ampio da ipotizzare due squadre di lavoro in grado di agire contemporaneamente e partendo da progressive differenti così da non intralciarsi; per quanto concerne il sovrappasso, invece, tali fasi vengono comunque riportate ma prestando particolare attenzione alle fasi di costruzione dell'opera d'arte.
La struttura del file Excel per definire le tempistiche di progetto è stata impostata sulla base delle informazioni riportate dal modello federato, composto da file sia di OpenRail Designer (rampe e ferrovia) che di Tekla (opera d'arte): ciascuno componente del modello (ad esempio, *core embankment*) è costituito da una serie di parti (strati di spessore di 50 cm) la cui costruzione va opportunamente organizzata in successioni temporali coerenti con quelle della costruzione di un cantiere.

L'operazione in primo luogo effettuata consiste nella definizioni di gruppi, ovvero *set*, che riportassero i nomi di ciascun modello importato in Navisworks:

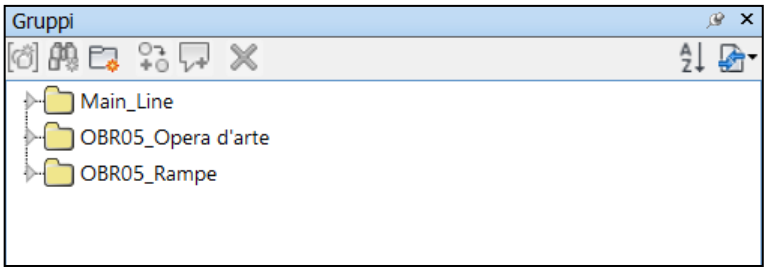

Fig. 67: Creazione di *set* in Navisworks

All'interno di ciascun gruppo sono contenuti i componenti riferiti alla struttura di appartenenza, come si evince dalla seguente immagine:

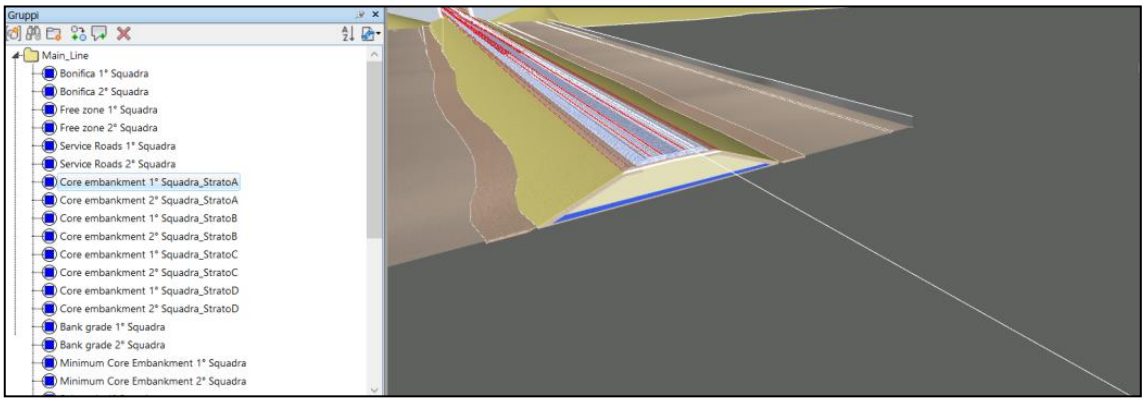

Fig. 68: Esempio di associazione tra gruppi e componenti del modello effettuato in Navisworks

Questo risulta essere il primo passaggio in grado di consentire l'associazione tra i componenti che provengono dalla modellazione in OpenRail Designer e l'interfaccia di Navisworks: quando infatti vengono importati i modelli, il software riporta l'elenco di tutti i componenti senza tuttavia distinguerli in base alle opere a cui essi appartengono. Ne consegue che il primo *step* è quello di associare i componenti ai gruppi cui essi appartengono.

Successivamente viene effettuata l'importazione del file Excel su cui si sono stabilite tutte le lavorazioni, la rispettiva durata e le date di inizio e fine lavori.

Task ID	Task Name	Giorno Inizio	Giorno termine
1	Bonifica Squadra 1	03/06/2012	05/06/2012
2	Bonifica Squadra 2	03/06/2012	04/06/2012
3	Free zone Squadra 1	03/06/2012	05/06/2012
4	Free zone Squadra 2	03/06/2012	05/06/2012
5	Service Roads Squadra 1	03/06/2012	05/06/2012
6	Service Roads Squadra 2	03/06/2012	04/06/2012
7	Core embankment Squadra 1_StratoA	06/06/2012	07/06/2012
8	Core embankment Squadra 2_StratoA	06/06/2012	07/06/2012
9	Core embankment Squadra 1_StratoB	07/06/2012	09/06/2012
10	Core embankment Squadra 2_StratoB	07/06/2012	08/06/2012

Fig. 69: Estratto di foglio di calcolo redatto con Excel

All'interno di Navisworks è necessario attivare il comando *Timeliner*, un comando che permette di visualizzare a video la successione delle fasi di lavoro progettate.

Una volta creati i *set*, infatti, è necessario importare un file esterno contenente le informazioni sulle tempistiche riferite a ciascuna lavorazione.

Proprio nell'importare il file Excel è possibile analizzare l'interoperabilità tra i due software, ossia tra Navisworks ed Excel. La capacità di interscambio è infatti soddisfatta a patto che il file Excel venga previamente trasformato in file di estensione .csv. Di seguito vengono riportati i file che Navisworks riesce a leggere con la funzionalità del *TimeLiner*:

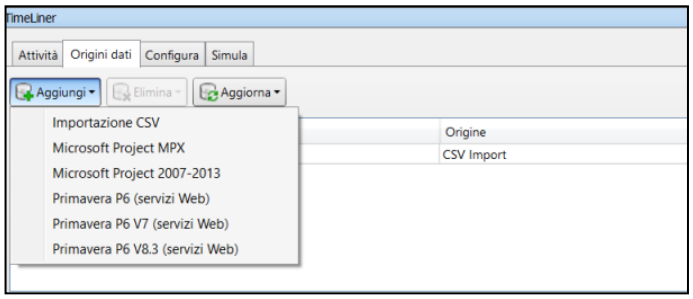

Fig. 70: Formati di importazione supportati da Navisworks

Una volta importato il file contenente le tempistiche, è necessario creare un'associazione tra le voci in esso contenute e i componenti del modello tridimensionale presenti in ciascun set; a tal proposito è consigliato rinominare i componenti di OpenRail Designer allo stesso modo di come si è impostata la determinazione dei tempi nel file Excel:

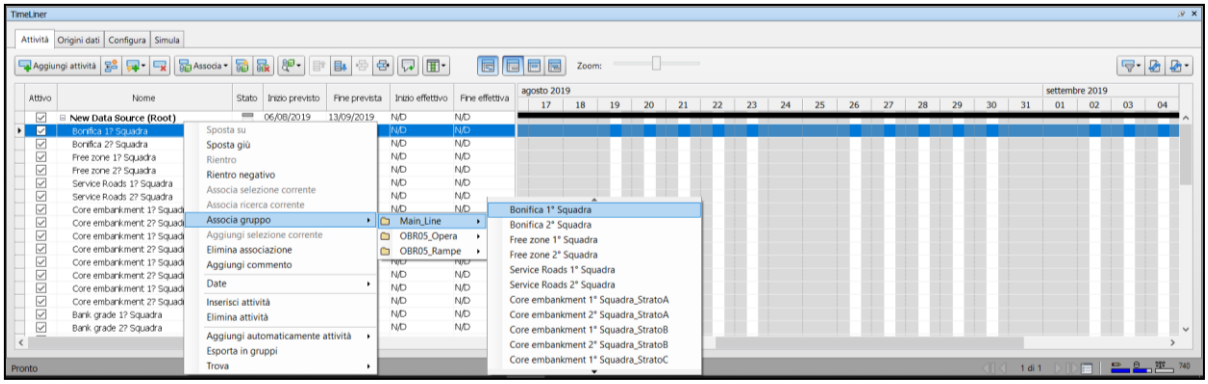

Fig. 71: Associazione tra componenti dei *set* ed Excel

Di seguito viene riportata la simulazione delle successive fasi di costruzione progettate per un tratto di linea ricadente all'interno del CF06, luogo in cui è presente il sovrappasso ferroviario OBR05 (progressiva: 36+825). In tal modo viene di fatto eseguita una simulazione della costruzione della *mainline* e al contempo delle fasi di costruzione dell'OBR05; di quest'ultima opera, in particolare delle rampe, sono state definite le successive fasi di costruzione senza tuttavia entrare nel dettaglio su tempi e costi di realizzazione.

Anche l'opera d'arte strutturale riguardante l'OBR05 è stata analizzata come successione temporale delle fasi di costruzione, soprattutto a causa della sua complessità nonché dei diversi tempi necessari per la relativa costruzione: dai documenti resi disponibili, è infatti stato compreso che la costruzione di tali opere richiede tempistiche notevolmente maggiori rispetto a quelle del tratto di linea considerato.

Per l'analisi eseguita, quindi, verranno mostrate le tempistiche e i costi relativi alle varie fasi di costruzione; in particolare, questi sono stati ricavati seguendo un approccio proporzionale rispetto alle quantità volumetriche dell'intero CF06, in modo da rendere realistica la simulazione dei costi sul tratto considerato.

Nei paragrafi precedenti si sono calcolati i volumi e il costi monetari totali per ogni componente del modello; attraverso la seguente equazione verranno invece calcolati i costi e i tempi parziali del tratto considerato.

$$Costo_{Parziale} = \frac{Costo_{Totale}}{Volume_{Totale}} \cdot Volume_{parziale}$$

$$Tempo_{Parziale} = \frac{Tempo_{Totale}}{Volume_{Totale}} \cdot Volume_{parziale}$$

Con tali proporzioni si vuole minimizzare l'errore dell'analisi su una singola porzione di ferrovia: tempi e costi sono infatti influenzati non tanto dalla lunghezza del tracciato ma dall'altezza di rilevato. Questo è possibile valutarlo analizzando due tratti con la stessa lunghezza: sebbene costituiti dalla stessa estensione, tali lunghezze possono avere volumi di terra molto differenti tra loro in quanto caratterizzati da altezze diverse (quindi un diverso numero di strati del *core embankment*); per tale motivo il calcolo proporzionale sul volume stima con maggiore efficacia il costo effettivo.

Di seguito viene mostrato uno stralcio della tabella con i risultati ottenuti per ogni componente.

Task Name	Volume Parziale[m3]	Volume Totale [m3]	Costo Parziale [€]	Costo totale [€]	TempoTotale [gg]	Tempo Parziale [gg]
Bonifica Squadra 1	2013	109223,65	28182	1529131,1	69	2
Bonifica Squadra 2	1202	109223,65	16828	1529131,1	69	1
Service Roads Squadra 1	1587	46588,148	22218	652234,072	56	2
Service Roads Squadra 2	528	46588,148	7392	652234,072	56	2
Core embankment Squadra 1_StratoA	4405	523698,951	61670	7331785,314	113	2
Core embankment Squadra 2_StratoA	3888	523698,951	54432	7331785,314	113	1
Core embankment Squadra 1_StratoB	5492	523698,951	76888	7331785,314	113	1
Core embankment Squadra 2_StratoB	4440	523698,951	62160	7331785,314	113	1
Bank grade Squadra 1	4087	93956,683	65392	1503306,928	122	2
Bank grade Squadra 2	2155	93956,683	34480	1503306,928	122	1

Fig. 72: Stralcio di calcolo tempi e costi parziali.

Le giornate lavorative sono state implementate in Navisworks in modo da ottenere un chiara visione della cantierizzazione, simulando altresì la variazione dei costi in tempo reale.

Questa simulazione ha l'utilità di far capire se il cronoprogramma è stato creato in maniera corretta, in relazione alle opere interferenti con la ferrovia: avendo infatti una visione grafica e sequenziale delle attività è possibile avere un punto di vista globale del lavoro anche in relazione alle altre opere (OBR05) interferenti con esso, evitando così eventuali errori grossolani di sovrapposizione spazio-temporale.

È inoltre possibile inserire nell'elenco delle attività i codici estratti dal CESMM 4 associati a ciascuna voce, in modo da poter creare un nesso tra la descrizione della lavorazione, proposta da tale standard di misura, e il modello tridimensionale della linea principale.

☑	Subgrade Squadra 2		13/06/2012	15/06/2012	N/D	N/D	Construct	Gruppi->Main_Line->...	5,520.00	5,520.00	E 612
☑	Protective cover Squadra 1		17/06/2012	22/06/2012	N/D	N/D	Construct	Gruppi->Main_Line->...	6,840.00	4,560.00	E 624
☑	Protective cover Squadra 2		15/06/2012	18/06/2012	N/D	N/D	Construct	Gruppi->Main_Line->...	3,720.00	2,480.00	E 624
☑	Subballast Squadra 1		22/06/2012	26/06/2012	N/D	N/D	Construct	Gruppi->Main_Line->...	24,120.00	16,080.00	E 628
☑	Subballast Squadra 2		22/06/2012	26/06/2012	N/D	N/D	Construct	Gruppi->Main_Line->...	7,800.00	5,200.00	E 628
☑	Ballast Squadra 1		26/06/2012	01/07/2012	N/D	N/D	Construct	Gruppi->Main_Line->...	71,675.00	28,670.00	S 110
☑	Ballast Squadra 2		26/06/2012	01/07/2012	N/D	N/D	Construct	Gruppi->Main_Line->...	23,200.00	9,280.00	S 110
☑	Sleepers Dx		09/07/2012	10/07/2012	N/D	N/D	Construct	Gruppi->Main_Line->...	71,500.00	17,875.00	S 472
☑	Sleepers Sx		09/07/2012	10/07/2012	N/D	N/D	Construct	Gruppi->Main_Line->...	71,500.00	17,875.00	S 472

Fig. 73: Visualizzazione dei codici CESMM in Navisworks

Di seguito verranno mostrate alcune sequenze di lavorazione sviluppate in Navisworks.
Impostando degli script è possibile visualizzare bordo schermo le informazioni di base della simulazione. In particolare saranno mostrate:

- Data inizio lavoro con scorrimento del numero di giorni;
- Il costo dell'opera in quel determinato giorno di analisi con ripartizione del medesimo in due voci, ossia costo della materia prima e costo del lavoro;
- Il nome del tratto analizzato con la percentuale di completamento dello specifico strato/componente.

Nella seguente figura è possibile osservare le lavorazioni che sono state eseguite in cinque giorni di cantiere su un tratto di lunghezza pari a 750 metri; in particolare vengono effettuati i lavori di bonifica e sbancamento (due giorni), la costruzione della service road (due giorni) e i due strati del core embankment della squadra 2 (due giorni totali). È possibile notare che i giorni per terminare queste lavorazioni sono 6 e la simulazione è stata arrestata al 5° giorno infatti è presente una percentuale di completamento dello strato pari al 64%.

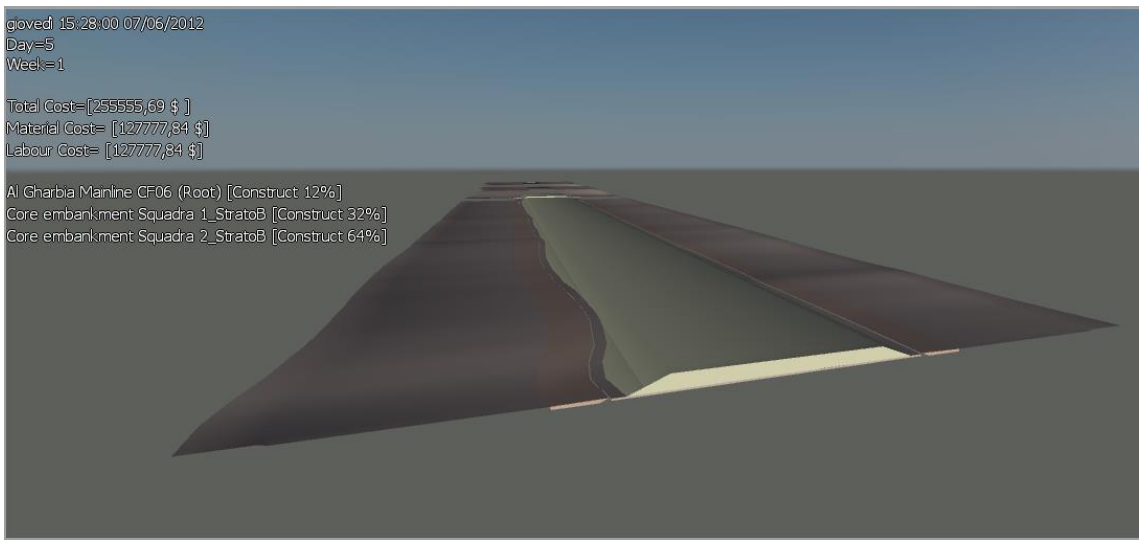

Fig. 74: Tempi e Costi al 5° giorno

Nella seconda simulazione vengono mostrati tutti gli strati che compongono il sottofondo del corpo ferroviario (ad eccezione dello strato protettivo esterno) ed inoltre vengono visualizzate anche le prime fasi del sovrappasso: come infatti è stato pocanzi menzionato, di tale elemento costruttivo verranno mostrate solo le sequenze lavorative e non i relativi tempi (troppo dilatati) e costi (analisi non oggetto di studio) di costruzione.

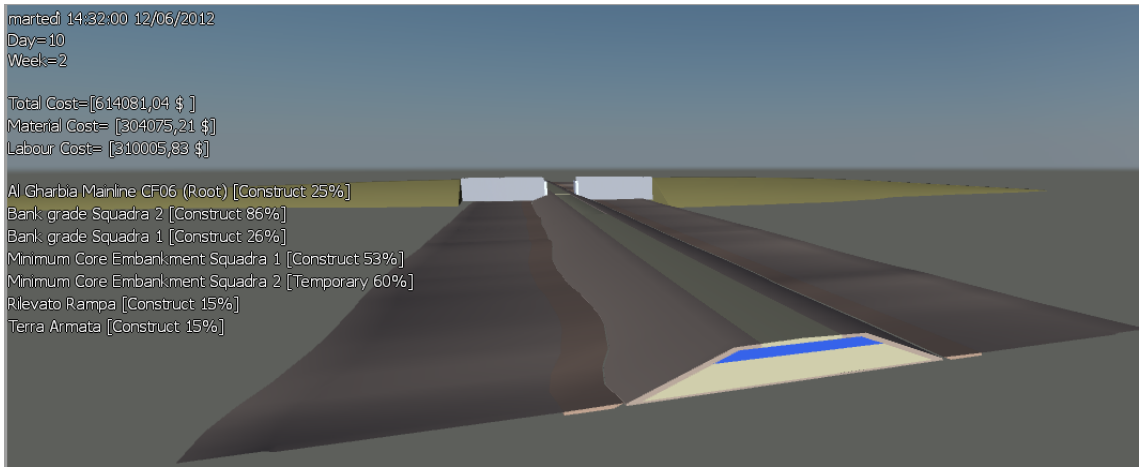

Fig. 75: Tempi e Costi al 10° giorno

In conclusione viene mostrata la simulazione ultimata con tutte le opere realizzate:

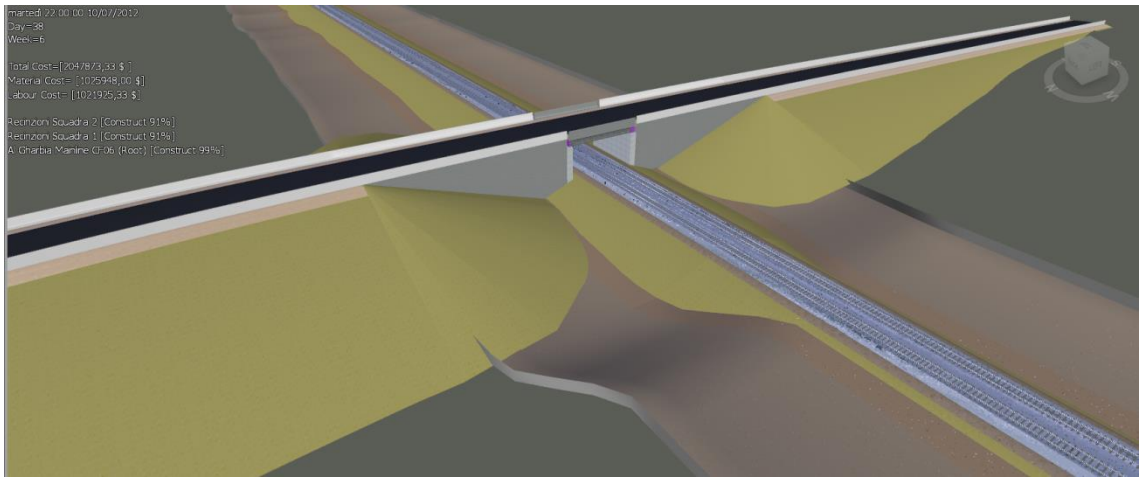

Fig. 76: Tempi e Costi al 38° giorno

6. Risultati ottenuti

6.1 Comparazione 4D as designed – as built

6.1.1 Tempistiche reperite dalle documentazioni

Al fine di effettuare il confronto è stato necessario partire da dati presenti nel database aziendale; oltre alle tempistiche calcolate per la definizione dei tempi, non disponibili per ogni lavorazione, sono stati reperiti i diagrammi spazio-tempo; si tratta di elaborati progettati con Tilos, un software della Trimble tra i più utilizzati in azienda per l'analisi dei tempi e delle lavorazioni di cantiere.
Per il tratto di ferrovia su cui si è concentrata l'analisi si riporta un estratto di tale elaborato (Fig. 77):

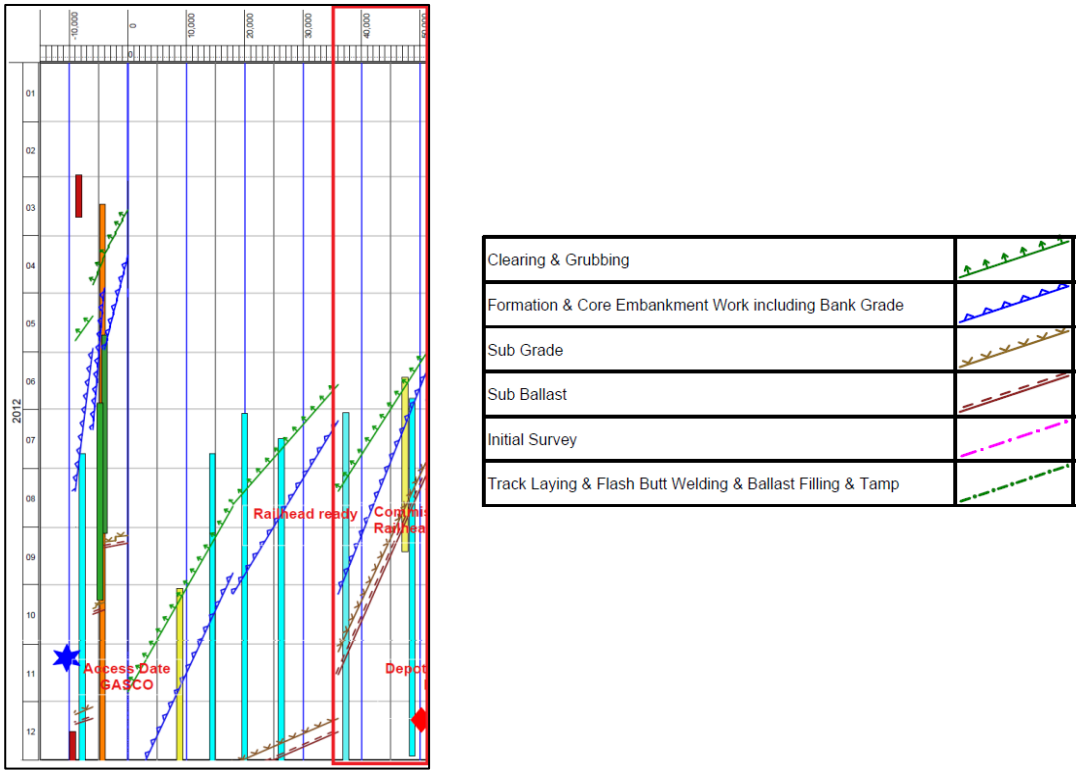

Fig. 77 Rappresentazione grafica spazio-tempo creata con Tilos (Saipem S.p.A.)

Dalle informazioni estratte dai documenti sono state ricavate le seguenti tempistiche di realizzazione per ogni voce.

Tabella 5: Tempistiche riferite alle lavorazioni per *Earthworks* e *Trackworks*

Componente	Giorni (as built)
Box Out	71
Fill Volume	113
Cut Volume:	71
SubGrade:	98
Subballast:	103
Ballast: 1st layer (15 cm)	21
Ballast: 2nd layer	19
Posa dei binari	19

Da quanto si evince dalla Tabella 5, i dati forniti sono tuttavia agglomerati, ossia non suddivisi nel dettaglio per ciascuna lavorazione eseguita in cantiere.
Ciò comporta la necessità di dover agglomerare i dati estratti da modello 3D: senza accorparli, infatti, sarebbe impossibile trovare un nesso tra tempistiche calcolate e quelle fornite dall'azienda.

6.1.2 Confronto tra le produzioni orarie *as designed – as built*

L'analisi sui tempi è stata effettuata a partire dal calcolo delle produzioni orarie dei mezzi a disposizione. Ogni operazione da effettuare in cantiere prevede infatti l'impiego di mezzi specifici, necessari per la movimentazione del materiale e per la costruzione di rilevato e sovrastruttura ferroviaria.
In **Tabella 6** vengono riportati i mezzi da impiegare per la realizzazione di tutti i componenti della ferrovia definiti tramite modellazione, definendo in tal modo una ***squadra-base*** di mezzi:

Tabella 6: Squadra base per la produzione oraria con metodo analitico.

	Strato di preparazione (*box out*)	**Costruzione rilevato**	**Scavo e sbancamento**	**Sottofondo (*subgrade*)**	**Sottomassicciata (*subballast*)**	**Ballast**
	N°	N°	N°	N°	N°	N°
Dozer D8T	1	-	1	-	-	-
Dumper 740 EJ	4	4	-	4	4	4
Rullo CAT CS 56	1	1	1	1	1	1
Grader 14 M3	1	1	-	1	1	1
Pala 950M	1	1	-	1	1	1
Escavatore PC 400LC-6	1	1	1	1	1	-

L'ipotesi formulata per la definizione del numero di dumper da impiegare si è basata sul calcolo delle produzioni orarie della pala gommata e del dumper. La pala gommata è normalmente utilizzata in cava, ricarica i mezzi che trasportano il materiale e ha una elevata produzione oraria; il dumper invece è un mezzo utilizzato unicamente per il trasporto del materiale da/verso il cantiere e presenta un basso valore di produzione oraria a causa della limitata velocità e della lunghezza del tratto da percorrere. Da queste considerazioni si è compreso come, al fine di massimizzare la produttività oraria della pala, fosse necessario impiegare un numero di dumper molto elevato, probabilmente non realistico rispetto all'effettiva organizzazione del cantiere.
Il numero di dumper riportato in **Tabella 6** è stato pertanto stato definito in modo da far lavorare la pala per almeno il 25% della sua effettiva potenzialità.
La squadra-base così definita è stata in seguito confrontata con quella base utilizzata per la costruzione del tratto di ferrovia analizzato; ne viene riportata la struttura in Tabella 7, dove vengono messi in evidenza i mezzi in comune utilizzati sia nel caso studio che nella realtà:

Tabella 7: Squadra base per la produzione oraria (Saipem S.p.A.)

	Box Out (Strato di preparazione)	**Costruzione rilevato (*Fill*)**	**Scavo sbancamento (*Cut*)**	**Sottofondo (*Subgrade*)**	**Subballast**	**Ballast**
Grader operator	1	1	1	1	1	1
Excavator operator	1	1	2	1	1	-
Backhoe operator	-	-	-	-	-	-
Paver operator	-	-	-	-	-	-
Bitumen sprayer operator	-	-	-	-	-	-
Steer loader operator	-	-	-	-	-	-
Roller operator	1	1	1	1	1	1
Dozer operator	1	1	1	1	1	-
Wheel Loader operator	1	1	1	1	1	1
Truck heavy driver	4	4	4	4	4	4
Dumper heavy driver	-	-	1	-	1	-
Water T. heavy driver	-	1	-	1	1	-
Diesel T. heavy driver	1	1	1	1	1	1
Unskilled	1	3	1	3	3	3
Skilled	1	2	1	2	2	2
Foreman	1	1	1	1	1	1

Effettuando un primo confronto è possibile notare la differenza tra la squadra realmente utilizzata in cantiere e quella ipotizzata nel caso studio; la prima risulta più dettagliata nei mezzi rispetto a quella oggetto di studio.

Tuttavia il calcolo delle produzioni orarie fornite da Saipem S.p.A. ha restituito valori molto prossimi rispetto a quelli constatati in fase di studio. Il confronto viene riportato in Fig. 78:

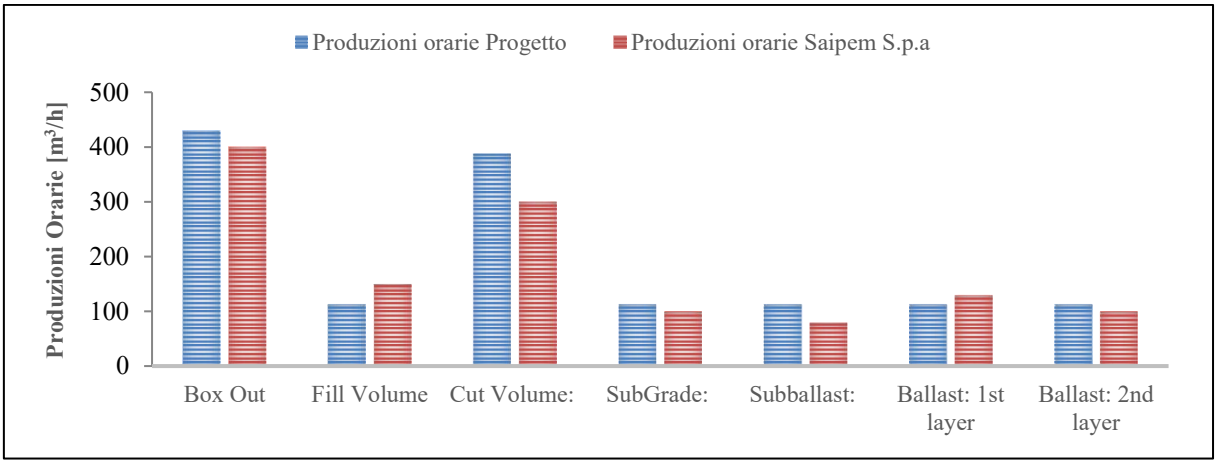

Fig. 78: Confronto delle produzioni orarie delle squadre-base

È opportuno inoltre evidenziare la differente caratteristica dei dati presenti in Fig. 78: l'analisi condotta in fase di studio si è basata sul calcolo della produzione oraria di tutti i mezzi che compongono la squadra-base; i dati forniti da Saipem S.p.A sono invece relativi alla produzione oraria complessiva, cioè relativa a tutta la squadra che realizza il determinato componente (ad esempio, scavo e sbancamento ha nel suo complesso una produttività oraria di 300 m^3/h).

6.1.3 Confronto *as designed – as built* sui tempi di costruzione

Dopo aver confrontato i dati relativi alle produzioni orarie scaturiti delle due analisi, è stato possibile procedere con la riformulazione della squadra-base al fine di ricavare i tempi di realizzazione del tratto di ferrovia oggetto di studio. Questi tempi, riportati nel diagramma spazio-tempo, risultano il dato relativo alle tempistiche effettivamente affrontate per la costruzione della ferrovia (*as built*); da ciò ne consegue che, implementando in maniera opportuna il numero di mezzi della squadra-base (**Tabella 6**) è possibile rispettare le tempistiche di realizzazione del tratto di ferrovia considerato.

I risultati che verranno di seguito mostrati si riferiscono ad un solo fronte di lavoro; essendo infatti l'estensione del cantiere pari a 15 km, sono stati ipotizzati due fronti di lavoro, organizzati in maniera tale da non causare interferenze reciproche e al contempo rispettare i tempi reali.

In Tabella 8 viene riportata la composizione della squadra di lavoro a seguito della riformulazione.

Tabella 8: Composizione squadra dopo l'adattamento per un solo fronte di lavoro.

	Strato di preparazione (*box out*)	**Costruzione rilevato**	**Scavo e sbancamento**	**Sottofondo (*subgrade*)**	**Sottomassicciata (*subballast*)**	**Ballast**
	N°	N°	N°	N°	N°	N°
Dozer D8T	1	-	3	-	-	-
Dumper 740 EJ	4	18	-	2	2	10
Rullo CAT CS 56	1	2	3	1	1	1
Grader 14 M3	1	1	-	1	1	1
Pala 950M	1	1	-	1	1	1

Considerando la squadra di lavoro riformulata, sono stati calcolati i tempi di realizzazione del tratto di ferrovia oggetto di studio (Fig. 79) confrontati a loro volta con quelli *as built*:

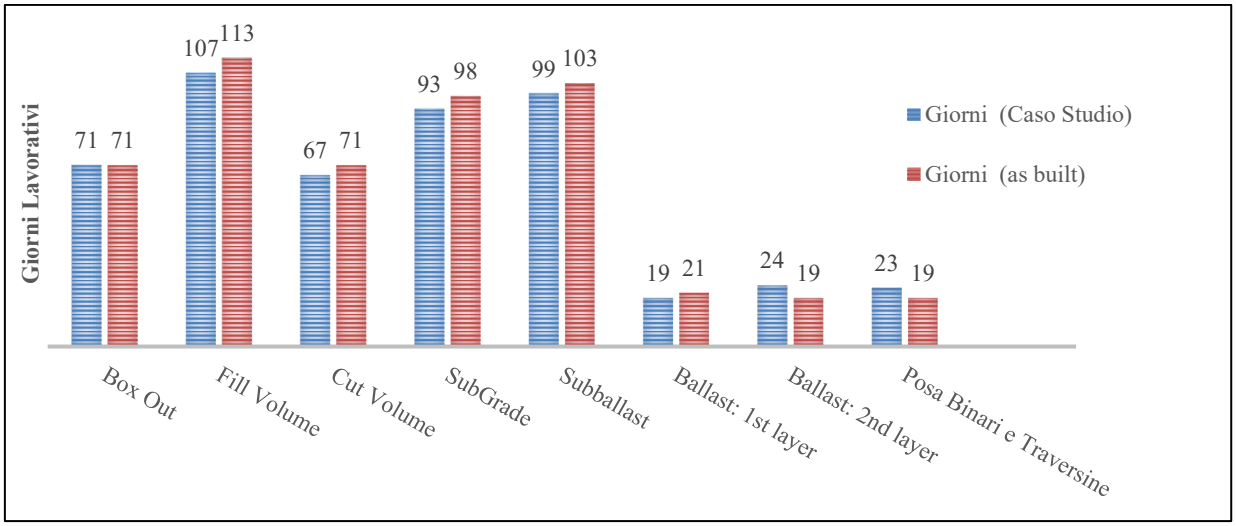

Fig. 79: Caso Studio e realtà dopo la calibrazione

Considerazioni sul confronto as designed – as built

A valle dello studio condotto è possibile effettuare delle considerazioni sui dati relativi alle produzioni orarie e, di riflesso, sui tempi di realizzazione dei 15 chilometri di ferrovia analizzati.

Nel caso studio i tempi di realizzazione sono stati ricavati rapportando le quantità di materiale[7], dedotti dalla modellazione tridimensionale, alla produzione oraria della squadra, ottenuta considerando il mezzo più penalizzante; le produzioni orarie fornite dall'azienda per effettuare il confronto sono invece dati complessivi, indicativi cioè della produzione oraria della squadra per la realizzazione di ogni singolo componente.

In aggiunta, i valori delle produzioni orarie scaturiti dalle due analisi risultano differenti in quanto il numero di mezzi stimato per eseguire una determinata lavorazione è diverso tra caso studio e realtà. Nel caso reale, infatti, la composizione della squadra di lavoro è molto più completa: considerando mezzi come i *water tanker* e i *fuel tanker* (mezzi di trasporto di acqua e carburante), il valore di produzione oraria complessiva dell'intera squadra di lavoro risulterebbe diverso rispetto a quello calcolato.

[7] Le quantità di materiale utilizzate sono state considerate a strato finito, cioè non utilizzando il fattore di rigonfiamento dei materiali, che tuttavia può influire di circa il 10% sulla stima dei volumi.

Le tempistiche *as designed* risultano inoltre discostarsi rispetto a *as built* per i seguenti motivi:

- La costruzione di opere interferenti con la ferrovia, ad esempio le opere idrauliche e altre *utilities* (linee elettriche al di sotto del rilevato, *camel underpass*, etc.), hanno comportato un possibile rallentamento nella costruzione dei vari componenti del corpo ferroviario. Le opere idrauliche (*culvert*) non sono state considerate all'interno del presente studio, né si è tenuto conto della loro costruzione nell'analisi 4D;
- Nelle operazioni di costruzione del rilevato (*Fill*) non si è utilizzato nessun fattore di rigonfiamento del terreno, quindi le lavorazioni sono sottostimate dell'ordine del 10%;
- Nelle lavorazioni di scavo e sbancamento (*Cut*) si è considerato che il materiale di risulta venga smaltito a bordo cantiere, non prevedendone il trasporto in discarica;
- Per quanto concerne le lavorazioni di compattazione non si è tenuto conto del tempo impiegato per raggiungere il valore ottimale di umidità del materiale (bagnatura o asciugatura) come imposto da prove di laboratorio (*Proctor test*);
- Il calcolo teorico dell'efficienza oraria dei mezzi si discosta dall'effettivo risultato, non avendo esperienza del cantiere e della sua effettiva organizzazione;
- Non sono stati considerati eventuali giorni di slittamento delle giornate lavorative per cause climatiche (condizioni climatiche avverse, tra cui tempeste di sabbia e temperature troppo elevate per poter lavorare);

Non si è tenuto conto dell'eventuale manutenzione dei mezzi che periodicamente vengono fermati a fini manutentivi (in quanto il cantiere è durato quasi 5 anni).

6.2 Comparazione 5D as designed – as built

La stima economica del CF06 è stata eseguita associando i prezzi forniti da Saipem S.p.A. ai componenti del modello tridimensionale. I volumi da impiegare sono stati dedotti dal *Report Analysis* di OpenRail Designer, per cui sulla base delle quantità estratte dal software sono stati calcolati il costo del rilevato e della sovrastruttura ferroviaria.
Per ciascun componente è stato calcolato il relativo costo effettuando la somma tra i costi legati al materiale e alla manodopera e moltiplicando tali valori per le quantità (volumi o lunghezze) relative a ciascun componente:

$$Costo\ componente\ (USD) = (C_{materiale} + C_{lavoro}) \cdot Quantità$$

Riprendendo le voci menzionate in precedenza, relative agli ***eathworks*** e ai ***trackworks*** del CF06, vengono di seguito riportati i costi di ciascun componente.
È necessario premettere che i costi degli Emirati Arabi Uniti sono totalmente diversi da quelli considerati in Italia e in Europa. Nel calcolo dei costi sono stati trascurati, ad esempio, quelli legati all'incidenza del carburante necessario per il rifornimento dei mezzi; volendo fare un confronto, il costo del carburante è più basso di circa l'80% rispetto a quello medio europeo.

6.2.1 Costi di costruzione del rilevato (Earthworks)

In questa sezione viene mostrato il costo unitario del materiale e del lavoro applicato alle quantità, al fine di ricavare i costi parziali per ogni componente.

Tabella 9: Costo del CF06 riferito agli *Earthworks*

Componente	Volume [m^3] da ORD	Costo unitario materiale (USD)	Costo unitario lavoro (USD)	Totale (USD)
Box out:	109.223,65	7	7	1.529.131,10
Scavo e sbancamento:	1.062.238,939	0	3	3.186.716,82
Costruzione del rilevato:	523.698,951	7	7	7.331.785,31
Strade di servizio:	46.588,148	7	7	652.234,07
Rilevato minimo (in trincea, da ORD):	58.374,522	7	7	817.243,31
Involucro esterno (*bank grade*):	93.956,683	7	9	1.503.306,93
Strato protettivo:	25.843,885	6	4	258.438,85
Subballast:	57.318,807	12	8	1.146.376,14
Sottofondo (*subgrade*):	60.760,877	8	8	972.174,03
Totale				**17.397.406,56**

Il risultato ottenuto è stato giudicato corretto da parte di professionisti di Saipem S.p.A. addetti all'offerta economica. Essi hanno infatti verificato che il prezzo medio a chilometro per rilevato CF06 è risultato leggermente superiore al milione di dollari.

Nel caso in esame risulta che il prezzo medio a chilometro di rilevato è pari a:

$$Prezzo\ medio_{cut\&fill} = \frac{17.397.406{,}56}{15{,}407} = 1.129.188{,}5\,\frac{USD}{km}$$

6.2.2 Costi della sovrastruttura ferroviaria (Trackworks)

In analogia con quanto visto per la costruzione del rilevato vengono di seguito riportati i costi per la realizzazione della sovrastruttura ferroviaria:

Tabella 10: Costo del CF06 riferito ai *Trackworks*

Componente	Volume [m^3]	Lunghezza [m]	Quantità [numero]	Costo unitario materiale (USD)	Costo unitario lavoro (USD)	Totale (USD)
Ballast:	83.166,01	-	-	25	10	2.910.810,42
Rotaie:	-	61.628,00	-	108	160	16.516.304,00
Traversine:	-	-	51.357	60	15	3.851.750,00
Totale:						**23.278.864,42**

Per i ***trackworks*** il prezzo medio a chilometro è pari a:

$$Prezzo\ medio_{track} = \frac{23.278.864{,}42}{15{,}407} = 1.510.927{,}8\frac{USD}{km}$$

Infine, viene calcolato il costo per l'installazione delle recinzioni esterne (*fences*) installate su entrambi i lati del tratto di ferrovia lungo 15407 metri (CF06):

Tabella 11: Costo del CF06 riferito ai alle recinzioni esterne (fences)

Componente	Lunghezza [m]	Costo unitario materiale (USD)	Costo unitario lavoro (USD)	Totale (USD)
Recinzioni:	30.814	30	35	2.002.910,00

L'analisi dei costi permette di affermare che il modello tridimensionale, realizzato con OpenRail Designer, approssima correttamente le caratteristiche effettive della ferrovia, rappresentandola fedelmente in termini quantitativi.

Da quanto è stato possibile riscontrare dal team di Ingegneria, si è infatti avuto modo di appurare che, in riferimento ai soli *Trackworks ed Earthworks*, il costo dell'intero tratto considerato, di lunghezza pari a 15,407 km, si attesta intorno a valori compresi tra il 4-5% di quello reale:

Tabella 12: Confronto tra i costi: Caso studio vs. Realtà

	Totale (USD)
Costo (caso studio)	42.679.181
Costo reale (*as built*)	≈ 45.000.000

Come affermato all'inizio del presente lavoro, il confronto tra le analisi *as designed – as built* presenta una differenza che può essere spiegata attraverso delle considerazioni infatti nello studio effettuato sono stati trascurati:

- L'ammontare dei tempi e dei costi legato alla costruzione delle opere idrauliche per il convogliamento delle acque meteoriche (tombini);
- La costruzione delle interferenze elettriche e telefoniche che attraversano il rilevato; tali opere servono per garantire la comunicazione a distanza, i meccanismi di segnalamento e il funzionamento automatico degli scambi ferroviari;

Un valore di scostamento compreso in queste percentuali può essere visto sotto un duplice aspetto sia positivo che negativo.
L'aspetto negativo risiede nel fatto che, sebbene il modello virtuale sia in grado di approssimare bene quello reale, in fase preventiva di offerta verrebbero trascurati quasi 2,2 milioni di dollari. Se tale valore, che nel caso in esame è stato considerato per un singolo tratto di ferrovia, venisse esteso per tutta la linea ferroviaria, il gap economico da sostenere non sarebbe trascurabile, e dovrebbe essere considerato in maniera opportuna durante le fasi di formulazione dell'offerta.
L'aspetto positivo è che il modello virtuale della ferrovia approssima correttamente quello reale e che le differenze che si possono constatare riguardano i seguenti motivi:

1) Appurato che i volumi dei componenti siano gli stessi (in quanto dedotti dalla sezione di progetto), modello virtuale e reale si discostano tra loro a causa dei quantitativi di terreno utilizzati nella realtà, evidentemente superiori rispetto a quelli dedotti da OpenRail Designer.
   Ciò è dettato da un'approssimazione del terreno virtuale diversa da quella reale (maglie di triangolazione larghe che tendono ad approssimare il terreno restituendo quantità diverse

rispetto alla realtà). Questo comporta, di riflesso, un divario tra le stime economiche del terreno effettivamente movimentato e stima del terreno modellato con OpenRail Designer;

2) Non sono stati considerati alcuni costi come quelli riferiti al *diesel tanker* e al *water tanker*, rispettivamente mezzi di rifornimento carburante (per i veicoli) e rifornimento di acqua. Questi ultimi, in particolare, sono veicoli utilizzati per garantire una giusta umidità al materiale da lavorare, così da poterne garantire una buona lavorabilità;
3) Un'ulteriore considerazione è stata fatta sulle composizioni delle squadre: nel presente studio si è di fatto tenuto conto dei costi relativi ai mezzi meccanici e al lavoro ad essi collegato (*skilled operators*) trascurando la componente legata alla forza lavoro manuale (*unskilled operators*) che tuttavia contribuisce ad aumentare i costi totali.

7. Conclusioni

Lo Studio condotto per la redazione del presente elaborato di tesi ha dato l'opportunità di esplorare da vicino diversi temi legati al vastissimo settore dell'Ingegneria delle Infrastrutture, ponendo la lente di ingrandimento in modo particolare su due argomenti.

Il primo, analisi *as designed – as built* di una ferrovia esistente, ha avuto l'obbiettivo di fare un confronto sui costi e una simulazione delle fasi di costruzione per un tratto di ferrovia esistente.

Il secondo è relativo all'attuale capacità di "*interoperare*" di alcuni software impiegati nella progettazione, fornendo quindi un'istantanea sulle potenzialità che ad oggi possono essere effettivamente sviluppate seguendo un approccio BIM.

Lo studio è stato eseguito impiegando OpenRail Designer per il tracciamento del profilo plano-altimetrico, la modellazione della sezione tipo e il calcolo dei volumi. Tuttavia questo, come altri software, non gestisce la fase di cantierizzazione; in questo lavoro si è cercato di sviluppare anche questo aspetto, in modo da effettuare la simulazione temporale (4D) delle fasi di costruzione della ferrovia.

Il confronto sui costi di realizzazione (5D) dell'opera ha restituito un risultato inferiore al 5% rispetto a quello realmente sostenuto. Il punto di forza di tale confronto risiede innanzitutto nella corretta modellazione della ferrovia, fedele sia con le dimensioni della sezione trasversale (e del suo sviluppo rilevato/trincea) che con le dimensioni dell'intero corridoio ferroviario.

In fase di modellazione è stato ampliato il contenuto informativo del modello tridimensionale grazie alla possibilità di OpenRail Designer di aggiungere *items*, ossia ulteriori descrizioni ai componenti del modello (ad esempio le caratteristiche dei materiali, le modalità di messa in opera e i mezzi utilizzati). Tra queste descrizioni sono stati aggiunti i codici CESMM che definiscono, attraverso uno standard di misura internazionale, un metodo per la misura delle quantità e delle lavorazioni.

Queste informazioni (impostate manualmente in OpenRail Designer) sono mantenute quando si passa nel software di visualizzazione (Bentley Navigator) ma vengono perse a seguito del passaggio in Navisworks (Autodesk). I possibili miglioramenti futuri potrebbero concentrarsi in particolar modo su questo aspetto, cioè sulla possibilità di conservare informazioni del modello di OpenRail Designer e continuare a visualizzarle nel momento in cui si lavora su altri software.

Una volta migliorata l'interoperabilità si potrà lavorare alla creazione di librerie contenti tutte le possibili informazioni e proprietà da conferire a ciascun componente del modello, con la possibilità di esportare tali informazioni.

L'analisi sull'interoperabilità ha permesso di valutare con Saipem S.p.A. lo stato attuale dell'infra-BIM analizzando la possibilità di sviluppo di questa metodologia in termini di

interoperabilità tra i software attualmente utilizzati in azienda. Questo è stato visto sia attraverso l'utilizzo del formato di scambio "ifc" che attraverso i file prodotti da OpenRail Designer: in entrambi i casi la visualizzazione è completa ma le informazioni sui volumi e sulle quantità vengono perdute.
Le alternative perseguibili potrebbero riguardare:

- l'utilizzo di software appartenenti alla stessa *software house* ("interoperabilità verticale") in modo garantire la conservazione dei dati di modellazione;
- l'uso di procedure semi-automatiche (come sviluppate in questo studio: creazione del modello a strati con la nomenclatura di ogni componente in ORD; formazione dei set in Navisworks; associazione dei set con la stessa nomenclatura usata in ORD; progettazione della cantierizzazione con Primavera, Excel o Project; associazione dei set di Navisworks in maniera automatica), arginando almeno in parte i limiti di interoperabilità.

In futuro occorrerà che la lettura del formato ".ifc" sia garantita da e verso tutti i software, al fine di migliorare l'interoperabilità. Questo problema potrà essere risolto fornendo ai software la capacità di leggere e trasferire tutte le informazioni secondo diversi standard ".ifc". Ad oggi, infatti, molti formati ".ifc" per le infrastrutture non sono stati ancora sviluppati.
Al di là dello sviluppo che caratterizzerà questo standard, si è avuto modo di analizzare più da vicino la struttura dei file ".ifc". In questo lavoro si è compreso che la lettura di questi file potrebbe essere migliorata intervenendo su alcune delle righe di codice. Ad esempio i nomi dei componenti del solido ferroviario, che in esportazione sono parzialmente persi, sono sostituiti da stringhe di codice racchiuse tra due virgolette (Fig. 80), all'interno delle quali è possibile sostituire gli effettivi nomi dei componenti così da farli comparire a video una volta selezionati.
Questa procedura di sostituzione può essere eseguita tramite macro in linguaggio VBA (*Visual Basic for Application*) con la quale le stringhe di codice vengono sostituite. Ad esempio con il codice mostrato in Fig. 80 è possibile cambiare il contenuto del file IFC in corrispondenza della voce "IFCBUILDINGELEMENTPROXY" in modo da assegnare in maniera automatica un codice identificativo al componente

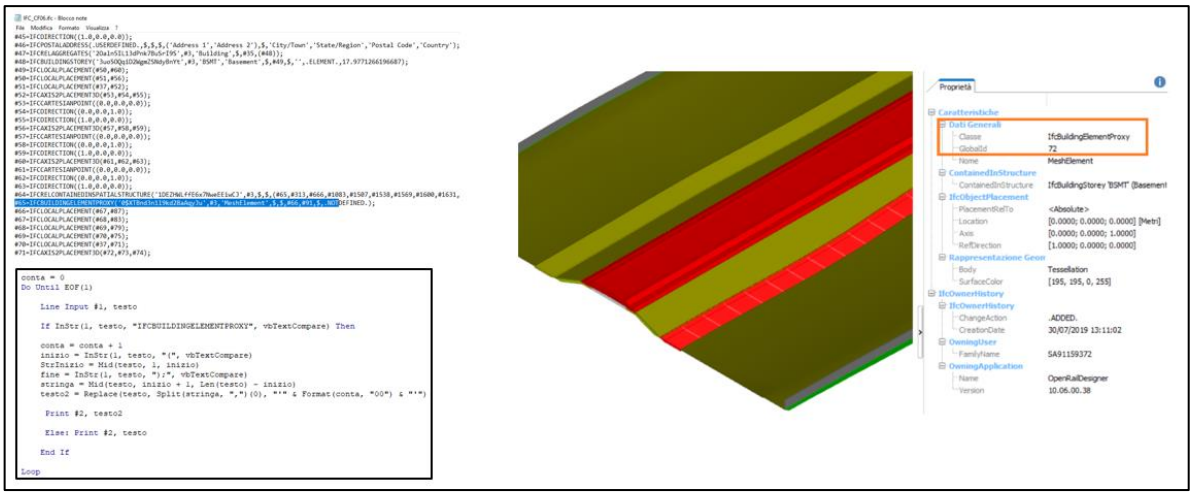

Fig. 80: Modifica della stringa di codice ed effetto nel modello

Un'altra procedura vagliata, suggerita da professionisti Bentley, riguarda l'esportazione del file ".dgn" in OpenBuildings, il software di progettazione strutturale analogo di Revit; attraverso questo software è possibile scegliere lo standard ifc da esportare (2x3 o 4x1) e conferire ai diversi componenti del modello delle caratteristiche non "proprie" al fine di poter conservarne le proprietà una volta importati in altri applicativi. Ad esempio, conferendo al ballast il formato "ifc slab" si attribuiscono a tale componente le proprietà di una piastra (pur non essendo così) al fine di conservarne le caratteristiche geometriche in fase di esportazione verso altri software.

In conclusione, l'impressione che si ricava dalle analisi condotte in questo studio è che l'interoperabilità sia gestita in modo verticale dalle *software house*, piuttosto che in modo trasversale. Questo aspetto pregiudica gli obbiettivi di base della metodologia BIM che, di fatto, poggia le sue fondamenta proprio sull'interoperabilità e sull'ottimizzazione della progettazione, intesa come coinvolgimento multidisciplinare di professionisti appartenenti a diversi rami dell'Ingegneria.

Come si è già avuto modo di ribadire all'interno del documento, l'ambito dell'ingegneria strutturale ha maggiormente beneficiato dell'approccio BIM alla progettazione a discapito, sin qui, del settore infrastrutturale su cu si dovranno concentrare gli sforzi e le sfide dell'Ingegneria Civile nel prossimo futuro.

Bibliografia e sitografia

[1] Acca software S.p.A, «BIM (Building Information Modeling): Cos'è? A cosa serve? Tutto quello che occorre sapere,» Biblus-net, [Online]. Available: http://biblus.acca.it/focus/bim-building-information-modeling/.

[2] Enerplan S.r.l, «BIM,» [Online]. Available: https://www.enerplan.it/azienda/profilo/bim/.

[3] G. Dell'Acqua, in *BIM per Infrastrutture*, EPC, 2018.

[4] Wurth news, «Metodologia BIM: la norma UNI 11337 per la digitalizzazione nel settore delle costruzioni,» [Online]. Available: https://news.wuerth.it/progettisti/metodologia-bim-norma-uni-11337/#1544611620545-496c6bec-3de0.

[5] C. Manzo, «Le figure chiave del BIM nella UNI 11337-7,» BiblusBIM, [Online]. Available: http://bim.acca.it/le-figure-chiave-del-bim-nella-uni-11337-7-bim-manager-bim-coordinator-bim-specialist-cde-manager/#CDE_Manager.

[6] Prof. Ciribini Angelo Luigi Camillo - Università degli Studi di Brescia, «La Norma UNI 11337-7 e le professioni non regolamentate del BIM,» 7 Gennaio 2019. [Online]. Available: https://www.ingenio-web.it/22249-la-norma-uni-11337-7-e-le-professioni-non-regolamentate-del-bim.

[7] G. Dell'Acqua, «BIM per Infrastrutture Lineari,» 2017.

[8] Norma UNI 11337 - parte 4 (punto7.2), Stati di lavorazione del contenuto informativo.

[9] Etihad Rail Company, «Environmental Impact Assessment Report,» 2011.

[10] Saipem S.p.A, «Geotechnical Report».

[11] V. D. Stefano, *Dottorato di Ricerca in rilevamento, analisi e rappresentazione dell'architettura e dell'ambiente XVIII ciclo. La modellazione digitale del terreno e la rappresentazione di scenari urbani complessi..*

[12] Dott. Ing. Fabrizio Paolacci, «Teoria e Progetto dei Ponti Spalle Analisi ai carichi verticali,» A.A 2015/16. [Online]. Available: https://www.romatrestrutture.eu/wp-content/uploads/2018/02/17.-Teoria-e-Progetto-dei-Ponti-Spalle-Analisi-ai-carichi-verticali_D.pdf.

[13] R. D. Holtz, *GEOSYNTHETICS FOR SOIL REINFORCEMENT,* 2001.

[14] CAT, «Vibrofinitrici,» [Online]. Available: https://www.cgt.it/it/prodotti/vibrofinitrici/.

[15] Alphasoil. [Online]. Available: <http://alphasoil.com/content/e197/index_It.html .

[16] Proff. Baglieri,Santagata Politecnico di Torino, *CSFA #5 Mezzi d'opera,* a.a 2015/16.

[17] «Caterpillar Performance Handbook,» [Online]. Available: http://nheri.ucsd.edu/facilities/docs/Performance_Handbook_416C.pdf.

[18] Komatsu, *Specification & Application Handbook Edition 27,* 2006 .

[19] G. Beghini, «Work Breakdown Structure: lo strumento cardine della gestione di un progetto,» 2019. [Online]. Available: http://erplab.it/wp-content/uploads/2017/01/14WBS.pdf.

Allegati:

Tabella 13: Calcolo dei giorni di lavoro per la squadra-tipo inizialmente ipotizzata

	Box Out	***Fill***	***Cut***	***SubGrade***	***SubBallast***	***Ballast***
	N°	N°	N°	N°	N°	N°
Dozer D8T	1	-	1	-	-	-
Dumper 740 EJ	4	4	-	4	4	4
Rullo CAT CS 56	1	1	1	1	1	1
Grader 14 M3	1	1	-	1	1	1
Pala 950M	1	1	-	1	1	1
Escavatore K. PC400LC-6	1	1	1	1	1	-

Tabella 14: Calcolo del tempo necessario per la costruzione di rilevato e sovrastruttura per la squadra di lavoro ipotizzata

	Prod Dozer [m^3/h]	Prod Dumper [m^3/h]	Prod Rullo [m^3/h]	Prod Grader [m^3/h]	Prod Pala [m^3/h]	Escavatore [m^3/h]	n. squadre	n. di mezzi con prod oraria più bassa	n. ore	Durata (giorni)	Durata 6/7 (giorni)
Rimozione scotico e preparazione rilevato (Box out)	859,91	226,83	775,75	3 125,00	801,65	261,1	2	4	8,00	60	71
Costruzione rilevato (Fill)	-	453,67	775.75	3 125,00	801,65	261,1	4	4	8,00	206	241
Scavo e sbancamento (Cut)	859,91	-	775,75	-	-	261,1	2	4	8,00	171	200
Sottofondo (Subgrade)	-	226,83	775,75	3 125,00	801,65	261,1	2	4	8,00	33	40
Subballast:	-	226,83	775,75	3 125,00	801,65	261,1	2	4	8,00	32	37
Ballast: 1st layer	-	226,83	775,75	3 125,00	801,65	-	2	4	8,00	16	19
Ballast: 2nd layer	-	226,83	775,75	3 125,00	801,65	-	2	4	8,00	30	35
Posa Binari e Traversine	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19	23
Recinzioni esterne	-	-	-	-	-	-	-	-	-	103	121

Tabella 15: Calcolo del tempo necessario per la costruzione di rilevato e sovrastruttura per la squadra di lavoro aggiornata

	Prod Dozer [m^3/h]	Prod Dumper [m^3/h]	Prod Rullo [m^3/h]	Prod Grader [m^3/h]	Prod Pala Coponente [m^3/h]	Escavatore [m^3/h]	n. squadre	n. ore	Durata 6/7 (giorni)
Rimozione scotico e preparazione rilevato (Box out)	859,91	226,83	775,75	3 125,00	801,65	261,1	2	8,00	71
Costruzione rilevato (Fill)	-	1 020,76	1 551,50	3 125,00	1 603,31	261,1	2	8,00	107
Scavo e sbancamento (Cut)	2 579,74	-	2 327,25	-	-	261,1	2	8,00	67
Sottofondo (Subgrade)	-	85,06	387,88	1 562,50	801,65	261,1	2	9,00	93
Subballast:	-	85,06	387,88	1 562,50	801,65	261,1	2	8,00	99
Ballast: 1st layer	-	226,83	387,88	1 562,50	801,65	-	2	8,00	19
Ballast: 2nd layer	-	340,25	387,88	1 562,50	801,65	-	2	8,00	24
Posa Binari e Traversine	-	-	-	-	-	-	-	-	23
Recinzioni esterne	-	-	-	-	-	-	-	-	120

Tabella 16: Produttività oraria squadra base

	Rimozione scotico e preparazione rilevato (Box out)		*Costruzione rilevato*		*Scavo e sbancamento*		*Sottofondo*		*Subballast*		*Ballast (strato 1)*		*Ballast (strato 2)*	
Mezzi	**N°**	**Produttività [m^3/h]**	**N°**	**Produttività [m^3/h]**	**N°**	**Produttività [m^3/h]**	**N°**	**Produttività [m^3/h]**	**N°**	**Produttività [m^3/h]**	**N°**	**Produttività [m^3/h]**	**N°**	**Produttività [m^3/h]**
Dozer D8T	1	430.0	-	-	1	430.0	-	-	-	-	-	-	-	-
Dumper 740 EJ	4	113.4	4	113.4	-	-	4	113.4	4	113.4	4	113.4	4	113.4
Rullo CAT CS 56	1	387.9	1	387.9	1	387.9	1	387.9	1	387.9	1	387.9	1	387.9
Grader 14 M3	1	1562.5	1	1562.5	-	-	1	1562.5	1	1562.5	1	1562.5	1	1562.5
Pala 950M	1	801.7	1	801.7	-	-	1	801.7	1	801.7	1	801.7	1	801.7
Escavatore K. PC400LC-6	1	261,1	1	261,1	1	261,1	1	261,1	1	261,1	-	-	-	-

Tabella 17: Calcolo della produzione oraria dei mezzi dopo la calibrazione

	Rimozione scotico e preparazione rilevato (Box out)		*Costruzione rilevato*		*Scavo e sbancamento*		*Sottofondo*		*Subballast*		*Ballast (strato 1)*		*Ballast (strato 2)*	
Mezzi	**N°**	**Produttività [m³/h]**	**N°**	**Produttività [m³/h]**	**N°**	**Produttività [m³/h]**	**N°**	**Produttività [m³/h]**	**N°**	**Produttività [m³/h]**	**N°**	**Produttività [m³/h]**	**N°**	**Produttività [m³/h]**
Dozer D8T	1	430,0	-	-	3	1289,9	-	-	-	-	-	-	-	-
Dumper 740 EJ	4	113,4	18	510,4	-	-	2	56,7	2	56,7	4	113,4	6	170,1
Rullo CAT CS 56	1	387,9	2	775,8	3	1163,6	1	387,9	1	387,9	1	387,9	1	387,9
Grader 14 M3	1	1562,5	1	1562,5	-	-	1	1562,5	1	1562,5	1	1562,5	1	1562,5
Pala 950M	1	801,7	1	801,7	-	-	1	801,7	1	801,7	1	801,7	1	801,7
Escavatore K. PC400LC-6	1	261,1	1	261,1	1	261,1	1	261,1	1	261,1	-	-	-	-

Tabella 18: Produzione oraria per ogni componente fornita da Saipem S.p.a

	Rimozione scotico e preparazione rilevato (Box out)		*Costruzione rilevato*		*Scavo e sbancamento*		*Sottofondo*		*Subballast*		*Ballast (strato 1)*		*Ballast (strato 2)*	
Mezzi	**N°**	**Produttività [m³/h]**	**N°**	**Produttività [m³/h]**	**N°**	**Produttività [m³/h]**	**N°**	**Produttività [m³/h]**	**N°**	**Produttività [m³/h]**	**N°**	**Produttività [m³/h]**	**N°**	**Produttività [m³/h]**
Grader operator	1		1		1		1		1		1		1	
Excavator operator	1		1		2		1		1		0		0	
Backhoe operator	0		0		0		0		0		0		0	
Paver operator	0		0		0		0		0		0		0	
Bitumen sprayer operator	0		0		0		0		0		0		0	
Steer loader operator	0		0		0		0		0		0		0	
Roller operator	1		1		1		1		1		1		1	
Dozer operator	1	400	1	150	1	300	1	100	1	80	0	130	0	100
Wheel Loader operator	1		1		1		1		1		1		1	
Truck heavy driver	4		4		4		4		4		4		4	
Dumper heavy driver	0		0		2		0		2		0		0	
Water Tanker heavy driver	0		1		0		1		1		0		0	
Diesel Tanker heavy driver	1		1		1		1		1		1		1	
Unskilled	1		3		1		3		3		3		3	
Skilled	1		2		1		2		2		2		2	
Foreman	1		1		1		1		1		1		1	

Tabella 19: Report delle Quantità fornite da OpenRail Designer

Material	Volume [m^3]	Surface [m^2]	Lenght [m]	Number
Cut Volume:	1062238,94			
Fill Volume:	523698,951			
Ballast:	83166,012			
Bank_Grade:	93956,683			
Free_Zone:		786692,35		
Protective_Cover:	25843,885			
Rails:			61628	
Recinzione_FS:			30814	
Minimum Core Embankment:	58374,522			
Service_Road:	46588,148			
Sleepers				51357
Subballast:	57318,807			
SubGrade:	60760,877			
Rilevato:		137632,609		
Scavo:		72080,339		

Tabella 20: Tabella per la simulazione in Navisworks

Task ID	Task Name	Giorno Inizio	Giorno fine	Material Cost	Labor Cost	CESMM 4 CODE
1	Bonifica Squadra 1	03/06/2012	05/06/2012	14091	14091	D 110
2	Bonifica Squadra 2	03/06/2012	04/06/2012	8414	8414	D 110
3	Free zone Squadra 1	03/06/2012	05/06/2012	-	-	D 120
4	Free zone Squadra 2	03/06/2012	05/06/2012	-	-	D 120
5	Service Roads Squadra 1	03/06/2012	05/06/2012	11109	11109	E 612
6	Service Roads Squadra 2	03/06/2012	04/06/2012	3696	3696	E 612
7	Core embankment Squadra 1_StratoA	06/06/2012	07/06/2012	30835	30835	E 624
8	Core embankment Squadra 2_StratoA	06/06/2012	07/06/2012	27216	27216	E 624
9	Core embankment Squadra 1_StratoB	07/06/2012	09/06/2012	38444	38444	E 624
10	Core embankment Squadra 2_StratoB	07/06/2012	08/06/2012	31080	31080	E 624
11	Core embankment Squadra 1_StratoC	08/06/2012	10/06/2012	35882	35882	E 624
12	Core embankment Squadra 2_StratoC	09/06/2012	10/06/2012	24955	24955	E 624
13	Core embankment Squadra 1_StratoD	09/06/2012	10/06/2012	28287	28287	E 624
14	Core embankment Squadra 2_StratoD	10/06/2012	11/06/2012	18830	18830	E 624
15	Bank grade Squadra 1	11/06/2012	17/06/2012	28609	36783	E 624
16	Bank grade Squadra 2	10/06/2012	13/06/2012	15085	19395	E 624
17	Minimum Core Embankment Squadra 1	11/06/2012	14/06/2012	14329	14329	E 624
18	Minimum Core Embankment Squadra 2	12/06/2012	13/06/2012	4641	4641	E 624
19	Subgrade Squadra 1	13/06/2012	17/06/2012	17040	17040	E 612
20	Subgrade Squadra 2	13/06/2012	15/06/2012	5520	5520	E 612
21	Protective cover Squadra 1	17/06/2012	22/06/2012	6840	4560	E 624
22	Protective cover Squadra 2	15/06/2012	18/06/2012	3720	2480	E 624
23	Subballast Squadra 1	22/06/2012	26/06/2012	24120	16080	E 628
24	Subballast Squadra 2	22/06/2012	26/06/2012	7800	5200	E 628
25	Ballast Squadra 1	26/06/2012	01/07/2012	71675	28670	S 110
26	Ballast Squadra 2	26/06/2012	01/07/2012	23200	9280	S 110
27	Sleepers Dx	09/07/2012	10/07/2012	71500	17875	S 472
28	Sleepers Sx	09/07/2012	10/07/2012	71500	17875	S 472
29	Rail Dx	09/07/2012	10/07/2012	154440	228800	S 410
30	Rail Dx	09/07/2012	10/07/2012	154440	228800	S 410
31	Recinzioni Squadra 1	10/07/2012	11/07/2012	42900	50050	X 144
32	Recinzioni Squadra 2	10/07/2012	11/07/2012	42900	50050	X 144
33	Magrone	05/06/2012	06/06/2012	-	-	F 621
34	Fondazione	03/06/2012	07/06/2012	-	-	F 724
35	Panels	08/06/2012	12/06/2012	-	-	F 744
36	Traverso	21/06/2012	25/06/2012	-	-	A 336
37	Travi 1	13/06/2012	14/06/2012	-	-	F 862
38	Travi 2	14/06/2012	15/06/2012	-	-	F 862
39	Travi 3	15/06/2012	16/06/2012	-	-	F 862
40	Travi 4	16/06/2012	17/06/2012	-	-	F 862
41	Travi 5	17/06/2012	18/06/2012	-	-	F 862
42	Travi 6	18/06/2012	19/06/2012	-	-	F 862
43	Travi 7	19/06/2012	20/06/2012	-	-	F 862
44	Spalle laterali	25/06/2012	29/06/2012	-	-	F 744
45	Soletta	29/06/2012	03/07/2012	-	-	F 722
46	NewJerseyOBR	08/07/2012	09/07/2012	-	-	S 472
47	Rilevato Rampa	12/06/2012	16/06/2012	-	-	E 624

48	Terra Armata	12/06/2012	16/06/2012	-	-	E 612
49	Cono di chiusura	16/06/2012	19/06/2012	-	-	E 624
50	Pacchetto strutturale in terra	03/07/2012	04/07/2012	-	-	R 212
51	Base bitume	04/07/2012	05/07/2012	-	-	R 311
52	Binder	05/07/2012	06/07/2012	-	-	R 321
53	Usura	06/07/2012	07/07/2012	-	-	R 440
54	Walking area	07/07/2012	08/07/2012	-	-	R 213
55	NewJersey	08/07/2012	09/07/2012	-	-	S 472